

УДК 550.348.435

## ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО- ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА 2016 ГОДА

*Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э.*

*Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Российская Федерация  
E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

Приведены результаты восстановления динамических параметров очагов ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\bar{\sigma}$ ,  $\Delta\sigma_r$ ,  $\bar{U}$ ,  $E_U$  и  $M_w$ ) семи землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016 год с  $K_{II} = 7.9-13.1$  по 52 амплитудным спектрам объемных волн  $P$  и  $S$ , зарегистрированных сетью станций Крыма. Для землетрясений 13 мая, 28 июня и 22 июля с  $K_{II} = 10.5$ , 10.9 и 11.6 соответственно получены решения механизма очага по знакам смещений в продольных сейсмических волнах на основе дислокационной модели, а для наиболее сильного землетрясения 15 октября с  $K_{II} = 13.1$  использовано решение механизма очага по данным ISC. В соответствии с полученными решениями определена направленность излучения из очагов на станции регистрации. Выполнен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** механизм очага, направленность излучения, амплитудный спектр, сейсмический момент, радиус дислокации, сброшенное напряжение, энергетический спектр.

### ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное изучение очаговых параметров землетрясений является главной составляющей в научных исследованиях по физике разрушения горных пород под действием накопленных в земных недрах тектонических напряжений. При этом важно иметь статистические данные по очагам землетрясений в широком энергетическом диапазоне за длительный срок наблюдений. В связи с этим ежегодное определение и пополнение статистики по очаговым параметрам важно и необходимо как для теоретических исследований в области физики очага и геодинамики, так и для решения прикладных задач инженерной сейсмологии.

В данной работе приведены очаговые параметры: механизмы очагов, определяющие тип подвижки и кинематические параметры тектонических напряжений, под действием которых произошел разрыв сплошности среды; динамические параметры очага такие, как скалярный сейсмический момент  $M_0$ , радиус круговой дислокации  $r_0$ , сброшенное напряжение  $\Delta\sigma$ , величина деформации сдвига  $\varepsilon$ , кажущееся напряжение  $\eta\bar{\sigma}$ , величина радиационного трения  $\Delta\sigma_r$ , средняя подвижка по разрыву  $\bar{U}$  (или величина дислокации),  $E_U$  – энергия образования дислокации в очаге, магнитуда по сейсмическому моменту  $M_w$ . Для определения этих параметров использованы количественные связи, установленные между теоретическими моделями источников и экспериментальными характеристиками волновых форм сейсмических колебаний. Свойства и особенности спектральных характеристик излучения оценены по энергетическим спектрам.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для восстановления очаговых параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016 г. выбраны только наиболее значимые представительные сейсмические события года с  $K_{II} > 9.5$ , а также два более слабых толчка из юго-восточной части Севастопольского района (район № 1) для пополнения статистических данных по этой территории. Пространственное расположение изученных землетрясений показано на рис. 1, а их основные параметры по данным сводной обработки в Крыму приведены в табл. 1.

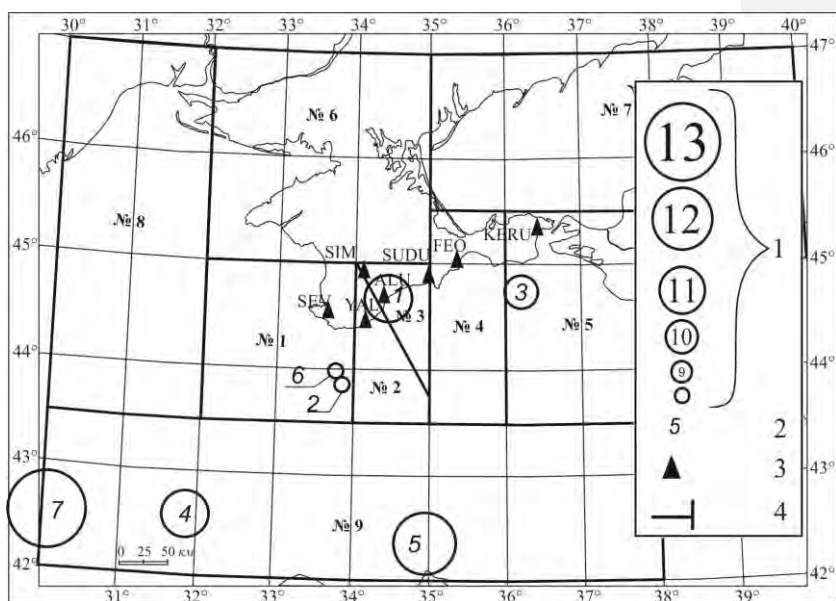


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016 г., для которых восстановлены очаговые параметры: 1 – энергетический класс  $K_{II}$ ; 2 – номер землетрясения по табл. 1; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница районов № 1÷№ 9.

Наибольшее количество изученных землетрясений (3 события) относится к Черноморской впадине (район № 9), два – к Севастопольскому району (№ 1) и по одному – к Алуштинской (№ 3) и Керченско-Анапской зоне очагов (№ 5). Землетрясение № 3 с  $K_{II} = 10.5$  произошло вблизи побережья Южного берега Крыма и ощущалось с интенсивностью до 5 баллов в г. Алуште.

**ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА 2016 ГОДА**

Таблица 1.

Основные параметры землетрясений Крыма за 2016 год,  
для которых восстановлены очаговые параметры

№ п/п	Время возникновения землетрясения, $t_0$					Координаты эпицентра			Глубина очага, км		Энергетический класс		Магнитуда			Район
	месяц	день	час	мин	сек	$\varphi^{\circ}N$	$\lambda^{\circ}E$	$\delta\varphi^{\circ}, \delta\lambda^{\circ}$	$h, км$	$\delta h, км$	$K_{П}$	$\delta K$	$M_w^{*/n}$	$\delta M_w$	$M_{SH}$	
1	5	13	14	5	27.8	44.63	34.41	0.02	13	5	10.4	0.4	3.5/4	0.1	3.3	3
2	5	15	17	14	2.0	43.84	33.83	0.04	32	6	7.9	0.6	2.9/1			1
3	5	26	16	49	33.9	44.73	36.21	0.03	23	2	9.7	0.3	3.1/4	0.1	3.0	5
4	6	28	4	23	51.7	42.46	31.59	0.05	35	5	10.9	0.4	4.1/7	0.1	3.8	9
5	7	22	21	40	13.6	42.35	34.95	0.07	25	6	11.6	0.5	4.2/10	0.2	4.2	9
6	10	12	12	59	12.7	43.98	33.77	0.04	20	8	7.8	0.4	2.4/2	0.1		1
7	10	15	8	18	38.3	42.12	30.70	0.05	17	6	13.1	0.2	4.9/5	0.2	5.0	9

\* – значения  $M_w$  даны по результатам настоящей работы (Табл. 6);

$n$  – число индивидуальных определений, участвовавших в осреднении.

Для расчета амплитудных спектров и восстановления по ним динамических параметров очагов использовано 13 записей продольных ( $P$ ) и 39 – поперечных ( $S$ ) волн на пяти сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU) и «Ялта»(YAL), для которых в 2016 году была проведена калибровка сейсмографов и рассчитаны амплитудно-частотные характеристики. Общая статистика использованного материала по каждой станции дана в табл. 2.

Таблица 2.

Статистика использованного материала

Сейсмическая станция	% участия	Количество спектров	Количество записей	
			$P (Z)$	$S (N, E)$
«Алушта»	71	10	2	8
«Севастополь»	57	10	2	8
«Симферополь»	71	12	3	9
«Судак»	57	12	4	8
«Ялта»	43	8	2	6

Наибольшее количество спектров получено по записям сейсмических станций «Симферополь» и «Алушта». Процент участия этих станций в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений составил 71 %. Большая часть

динамических параметров очагов землетрясений восстановлена по характеристикам амплитудных спектров поперечных волн ( $S$ ), амплитуды которых практически всегда в несколько раз превышают амплитуды продольных волн ( $P$ ).

Решения механизмов очагов трех землетрясений 13 мая, 28 июня и 22 июля с  $K_{II}=10.5$ , 10.9 и 11.6 соответственно получены по знакам первых вступлений продольных ( $P$ ) сейсмических волн на станции Крыма и Международной сети [1], расположенных по отношению к рассмотренным очагам в широком азимутальном створе. Для наиболее сильного землетрясения 15 октября с  $K_{II}=13.1$  использовано решение механизма очага по данным ISC.

## 2. МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ

Решения механизмов очагов (Табл. 3) получены на основе теории дислокации по стандартной методике [2] с использованием знаков первых вступлений продольных  $P$ -волн на сейсмических станциях. Большинство знаков первых движений уточнено по первичным данным волновых форм. Углы выхода сейсмических волн определены по [3] для удаленных станций и по Крымскому [4] – для близких. На стереограммах знаки первых вступлений уверенно разделились нодальными плоскостями (Рис. 2).

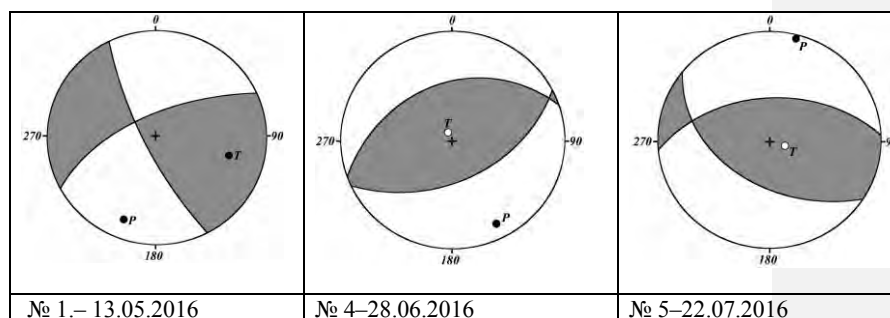


Рис. 2. Стереограммы механизмов очагов землетрясений № 1, 4, 5 – по табл. 1 (в проекции нижней полусферы).  $P$  – оси сжатия;  $T$  – растяжения.

Тип подвижки в очаге ощутимого землетрясения 13 мая, которое произошло вблизи южного берега Крыма, – чистый сдвиг: правосторонний по плоскости  $NP1$  и левосторонний – по  $NP2$ . Обе нодальные плоскости имели близдиагональное простираание ( $STK1=152^\circ$  и  $STK2=244^\circ$ ) с вертикальным погружением (Рис. 2, Табл. 3).

**Землетрясение 28 июня** произошло в западной части Черноморской впадины под действием горизонтальных сил сжатия ( $PL=9^\circ$ ), ориентированных в  $AZM=158^\circ$ . Обе нодальные плоскости наклонные ( $DP1 = 54^\circ$  и  $DP2=36^\circ$ ) с падением  $NP1$  к северо-западу и  $NP2$  – к юго-востоку (Табл. 3). Тип подвижки в очаге – взброс (надвиг).

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО  
РЕГИОНА 2016 ГОДА

Таблица 3.

Параметры механизмов очагов землетрясений  
Крымско-Черноморского региона за 2016 год

№	Дата	$t_0$ , ч мин с	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
			T		N		P		NP1			NP2		
			PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
1	13 мая	14 05 28	20	106	67	315	10	200	152	83	158	244	68	07
4	28 июня	04 23 51.7	81	325	1.7	66	9	156	65	54	88	248	36	93
5	22 июля	21 40 13.6	71	104	19	284	0	14	266	48	64	122	48	115

При землетрясении **22 июля** также произошел взброс под действием горизонтальных сжимающих напряжений ( $PL=0^\circ$ ), ориентированных близмеридионально ( $AZM=14^\circ$ ). Одна из нодальных плоскостей имела широтное простираие ( $NP1=266^\circ$ ), а другая – диагональное ( $NP2=122^\circ$ ). Обе плоскости наклонены к горизонту под одинаковыми углами ( $DP=48^\circ$ ) (Рис. 2, Табл. 3).

Решение механизма наиболее сильного землетрясения **15 октября** с  $K_{II}=13.1$ , произошедшего в западной части Черного моря у берегов Турции, взято из [ISC] по данным обработки в разных международных агентствах (Табл. 4, Рис. 3).

Таблица 4.

Параметры механизма очага землетрясения 15 октября 2016 года  
с  $K_{II}=13.1$  по данным [1].

Агент- ство	$t_0$ , ч мин с	$h$ , км	$M_w$	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
				T		N		P		NP1			NP2		
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
GСMT	08 18 35.9	22	5.3	72	219	11	92	14	360	75	33	70	279	60	103
NEIS-1	08 18 33.6	8	5.0	88	335	0	236	2	146	56.2	47	90.5	236	43	89.5
NEIS-2	08 18 39	16	5.1	72	337	5	232	17	141	55	62	95	224	28	80

В соответствии с полученными решениями землетрясение произошло под действием близгоризонтальных ( $PL_P=2^\circ-17^\circ$ ) сил сжатия диагональной ориентации ( $AZM_P=141^\circ-146^\circ$ ) по данным NEIS и меридиональных – по GСMT ( $AZM_P=360^\circ$ ). Тип подвижки в очаге по данным всех агентств – взброс.

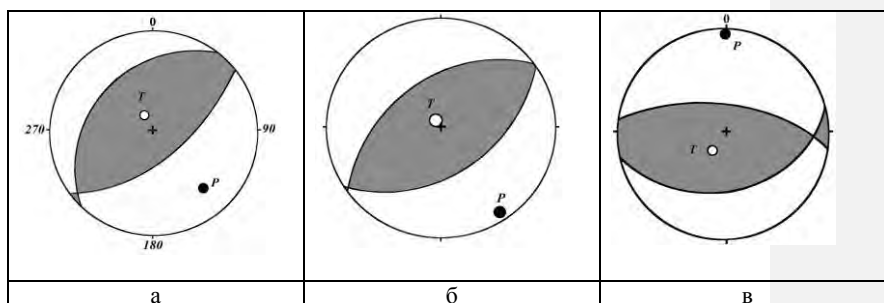


Рис. 3 Стереограммы механизма очага землетрясения 15 октября 2016 года по данным агентств: *а* – NEIS-1; *б* – NEIS-2; *в* – GCMT (в проекции нижней полусферы).

Далее, по параметрам механизмов очагов землетрясений определена направленность излучения из очага на станции регистрации, введена соответствующая поправка в расчет динамических параметров.

### 3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ

Методика обработки и интерпретация амплитудных спектров не изменились по сравнению с 2014 и 2015 гг. [5, 6]. Для расчета амплитудных спектров использованы записи только с четкими фазами объемных *P*- и *S*-волн, с превышением полезного сигнала над фоном помех в два и более раза. Примеры таких записей даны на рис. 4. Как и прежде [5, 6], для расчетов амплитудных спектров и восстановления динамических параметров очагов не использованы записи сейсмостанций «Феодосия» и «Керчь», которые расположены на грунтах с пониженными прочностными свойствами и повышенным затуханием высоких частот. Сейсмические колебания от местных землетрясений на этих станциях существенно осложнены микросейсмическим шумом.

Амплитудные спектры поперечных волн (*S*) рассчитывались по двум горизонтальным составляющим записи (N-S) и (E-W), вычислялся полный вектор колебаний, а продольных (*P*) – по вертикальной составляющей (*Z*). Относительная длительность  $\tau$  исследуемого участка записи принята равной интервалу времени от момента вступления *S*- и *P*-волн до времени спада их максимальных амплитуд  $A_{\max}$  на уровень  $1/3 A_{\max}$  [7].

Для интерпретации амплитудных спектров выбрана теоретическая дислокационная модель Брюна ( $\omega^{-2}$ ) [8], 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  $\gamma \sim -2$  в области коротких периодов. Рассчитанные амплитудные спектры объемных волн землетрясений Крыма за 2016 г. надежно

## ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА 2016 ГОДА

аппроксимируются в рамках выбранной теоретической модели (Рис. 5).

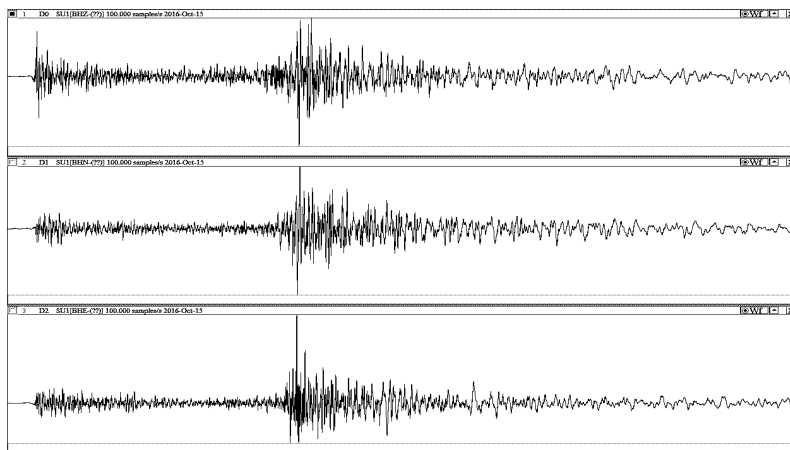
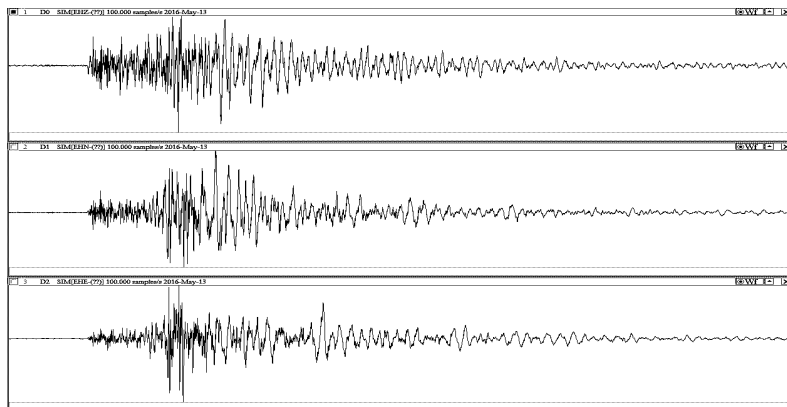


Рис. 4. Примеры записей землетрясений 2016 г. по составляющим Z, N-S, E-W (сверху вниз): *а* – 13 мая с  $K_{II}=10.4$  (№ 1 по табл. 1); *б* – 15 октября с  $K_{II}=13.1$  (№ 7 по табл. 1) соответственно на станциях «Симферополь» ( $\Delta=42$  км) и «Судак» ( $\Delta=463$  км).

На рисунки 5 приведены примеры спектров для землетрясений по разным станциям и типам волн. Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1.

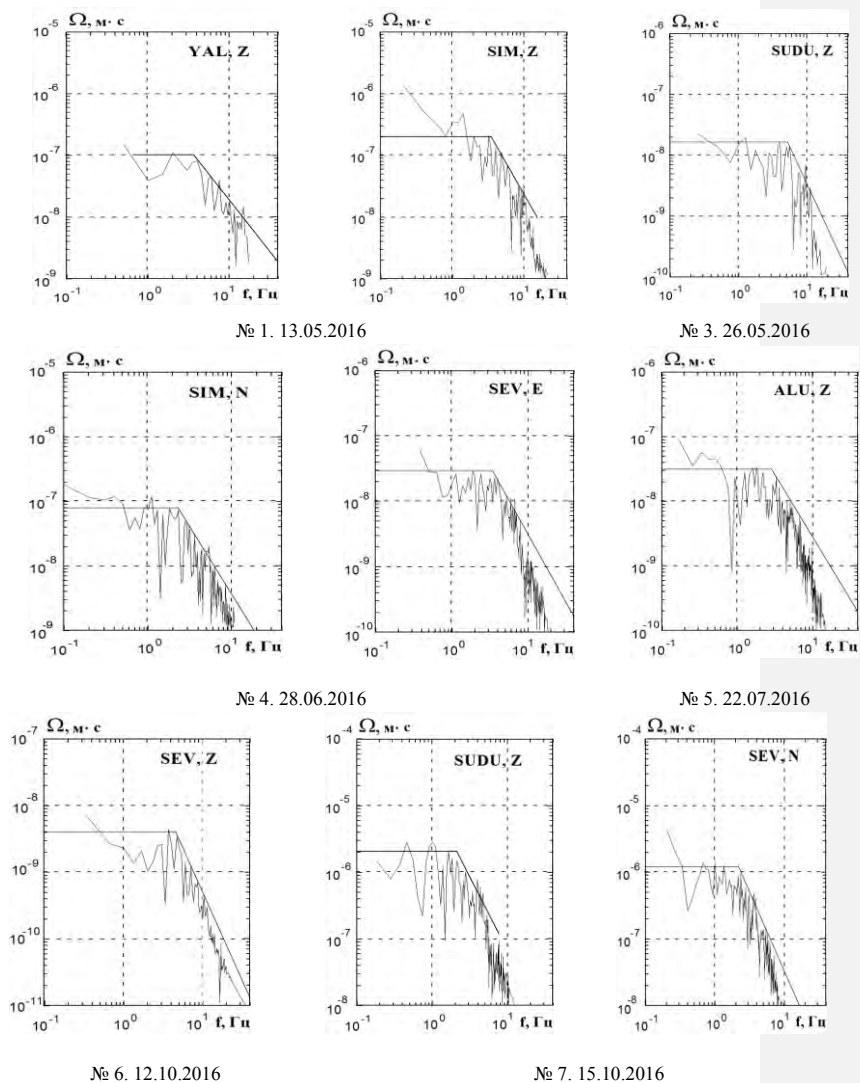


Рис. 5. Примеры амплитудных спектров  $P$ - и  $S$ - волн землетрясений Крыма за 2016 г.

Расчет динамических параметров очага выполнен по параметрам амплитудных спектров записей: спектральной плотности  $\Omega_0$ , которая



**ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА 2016 ГОДА**

пропорциональна скалярному сейсмическому моменту  $M_0$  и угловой частоте  $f_0$ , прямо связанной с размером дислокации  $r_0$  с использованием формул (1) и (2):

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

где  $\Omega_0$  – максимальное значение спектральной плотности при  $\omega \rightarrow 0$ ;  $V$  – скорость распространения объемной волны;  $\rho$  – плотность пород в окрестности очага,  $R_{\theta\phi}$  – 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 [7, 9, 10] и не изменилась по сравнению с предыдущими годами [5, 6, 7].

По параметрам механизма очага определены поправки за направленность излучения из очага  $R_{\theta\phi}$  на станцию регистрации (Табл. 5), которые далее использованы при оценке сейсмического момента  $M_0$ .

Таблица 5.

Поправки за направленность излучения (коэффициент  $R_{\theta\phi}$ ) на станции регистрации от землетрясения 2016 г.

Дата	Станция	ALU		SEV		SIM		SUDU		YAL	
		<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>
13.05	$R_{\theta\phi}$					0.16	0.26			0.13	0.39
28.06	$R_{\theta\phi}$	0.27	0.32	0.24	0.28	0.25	0.29	0.29	0.52		
22.07	$R_{\theta\phi}$	0.07	0.51	0.05	0.56	0.11	0.49	0.18	0.32	0.12	0.42
15.10*	$R_{\theta\phi}$	0.39	0.17	0.57	0.24	0.58	0.24	0.38	0.17		

\* – по GCMT

Для дислокационной модели Брюна с разрывом в виде круга радиус дислокации  $r_0$  вычисляется по угловой частоте  $f_0$  по формуле:

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

Другие динамические параметры очагов: сброшенное напряжение  $\Delta\sigma$ , величина деформации сдвига  $\epsilon$ , кажущееся напряжение  $\eta\bar{\sigma}$ , величина радиационного трения  $\Delta\sigma_r$ , средняя подвижка по разрыву  $\bar{U}$  (или величина дислокации), энергия образования дислокации в очаге  $E_U$  и моментная магнитуда  $M_w$  рассчитаны по формулам из работ [7, 8, 9, 11, 12, 13] с использованием прямых определений по спектрам записей значений сейсмического момента  $M_0$  и размеров разрыва  $r_0$ .

Результаты стационарных и средних значений динамических параметров представлены в табл. 6.

Большинство динамических параметров получено по группе независимых стационарных определений. Только для двух слабых сейсмических толчков (№ 2 и № 6), с энергетическим классом  $K_{II} = 7.9$  и  $K_{II} = 7.8$ , произошедших в Севастопольской зоне, динамические параметры рассчитаны по записям спектров на ближайших к очагу станциях «Алушта» и «Севастополь» соответственно.

Вычисление средних значений параметров и стандартных отклонений выполнено, как и прежде, по стационарным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [7]. Поскольку стационарные значения радиационного трения  $\Delta\sigma_r$  получились отрицательными или знакопеременными, то их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям  $\Delta\sigma$  и  $\eta\bar{\sigma}$  по формуле [11]:

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

В этом случае графа «стандартное отклонение» в табл. 6 не заполнялась. Среднее значение моментной магнитуды  $M_w$  определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние  $\Delta$ , км, тип использованной волны (P, S) и составляющая записи, где (N+E) означает полный вектор колебаний по N+S и E-W.

Таблица 6.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2016 год

Станция	Волна	Составляющая	$\Delta$ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$ , Мс	$\sum \Omega_0 \cdot 10^{-6}$ , Мс	$f_0$ , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$ , Нм	$r_0$ , 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	$E_w \cdot 10^8$ , Джс	$M_w^*$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>№ 1. 13 мая, <math>t_0 = 14</math> ч 05 мин 27.8 с; <math>\varphi = 44.63^\circ</math>, <math>\lambda = 34.41^\circ</math>; <math>h = 13</math> км; <math>K_{II} = 10.4</math></b>															
SIM	P	Z	42	0.2		3.2	22.8	0.73	2.6	8.63	0.46	14.8	-13.5	9.83	3.5
SIM	S	N+E	42		3.0	2.1	38.7	0.64	6.51	21.7	1.01	8.7	-5.45	42.0	3.7
YAL	P	Z	28	0.1		3.5	20.3	0.67	3.02	10.1	0.49	16.6	-15	10.2	3.5
YAL	S	N+E	28		1.25	2.0	16.6	0.67	2.41	8.04	0.39	20.2	-19.1	6.7	3.4
X – среднее значение							<b>23.35</b>	<b>0.68</b>	<b>3.33</b>	<b>11.10</b>	<b>0.55</b>	<b>14.4</b>	<b>-12.7</b>	<b>12.96</b>	<b>3.5</b>
стандартное отклонение							<b>0.08</b>	<b>0.01</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.09</b>	<b>0.08</b>		<b>0.18</b>	<b>0.1</b>
<b>№ 2. 15 мая, <math>t_0 = 17</math> ч 14 мин 02 с; <math>\varphi = 43.84^\circ</math>, <math>\lambda = 33.83^\circ</math>; <math>h = 32</math> км; <math>K_{II} = 7.9</math></b>															
ALU	S	N+E	104		0.11	3.6	3.23	0.39	2.23	7.7	0.22	0.6	0.57	1.25	2.9

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА 2016 ГОДА

Продолжение таблицы 6.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>№ 3. 26 мая, <math>t_0=16</math> ч 49 мин 33.9 с; <math>\varphi = 44.73^\circ</math>, <math>\lambda = 36.21^\circ</math>; <math>h = 23</math> км; <math>K_{II} = 9.7</math></b>															
ALU	S	N+E	143		0.2	2.5	7.88	0.54	2.1	7.24	0.28	7.8	-6.7	2.78	3.2
SIM	S	N	165		0.09	2.2	2.96	0.61	0.57	1.01	0.08	20.2	-19.9	0.28	2.9
SUDU	P	Z	97	0.02		5.0	4.1	0.47	1.78	5.9	0.2	19.6	-13.7	1.22	3.0
SUDU	S	N+E	97		0.2	2.55	7.84	0.53	2.36	7.86	0.3	7.6	-6.5	3.08	3.2
X – среднее значение							<b>5.23</b>	<b>0.54</b>	<b>1.5</b>	<b>4.29</b>	<b>0.19</b>	<b>12.4</b>	<b>-11.7</b>	<b>1.31</b>	<b>3.1</b>
стандартное отклонение							<b>0.11</b>	<b>0.02</b>	<b>0.14</b>	<b>0.21</b>	<b>0.13</b>	<b>0.12</b>		<b>0.24</b>	<b>0.1</b>
<b>№ 4. 28 июня, <math>t_0=04</math> ч 23 мин 48.1 с; <math>\varphi = 42.46^\circ</math>, <math>\lambda = 31.59^\circ</math>; <math>h = 35</math> км; <math>K_{II} = 10.9</math></b>															
ALU	S	N+E	335		0.32	2.3	312	0.73	35.8	59.7	3.15	4.3	13.6	932	4.27
SUDU	P	Z	384	0.025		3.6	321	0.85	23	38.4	2.37	4.18	7.34	617	4.27
SUDU	S	N+E	384		0.11	2.3	204	0.73	23.4	39.0	2.06	6.58	5.11	398	4.14
YAL	S	N+E	306		0.08	2.9	138	0.58	31.8	53	2.22	9.7	6.2	367	4.03
SIM	P	Z	343	0.02		3.8	121	0.8	10.2	17	0.99	11.1	-6.0	102	3.99
SIM	S	N+E	343		0.18	2.2	147	0.76	14.7	24.6	1.36	9.14	-1.78	180	4.05
SEV	S	N+E	286		0.08	3	134	0.56	34.1	56.9	2.3	10	-7.06	382	4.02
X – среднее значение							<b>182.4</b>	<b>0.71</b>	<b>22.7</b>	<b>37.9</b>	<b>1.95</b>	<b>7.35</b>	<b>4</b>	<b>346</b>	<b>4.1</b>
стандартное отклонение							<b>0.07</b>	<b>0.03</b>	<b>0.08</b>	<b>0.08</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>		<b>0.12</b>	<b>0.1</b>
<b>№ 5. 22 июля, <math>t_0=21</math> ч 40 мин 13.6 с; <math>\varphi = 42.35^\circ</math>, <math>\lambda = 34.95^\circ</math>; <math>h = 25</math> км; <math>K_{II} = 11.6</math></b>															
SUDU	P	Z	283	0.3		2.4	1050	1.02	42.6	142	10.6	3.61	17.7	7430	4.62
SUDU	S	N+E	283		1.4	1.6	657	0.88	41.5	138	8.91	5.75	15.0	4550	4.48
SIM	P	Z	298	0.04		3.1	180	0.79	15.8	52.6	3.03	21	-13.1	473	4.11
SIM	S	N+E	298		0.75	1.8	145	0.79	13.1	43.7	2.5	26	-19.4	317	4.04
SEV	P	Z	266	0.01		3.3	150	0.74	15.9	53.1	2.88	25.1	-17.1	399	4.05
SEV	S	N+E	266		0.15	2.25	124	0.63	21.8	72.7	3.33	30.5	-19.6	450	4.0
YAL	P	Z	248	0.02		3.2	122	0.77	11.7	39.1	2.19	31.0	-25.2	238	4.0
YAL	S	N+E	248		0.3	2.5	125	0.57	30.2	101	4.15	30.1	-15	632	4.0
ALU	P	Z	264	0.03		3.0	243	0.82	19.3	64.4	3.84	15.5	-5.9	782	4.19
ALU	S	N+E	264		1.35	2.1	391	0.67	56	187	9.14	9.65	18.3	3650	4.33
X – среднее значение							<b>233.7</b>	<b>0.76</b>	<b>23.4</b>	<b>77.9</b>	<b>4.3</b>	<b>16.2</b>	<b>-4.5</b>	<b>910</b>	<b>4.2</b>
стандартное отклонение							<b>0.11</b>	<b>0.02</b>	<b>0.07</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.11</b>		<b>0.17</b>	<b>0.2</b>
<b>№ 6. 12 октября, <math>t_0=12</math> ч 59 мин 12.7 с; <math>\varphi = 43.98^\circ</math>, <math>\lambda = 33.77^\circ</math>; <math>h = 20</math> км; <math>K_{II} = 7.8</math></b>															
SEV	P	Z	63	0.004		5	0.55	0.47	0.24	0.08	0.03	3.36	-3.34	0.022	2.4
SEV	S	N+E	63		0.013	3.6	0.34	0.37	0.23	0.1	0.02	5.57	-5.4	0.016	2.3
X – среднее значение							<b>0.43</b>	<b>0.41</b>	<b>0.23</b>	<b>0.09</b>	<b>0.02</b>	<b>4.33</b>	<b>-4.2</b>	<b>0.02</b>	<b>2.4</b>
стандартное отклонение							<b>0.1</b>	<b>0.05</b>	<b>0.01</b>	<b>0.05</b>	<b>0.09</b>	<b>0.11</b>		<b>0.07</b>	<b>0.1</b>
<b>№ 7. 15 октября, <math>t_0=08</math> ч 18 мин 33.3 с; <math>\varphi = 42.12^\circ</math>, <math>\lambda = 30.70^\circ</math>; <math>h = 17</math> км; <math>K_{II} = 13.1</math></b>															
ALU	P	Z	413	0.4		2	1010	1.23	23.7	79.5	7.1	59.5	-47.6	3980	4.61
SEV	S	N+E	358		2.2	1.5	1530	0.94	79.5	265	18.2	39.2	0.5	20200	4.73
SIM	S	N+E	418		10.65	1.25	4510	1.13	136	453	37.3	13.3	54.7	102000	5.04
SUDU	P	Z	463	2		2	6220	1.23	147	488	43.7	9.6	63.6	152000	5.13
SUDU	S	N+E	463		4.74	1.3	7960	1.09	212	707	60.7	7.5	98.6	281000	5.2
X – среднее значение							<b>3218</b>	<b>1.12</b>	<b>95.6</b>	<b>319</b>	<b>26.4</b>	<b>18.6</b>	<b>29.2</b>	<b>51154</b>	<b>4.9</b>
стандартное отклонение							<b>0.18</b>	<b>0.02</b>	<b>0.17</b>	<b>0.17</b>	<b>0.17</b>	<b>0.18</b>		<b>0.34</b>	<b>0.2</b>

Наилучшая сходимость станционных определений получена для радиуса круговой дислокации, размеры которого в явном виде не зависят от направленности излучения энергии из очага и условий среды под станцией регистрации. Степень рассеяния индивидуальных определений  $r_0$  для большинства изученных землетрясений находилась в диапазоне  $\delta r_0 = 0.01 \div 0.05$ . Стандартные отклонения по другим параметрам для большинства землетрясений менее  $\delta X < 0.2$ . Уверенно определены средние значения моментных магнитуд  $M_w$  с погрешностью не выше  $\pm 0.2$ , с преобладанием  $\delta M_w \pm 0.1$ . Для магнитудных оценок это достаточно высокая точность.

Наибольшие значения динамических параметров ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\bar{\sigma}$ ,  $\bar{u}$ ,  $E_u$  и  $M_w$ ) получены для наиболее сильного землетрясения 15 октября с  $K_{II} = 13.1$ , произошедшего в районе Черноморской впадины на глубине  $h = 18$  км, а наименьшие – для слабого сейсмического события с  $K_{II} = 7.8$  по данным только одной станции «Алушта». Радиационное трение  $\Delta\sigma_r$  для большинства исследованных землетрясений имело отрицательное значение, указывая на сложное скольжение разрыва в очаге за счет неравномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах.

Как и в предыдущие годы [5, 6], проведем сравнение полученных в 2016 г. динамических параметров очагов: сейсмического момента  $M_0$  и радиуса круговой дислокации  $r_0$  со средними их долговременными величинами (Рис. 6). Для сравнения использованы зависимости  $M_0(K_{II})$  и  $r_0(K_{II})$  из [14]:

$$\begin{aligned} \lg M_0 &= 0.645(\pm 0.027) \cdot K_{II} + 15.142(\pm 0.271), \quad \rho = 0.99 \\ \lg r_0 &= 0.112(\pm 0.011) \cdot K_{II} - 1.293(\pm 0.107), \quad \rho = 0.93, \end{aligned}$$

где  $\rho$  – коэффициент корреляции.

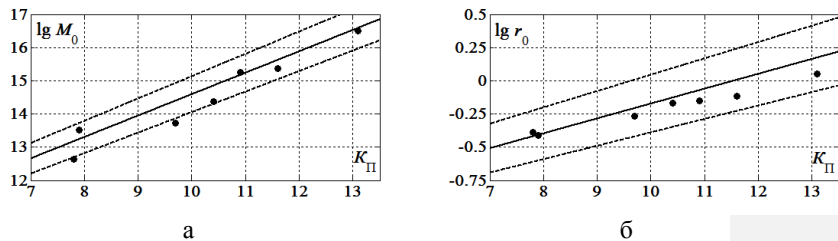


Рис. 6. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2016 г.: а – сейсмического момента  $M_0$  и б – радиуса круговой дислокации  $r_0$  с долговременными зависимостями  $M_0(K_{II})$  и  $r_0(K_{II})$  [14]. Точки – экспериментальные данные за 2016 г. Пунктиром обозначены пределы погрешностей долговременных зависимостей.

В целом для землетрясений 2016 г. средние значения  $M_0$  и  $r_0$  находятся в пределах доверительных областей долговременных зависимостей  $M_0(K_{II})$ ,  $r_0(K_{II})$ .

## ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА 2016 ГОДА

При этом большинство значений  $r_0$  расположены ниже относительно линии регрессии  $r_0(K_{II})$ . Наибольшее отличие  $M_0$  от долговременных параметров по зависимости  $M_0(K_{II})$  получены для наиболее слабого землетрясения 12 декабря (№ 6) по данным только одной станции «Севастополь» и 26 мая (№ 3) с  $K_{II} = 9.7$ . Следует отметить, что станция «Севастополь» систематически дает заниженные значения  $M_0$  [6]. Наилучшее соответствие сейсмического момента долговременным его значениям (для аналогичного энергетического уровня) получено для землетрясений 28 июня, 22 июля и 15 октября (Рис. 6, а) с известными механизмами очагов. Для этих очагов в расчеты  $M_0$  по формуле (1) введены поправки за реальную направленность излучения  $R_{\theta\phi}$ . В то же время введение поправки  $R_{\theta\phi}$  по механизму очага для землетрясения 15 мая привело только к хорошей внутренней сходимости станционных определений  $M_0$ , но среднее значение все равно оказалось ниже долговременной зависимости  $M_0(K_{II})$ . Вероятно, это связано с особенностями энергетических затрат по перемещению крыльев разрыва относительно друг друга на среднюю величину дислокации в очаге.

### 4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Спектральные свойства очагов землетрясений 2016 г. изучены дополнительно по энергетическим спектрам. Переход от спектральной плотности амплитудного спектра к энергетическому спектру осуществлялся по формуле из [15]:

$$q = \frac{\rho c}{\pi l g e} \omega^3 \Omega^2(\omega)$$

где **Ошибка! Источник ссылки не найден.** – плотность пород в окрестности очага,  $c$  – скорость распространения объемных волн ( $P$  или  $S$ ), **Ошибка! Источник ссылки не найден.**  $(\omega)$  – модуль спектральной плотности, определяемый из амплитудного спектра.

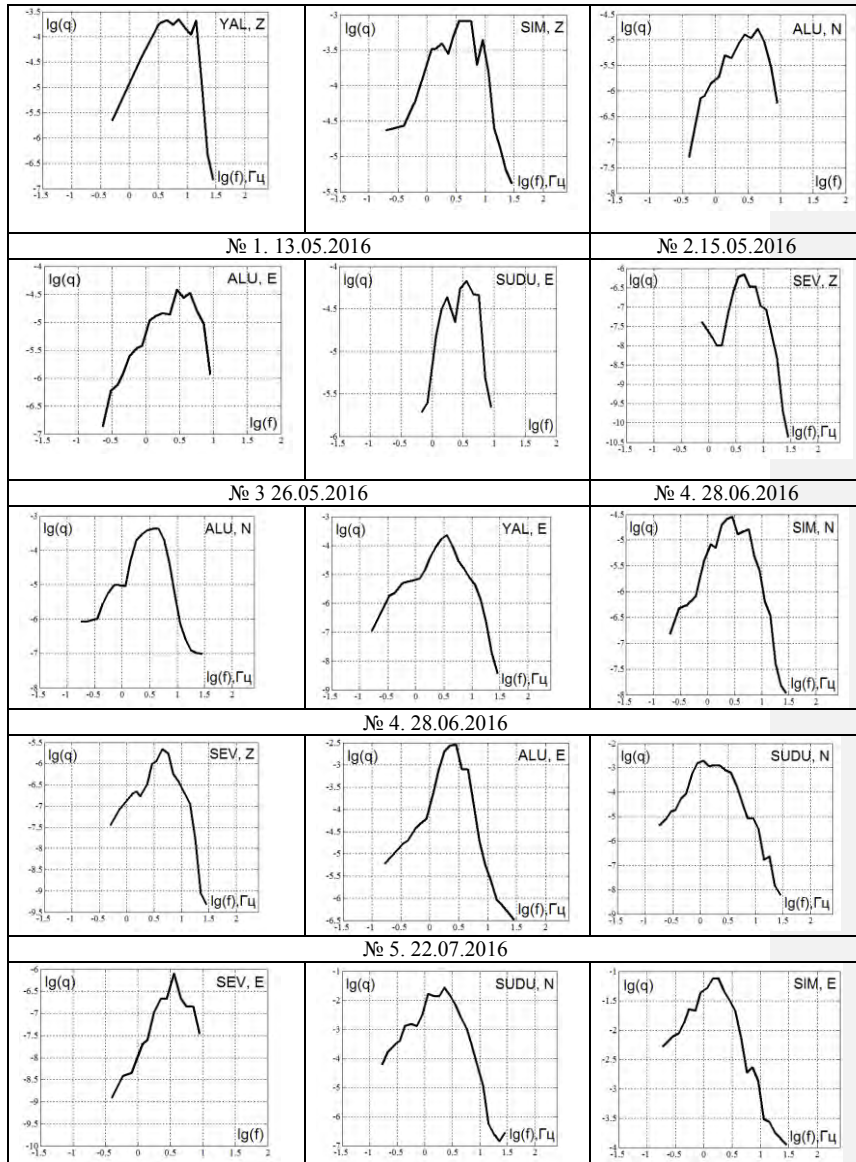
Для исключения осцилляций энергетические спектры сглаживались скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот и представлены в билогарифмической системе координат (Рис. 7). Методика и алгоритм расчета энергетических спектров, их обработка описаны в [7, 15].

Для всех энергетических спектров (Рис. 7) получена характерная резонансная форма с одним выраженным максимумом плотности энергии  $q_{max}$  в ограниченной области частот, как и для других землетрясений Крымско-Черноморского региона [7].

Рассмотрена главная характеристика энергетических спектров – ширина максимума спектра  $\delta f_q$  на уровне 0.9 от максимального значения  $q_{max}$  в высокочастотной ( $f_{q1}$ ) и низкочастотной ( $f_{q2}$ ) части спектра:

$$\delta f_q = f_{q1} - f_{q2}.$$

Результаты расчета  $\delta f_q$  по разным составляющим записи ( $\delta f_E$ ,  $\delta f_N$ ,  $\delta f_Z$ ) представлены в табл. 7.



**ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА 2016 ГОДА**

№ 6. 12.10.2016	№ 7.15.10.2016
-----------------	----------------

Рис. 7. Примеры энергетических спектров землетрясений Крыма 2016 г.  
Таблица 7.

Значения ширины максимума энергетических спектров  $\delta f_q$  землетрясений за 2016 г. по разным станциям и составляющим записи

№	Дата	Станция	Kп	$\Delta$ , км	$\delta f_E$	$\delta f_N$	$\delta f_Z$
1	13.05.2016	SIM	10.5	42	двугорбый	0.85–2.85	2.86–6.45
1	13.05.2016	YLT	10.5	26	2.3–7.2	3.2–7.9	3.0–9.0
2	15.05.2016	ALU	7.9	104	1.15–3.6	2.3–5.7	
3	26.05.2016	ALU	9.7	143	2.57–5.6		
3	26.05.2016	SIM	9.7	165	3.6–8.31	2.3–7.41	
3	26.05.2016	SUDU	9.7	97	2.63–5.89		3.5–6.6
4	28.06.2016	ALU	10.9	335	1.9–3.6	2.26–4.79	
4	28.06.2016	SEV	10.9	286	2.89–5.69	2.83–4.07	2.95–5.67
4	28.06.2016	SIM	10.9	343	0.88–1.78	1.75–3.6	2–3.1
4	28.06.2016	SUDU	10.9	384	2.88–5.75		3.68–6.3
4	28.06.2016	YLT	10.9	306	3.58–7.76	2.8–5.67	
5	22.07.2016	ALU	11.6	264	1.6–3.24		1.79–5.7
5	22.07.2016	SEV	11.6	266	2.28–4.56	2.14–4.53	3.5–6
5	22.07.2016	SIM	11.6	298	1.15–4.55	2.28–3.71	2.69–3.8
5	22.07.2016	SUDU	11.6	283	1.15–3.11	0.79–2.48	1.15–2.1
5	22.07.2016	YLT	11.6	248	2.8–3.9	2.8–3.6	1.7–5.6
6	12.10.2016	SEV	7.8	63	2.8–4.6	1.79–4.57	3.5–5.68
7	15.10.2016	ALU	13.1	413			1.16–3.59
7	15.10.2016	SEV	13.1	358	1.7–4.55	2.1–3.47	2.83–4.5
7	15.10.2016	SIM	13.1	418	1.14–2.26	1.58–3.9	2.57–5.75
7	15.10.2016	SUDU	13.1	463	1.38–3.6	1.14–2.85	1.77–4.54

**Добавлено примечание ([S1]):** Тире при обозначении цифровых диапазонов (рекомендуем уточнить в таблице)

Из рис. 7 и табл. 7 видно, что значения  $q_{max}$  по всем станциям и разным составляющим записи, несмотря на вариации индивидуальных энергетических спектров, находятся в сравнительно ограниченном диапазоне частот:  $\delta f = 1 \dots 6$  Гц с преобладанием максимальных значений плотности сейсмической энергии вблизи 3 Гц. Можно отметить некоторую тенденцию сдвига  $q_{max}$  в сторону более высоких частот для продольных волн (Z-составляющая). Прямой зависимости значений  $\delta f$  от энергетического уровня землетрясения и эпицентрального расстояния из-за ограниченного числа статистических данных не установлено.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Крымско-Черноморском регионе не каждый год происходят землетрясения, для которых можно набрать достаточное количество экспериментальных данных по волновым формам для решения механизмов очагов. В 2016 г. удалось получить надежные решения очагов для четырех землетрясений, одно из которых произошло вблизи побережья Крыма, три других – в Черноморской впадине. Это существенно пополняет статистику для тектонофизических построений и реконструкции современных полей напряжений в регионе.

Для надежных оценок спектральных и динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2016 год использованы только очень четкие записи объемных сейсмических волн на сейсмических станциях с надежными характеристиками регистрирующей аппаратуры. В осреднении динамических параметров очагов участвовало от двух до десяти станционных определений, что обеспечило в основном малую величину стандартного отклонения  $\delta X$ , показателя степени рассеяния индивидуальных оценок. В этой связи количественные оценки спектральных и очаговых параметров можно отнести к категории надежных для дальнейшего их использования в научных и научно-прикладных задачах, в частности при моделировании прогнозных сейсмических воздействий в соответствии с методикой [16, 17] и разработке геодинамических моделей.

## Список литературы

1. International Seismological Centre, On-line Bulletin [Electronic resource]. URL: <http://www.isc.ac.uk>.
2. 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.
3. Kennet B. L. Seismological Tables. Sydney: Research School of Earth Sciences. Australian National University. 2005, 80 p.
4. 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.
5. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2014 года // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. «География. Геология». 2014. Том 27 (66). № 4. С. 70–86
6. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2015 года // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. «География. Геология». 2016. Том 2 (68). № 4. С. 53–68.
7. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
8. Brune I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V.75. № 26. P. 4997–5009.
9. 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 станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 66–79.
10. 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



## ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА 2016 ГОДА

- определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 60–70.
11. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
  12. Кейлис-Борок В. И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Труды Геофизического института АН СССР. 1959. № 9 (136). С. 20–42.
  13. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. № 35. P. 2348–2350.
  14. Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Капитанова С. А., Поречнова Е. И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма. Сейсмичность Северной Евразии. Обнинск: Геофизическая служба РАН, 2008. С. 238–242.
  15. Ризниченко Ю. В., Сейдузова С. С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. М.: Наука, 1984. 180 с.
  16. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Калинин И. В., Мержей Е. А. Сравнительные характеристики акселерограмм, смоделированных для разных сеймотектонических условий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2012. № 6. С. 20–23.
  17. Пустовитенко Б. Г., Мержей Е. А. К прогнозу ожидаемых сейсмических воздействий от сильных землетрясений Крыма // Доповіді Національної академії наук України. 2014. № 5. С. 102–109.

### FOCAL PARAMETERS OF 2016

### CRIMEAN-BLACK SEA REGION EARTHQUAKES

*Pustovitenko, B. G., Eredzhepov, E. E.*

*V. I. Vernadsky", Simferopol, Republic of Crimea, Russia*  
*E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

Focal parameters of seven 2016 earthquakes of Crimean-Black sea region with  $K_p = 7.9$ – $13.1$  have been recovered. Solutions of focal mechanisms that determine the type of shifts in the foci have been obtained for the four strongest earthquakes: 13.05, 28.06, 22.07 and 15.10. The dynamic source parameters – the scalar seismic moment  $M_0$ , radius of the circular dislocation  $r_0$ , released stress  $\Delta\sigma$ , the magnitude of shear deformation  $\varepsilon$ , the apparent stress  $\eta\bar{\sigma}$ , the value of the radiation friction  $\Delta\sigma_r$ , the average shift in the gap  $\bar{U}$ , the energy of dislocation formation in the source  $E_U$ , the magnitude of the seismic moment  $M_w$  – have been restored for seven earthquakes by 52 amplitude spectra using Brune theoretical dislocation model. Properties and peculiarities of spectral radiation characteristics have been evaluated by the energy spectra.

The shift type in the focus of May 13 appreciable earthquake, which happened near the southern coast of Crimea, is a plain shift: right hand side along the plane NP1 and left hand side along the plane NP2. The 28 June, 22 July and 15 October earthquakes occurred in the Black sea basin under the action of horizontal forces of compression. The shift type in the focus is an up thrust. The mechanism parameters of these earthquakes have been used to determine the direction of the radiation from the source at the station of registration to account for some relevant amendments in the calculation of the seismic moment  $M_0$ .

Calculation of the source dynamic parameters has been made by the parameters of the amplitude spectra records: the spectral density  $\Omega_0$ , which is proportional to the scalar seismic moment  $M_0$  and the corner frequency  $f_0$ , which is directly associated with the size of dislocation  $r_0$ .

In general, average values of  $M_0$  and  $r_0$  for 2016 earthquakes, were within the confidence regions of long-term dependencies  $M_0(K_p)$ ,  $r_0(K_p)$ . The best match of the seismic moment to the long-term seismic moment values has been obtained for the earthquakes of 28 June, 22 July and 15 October with known focal mechanisms. For these foci corrections for the real direction of the radiation  $R_{0\varphi}$  have been introduced in the formula for  $M_0$  calculation.

Despite the variation of individual energy spectra, the values of  $q_{max}$  for all the stations and different record components, were within comparatively limited frequency range:  $\delta f = 1 \dots 6$  Hz, with a predominance of the maximum values of seismic energy density around 3 Hz. The trend of  $q_{max}$  towards higher frequencies for longitudinal waves (Z-component) was noted.

For reliable estimates of the spectral and dynamic source parameters of the 2016 Crimean earthquakes only very clear records of body waves at seismic stations with reliable characteristics of recording equipment have been used. The averaging of the source dynamic parameters has been done with the help of from two to ten station definitions, which provided a small value of standard deviation  $\delta X$ . In this regard, quantitative estimates of focal parameters can be classified as reliable for further use for scientific and scientific-applied problems, in particular, when modelling the forecast of seismic effects and the development of geodynamic models.

**Key words:** focal mechanism, direction of radiation, amplitude spectrum, seismic moment, the radius of the dislocation, the released stress, the energy spectrum.

#### References

1. International Seismological Centre, On-line Bulletin [Electronic resource]. URL: <http://www.isc.ac.uk>.
2. Balakina L. A., Vvedenskaya A. V., Golubeva N. V., Misharina L. A., Shirokova E. I. Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij. Moscow: Nauka (Publ.), 1972. 198 p. (in Russian).
3. Kennet B. L. N. Seismological Tables. Sydney: Research School of Earth Sciences Australian National University (Publ.), 1991, 167 p. (in English).
4. Kul'chickij V. E., Safonova G. P., Svidlova V. A. Godografy sejsmicheskikh voln Krymsko-Chernomorskih zemletryasenij // Sejsmologicheskij byulleten' Zapadnoj territorial'noj zony ESSN SSSR (Krym-Karpaty) za 1983 g. 1986, pp. 94–103 (in Russian).
5. Pustovitenko B. G., Ehredzhepov Eh. Eh. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2014 goda // Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo; Geografiya. Geologiya. 2014, Tom 27(66), no.4, pp. 70–86 (in Russian).
6. Pustovitenko B. G., Ehredzhepov Eh. Eh. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2015 goda // Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2016, Tom 2 (68), no. 4, pp. 53–68 (in Russian).
7. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma. Kiev: Naukova dumka (Publ.), 1990, 251 p. (in Russian).
8. Brune I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970, V.75, no. 26, pp. 4997–5009 (in English).
9. 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. Spektry R-voln v zadache opredeleniya dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Perekhod ot stacionnogo spektra k ochagovomu i raschet dinamicheskikh parametrov ochaga // Vulkanologiya i sejsmologiya, 1989, no. 2, pp. 66–79 (in Russian).
10. Aptekman Zh. Ya., Daragan S. K., Dolgoplov V. V., Zaharova A. I., Zobin V. M., Kogan S. Ya., Korchagina O. A., Moskvina A. G., Polikarpova L. A., Chepkunas L. S. Spektry R-voln v zadache opredeleniya dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Unifikaciya iskhodnyh dannyh i

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО  
РЕГИОНА 2016 ГОДА

---

- procedury rascheta amplitudnyh spektrov // Vulkanologiya i seismologiya, 1985, no. 2. pp. 60–70 (in Russian).
11. Kostrov B. V. Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya. Moscow: Nauka (Publ.), 1975, 179 p. (in Russian).
  12. Kejlis-Borok V. I. Issledovanie istochnikov, priblizhenno ehkvivalentnyh ochagam zemletryaseniij // Trudy Geofizicheskogo Instituta AN SSSR. 1959, no. 9 (136), pp. 20–42 (in Russian).
  13. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale // J. Geophys. Res., 1979. V. 84, no. 35, pp. 2348–2350 (in English).
  14. Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A., Kapitanova S. A., Porechnova E. I. Prostranstvennye osobennosti ochagovyh parametrov zemletryaseniij Kryma. Seismichnost' Severnoj Evrazii. Obninsk: Geofizicheskaya sluzhba RAN (Publ.), 2008, pp. 238–242 (in Russian).
  15. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. Spektral'no-vremennaya harakteristika seismicheskoy opasnosti. Moscow: Nauka (Publ.), 1984, 180 p. (in Russian).
  16. Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E., Kalinyuk I. V., Merzhej E. A. Sravnitel'nye harakteristiki akselerogramm, smodelirovannyh dlya raznyh sejmotektonicheskikh uslovij // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij, 2012, no. 6, pp. 20–23 (in Russian).
  17. Pustovitenko B. G. Merzhej E. A. K prognozu ozhidaemyh seismicheskikh vozdeystvij ot sil'nyh zemletryaseniij Kryma // Dopovidi Nacional'noi Akademii Nauk Ukraïni, 2014, no. 5, pp. 102–109 (in Russian).