

550.348.435

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2015 ГОДА

Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э.

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

Приведены результаты решения обратной задачи по восстановлению спектральных и динамических параметров очагов (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\bar{\sigma}$, $\Delta\sigma_r$, \bar{U} , E_U и M_w) шестнадцати землетрясений Крыма 2015 г. в диапазоне энергетических классов $K_{II} = 6.5-10.8$ по записям продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных цифровыми региональными сейсмическими станциями. Основой для расчета динамических параметров являлись рассчитанные сто восемнадцать станционных амплитудных спектров записей. Для аппроксимации полученных амплитудных спектров использована теоретическая дислокационная модель Брюна. Средние значения сейсмических моментов и радиусов круговой дислокации за 2015 г. в пределах погрешностей их определения удовлетворяют средним долговременным зависимостям параметров от энергетического уровня землетрясений, полученным по аналоговым записям. Дается анализ полученных результатов.

Ключевые слова: амплитудный спектр, модель Брюна, спектральная плотность, угловая частота, сейсмический момент, радиус дислокации, сброшенное и кажущееся напряжения, подвижка по разрыву, радиационное трение.

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмические процессы, протекающие в очагах и очаговых зонах землетрясений, являются следствием региональных и локальных тектонических процессов. Прямые количественные измерения напряжений и деформаций в структурах Черноморского бассейна практически невозможны, т. к. основные сейсмогенерирующие разрывные нарушения скрыты под толщей водного слоя. В этих условиях изучение напряженного состояния глубинной среды возможно косвенным методом по данным об очаговых параметрах, в частности, спектральных и динамических параметров очагов сильных и слабых землетрясений, восстанавливаемых по инструментальным записям сейсмических колебаний.

К динамическим параметрам очага относятся: скалярный 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), E_U – энергия образования дислокации в очаге. Для определения этих параметров используются количественные связи, установленные между теоретическими моделями источников и основными характеристиками амплитудных спектров объемных волн.

Ежегодное определение очаговых параметров землетрясений и их оперативное опубликование необходимо для изучения пространственно-временных свойств и особенностей в очаговых зонах местных землетрясений и их использования в задачах геодинамических исследований.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Большинство местных землетрясений Крыма, зарегистрированных в 2015 году региональной сетью сейсмических станций, относится к слабым (энергетические классы $K_{II} < 7$), непредставительным для региона сейсмическим событиям [1], зафиксированным только ближайшими к очаговой зоне сейсмостанциями. Для таких землетрясений основные параметры определены с меньшей надежностью и потому их записи не использованы для восстановления очаговых параметров. Для анализа в 2015 г. выбраны все наиболее значимые представительные сейсмические события года с $K_{II} > 9.0$, а также более слабые толчки менее изученных территорий региона, в том числе Судакско-Феодосийской зоны (район № 4). Пространственное расположение эпицентров 16 землетрясений с энергетическими классами $K_{II} = 6.5-10.8$, для которых определены очаговые параметры, даны на рисунке 1, а их основные параметры по данным сводной обработки в Крыму приведены в таблице 1.

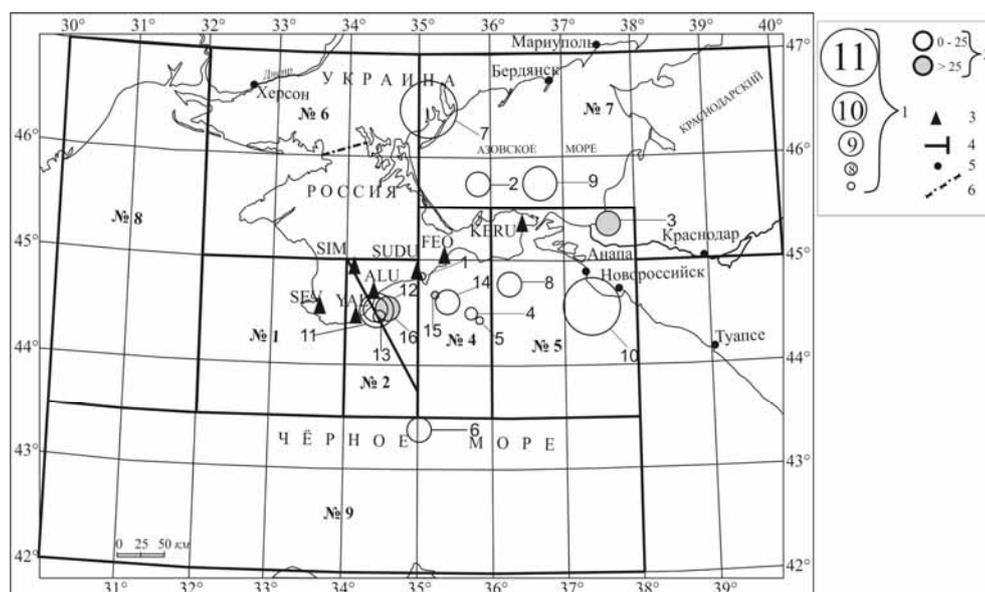


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2015 г., для которых восстановлены очаговые параметры: 1 – энергетический класс K_{II} ; 2 – глубина очага; 3 – сейсмическая станции; 4 – граница районов; 5 – крупные города; 6 – государственная граница.

Наибольшее количество изученных землетрясений (5 событий) относится к Судакско-Феодосийской зоне региона (район № 4), четыре – к Алуштинской (район № 4), четыре – к Азово-Кубанской (район № 7) и Керченско-Анапской зоне очагов (район № 5), одно – к Черноморской впадине (№ 9).

Таблица 1.

Основные параметры землетрясений Крыма за 2015 год,
для которых восстановлены динамические параметры очагов

№ 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_{Π}	δK	$M_w^{%/n}$	δM_w	MSH	
1	1	4	14	43	6.5	44.85	35.05	0.05	25	2	6.5	0.4	2.2/4	0.1		4
2	3	17	6	54	58	45.73	35.82	0.02	17	2	8.7	0.2	3.0/4	0.15		7
3	3	18	9	47	25.1	45.34	37.63	0.07	35	6	9.3	0.2	3.3/4	0.1	3.0	5
4	4	9	18	47	12.7	44.49	35.72	0.05	12	5	7.7	0.4	2.7/3	0.05		4
5	5	4	16	19	54.4	44.43	35.84	0.02	12	2	7.3	0.1	2.5/2	0.1		4
6	5	21	20	52	34.8	43.38	35.01	0.05	7	5	9.0	0.4	3.1/6	0.2		9
7	6	13	11	54	14.8	46.47	35.16	0.07	11	7	10.8	0.2	3.6/7	0.15	3.7	7
8	6	29	2	47	37.4	44.78	36.24	0.04	14	3	8.7	0.3	2.9/4	0.2		5
9	7	5	13	23	34.1	45.74	36.69	0.09	18	10	9.9	0.2	3.5/8	0.2	3.4	7
10	8	16	22	38	0.2	44.56	37.39	0.05	7	4	10.8	0.3	3.7/5	0.1	3.8	5
11	8	29	4	53	49.7	44.51	34.42	0.01	20	2	9.5	0.5	3.3/6	0.1	3.0	3
12	8	29	5	2	12.3	44.52	34.41	0.01	21	2	9.0	0.3	3.1/3	0.1	2.7	3
13	8	30	2	51	48.1	44.46	34.47	0.04	18	4	7.7	0.5	2.6/4	0.1		3
14	8	30	10	47	24.1	44.60	35.4	0.02	11	4	9.3	0.4	3.1/7	0.2	2.9	4
15	8	30	23	44	44.6	44.67	35.24	0.05	27	10	7.3	0.2	2.6/2	0.1		4
16	9	23	2	53	4.2	44.53	34.59	0.01	35	2	9.0	0.5	3.1/5	0.1	2.7	3

*-Значения M_w даны по результатам настоящей работы (Табл. 3);
 n – число индивидуальных определений, участвовавших в осреднении.

Для расчета амплитудных спектров и восстановления по ним динамических параметров очагов использовано 118 записей продольных (P) и поперечных (S) волн на сейсмических станциях «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), для которых в 2015 году была проведена калибровка сейсмографов и рассчитаны амплитудно-частотные характеристики. Общая статистика использованного материала по каждой станции дана в таблице 2.

Таблица 2.

Статистика использованного материала

Сейсмическая станция	% участия	Количество спектров	Количество записей объемных волн	
			$P (Z)$	$S (N, E)$
«Алушта»	69	24	3	21
«Севастополь»	75	29	5	24
«Симферополь»	44	18	4	14
«Судак»	100	47	15	32

Наибольшее количество спектров получено по записям сейсмических станций «Судак» и «Севастополь». Процент участия этих же станций в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 100 % и 75 %. Меньше всего для анализа привлекались записи станции «Симферополь» (44 %), особенно для относительно слабых землетрясений, при которых сейсмические колебания часто осложнены высоким уровнем городских микросейсмических шумов. 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).

Как и в предыдущем году [2], не использованы для анализа записи сейсмостанций «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 пока не представляется возможным. Не использованы в данной работе также записи сейсмостанции «Ялта», в связи с недостаточным уровнем надежности оценки амплитудно-частотных характеристик сейсмографов.

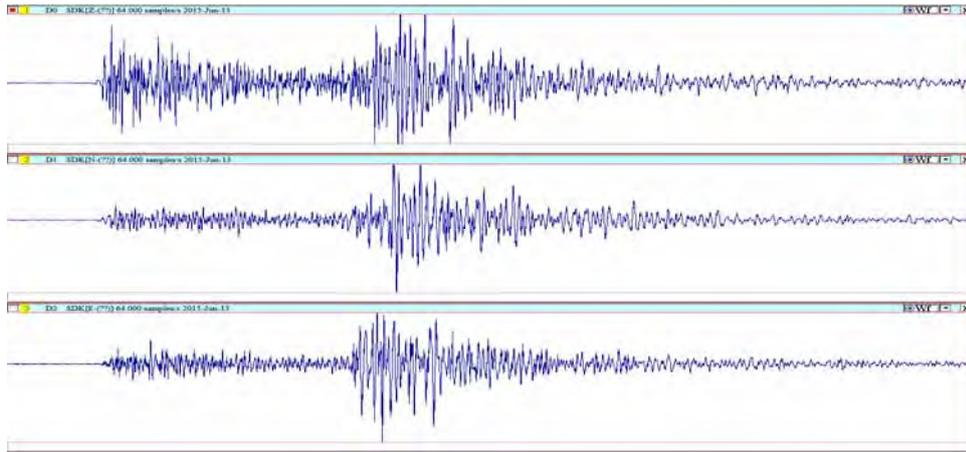
2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ

Для анализа отобраны только записи с четкими фазами объемных P - и S -волн, не осложненные микросейсмическим шумом с превышением полезного сигнала над фоном помех в два и более раза. Примеры таких записей даны на рисунке 2.

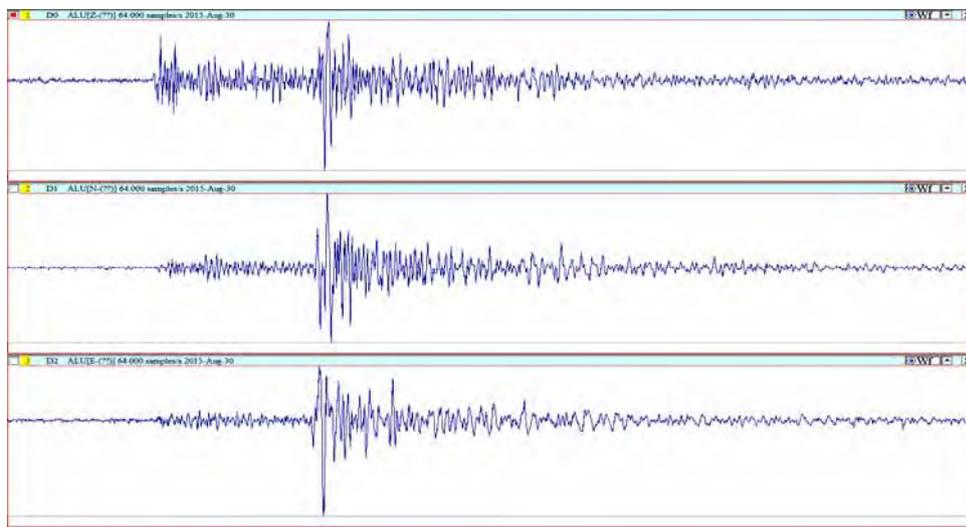
Амплитудные спектры поперечных волн (S) во всех случаях рассчитывались по двум горизонтальным составляющим записи (N - S) и (E - W), и вычислялся полный вектор колебаний, а продольных (P) – по вертикальной составляющей (Z). Относительная длительность τ исследуемого участка записи принята равной интервалу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

Станционные амплитудные спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье. Для интерпретации выбрана теоретическая дислокационная модели Брюна (ω^{-2}) [4], 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 (ω_0) и углом наклона $\gamma \sim -2$.

Полученные амплитудные спектры записей землетрясений Крыма за 2015 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. 3), что соответствует выбранной теоретической модели.



а)

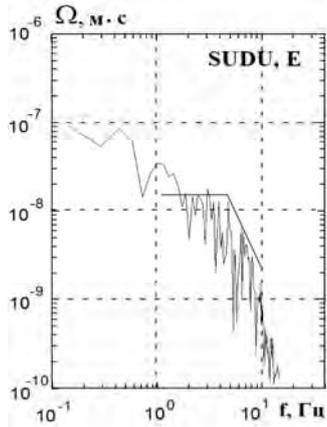


б)

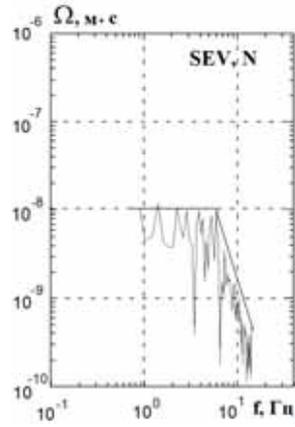
Рис. 2. Примеры записей землетрясений 2015 г. по составляющим Z, N-S, E-W (сверху вниз): а– 13 июня с $K_{II} = 10.8$ (№ 7 по таблице 1); б– 30 августа с $K_{II} = 9.3$ (№ 14 по таблице 1) соответственно на станциях «Алушта», $\Delta = 195$ км и «Судак», $\Delta = 45$ км.

Всего по записям объемных волн, отобранных для анализа шестнадцати землетрясений, рассчитано 118 амплитудных спектров по разным типам волн и составляющим записи на сейсмограмме. Ввиду многочисленности рассчитанных спектров их невозможно все представить в данной статье в полном объеме, потому на рисунке 3 приведены только характерные примеры для землетрясений по разным типам волн и отдельным станциям регистрации.

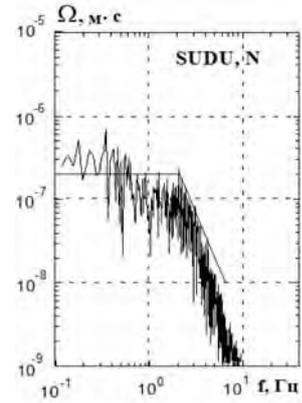
СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
КРЫМА 2015 ГОДА



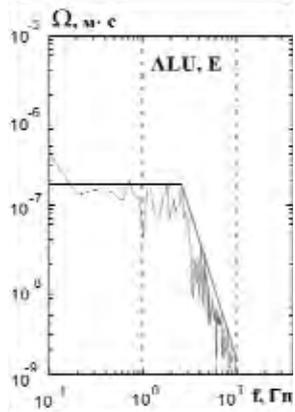
№ 1. 2015-01-04



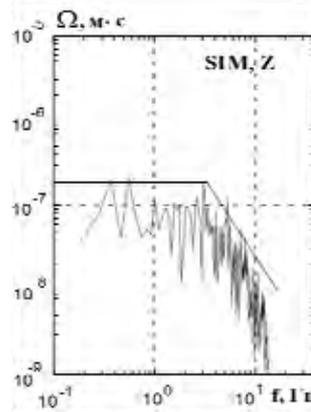
№ 2. 2015-03-17



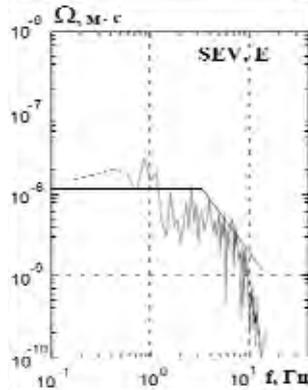
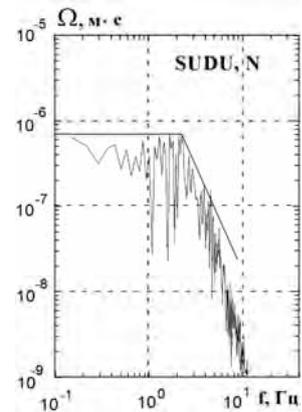
№ 3. 2015-03-08



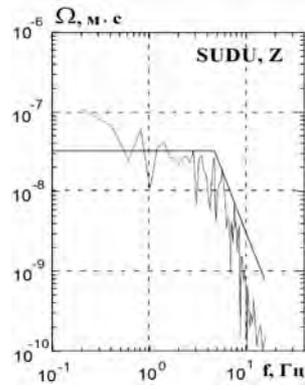
№ 6. 2015-05-21



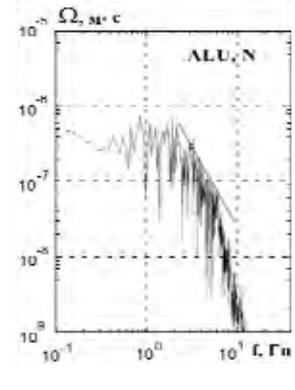
№ 7. 2014-06-13



№ 8. 2015-06-29



№ 9. 2015-07-05



№ 10. 2015-08-16

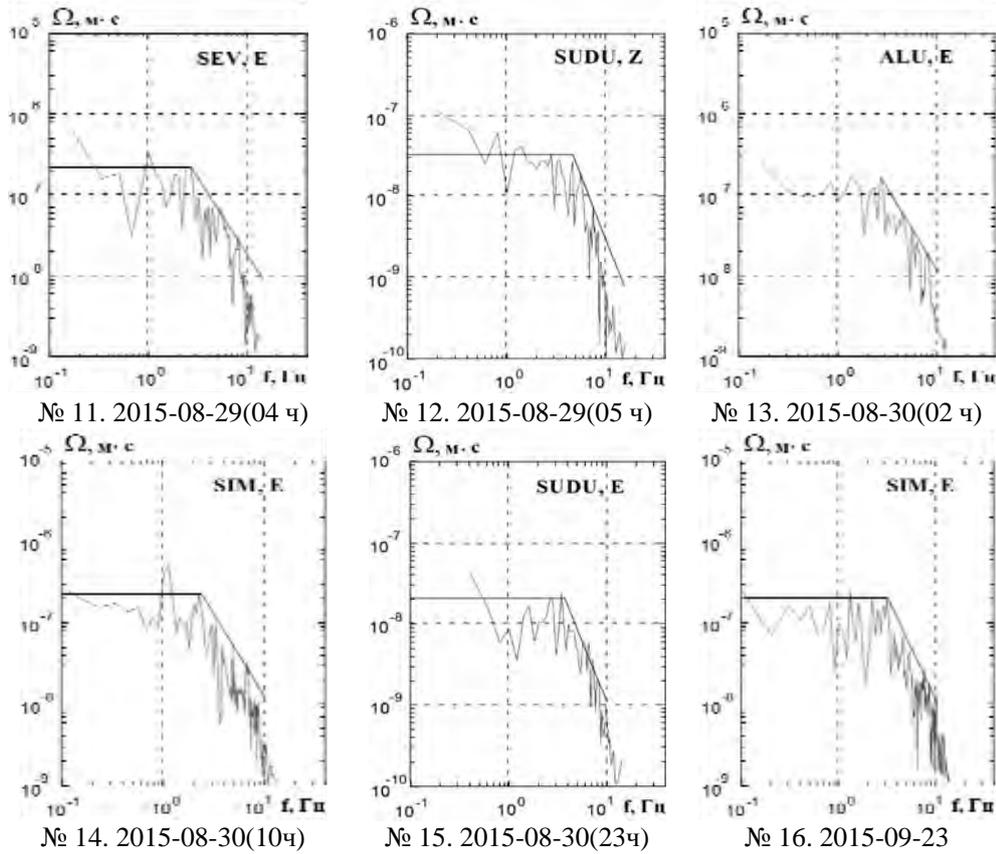


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2015 г. по записям региональных цифровых сейсмостанций и их аппроксимация в рамках теоретической модели Брюна. Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в таблице 1.

3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА

Для восстановления очаговых параметров в рамках дислокационной модели Брюна [4] используются две главные характеристики амплитудных спектров: спектральная плотность Ω_0 , которая пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 (1) и угловая частота f_0 , прямо связанная с размером дислокации r_0 (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: Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; V – скорость распространения объемной волны; ρ – 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 стационарного спектра к спектру источника подробно изложена в работах [3, 5, 6] и не изменилась по сравнению с предыдущими годами.

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

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

По найденным значениям сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 с использованием формул из работ [3, 4, 5, 7, 8] определены другие динамические параметры очагов: 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), энергия образования дислокации в очаге E_U и моментная магнитуда M_w (Табл. 3). Моментная магнитуда рассчитана по индивидуальным оценкам сейсмических моментов M_0 с использованием формулы Канамори [9]:

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

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

где: M_0 имеет размерность *дин·см* (3) и *Н·м* (4), соответственно в СГС и СИ.

Большинство динамических параметров получено по группе независимых стационарных определений. Только для двух слабых сейсмических толчков (№ 5 и № 15) энергетическим классом $K_{II} = 7.3$, произошедших в Судакско-Феодосийской зоне, динамические параметры рассчитаны по записям *P*- и *S*-волн на ближайшей к очагу станции «Судак».

Вычисление средних значений параметров и стандартных отклонений выполнено по стационарным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [3]. 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 5 [7]:

$$\Delta\sigma_r = 1/2 \Delta\sigma - \eta\bar{\sigma} \quad (5).$$

В этом случае графа «стандартное отклонение» в таблице 3 не заполнялась. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Результаты расчета стационарных и средних для землетрясения спектральных и динамических параметров представлены в таблице 3. Для каждой станции указаны

эпицентральное расстояние Δ , км, тип использованной волны (P , S) и составляющая записи, где (N+E) означает полный вектор колебаний по N+S и E-W.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Количественные параметры амплитудного стационарного спектра существенно зависят от энергии в очаге, направленности излучения на станцию регистрации, от 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 очагов землетрясений Крыма за 2015 год использованы не только записи нескольких станций, но и разных типов волн. В усреднении очаговых параметров участвовало от двух до восьми стационарных определений, что обеспечило в основном малую величину стандартного отклонения δX , показателя степени рассеяния индивидуальных оценок.

Таблица 3.
Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2015 год

Станция	Волна	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	$\sum \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\dot{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_{\text{н}} \cdot 10^8$, Дж	M_{W}^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№ 1. 4 января, $t_0=14$ ч 43 мин 6.5 с; $\varphi = 44.85^\circ$, $\lambda = 35.05^\circ$; $h = 25$ км; $K_{\text{П}}=6.5$															
ALU	S	N+E	264		1.2	1.6	10.5	0.88	0.67	2.2	0.14	2.85	-2.5	1.2	3.28
SEV	P	Z	323	0.008		4.8	6.22	0.51	2.03	6.76	0.25	4.82	-3.8	2.1	3.13
SEV	S	N+E	323		0.065	2.6	9.65	0.54	2.62	8.73	0.35	3.11	-1.8	4.2	3.26
SUDU	S	N+E	212		0.26	2.2	21.5	0.61	4.16	1.39	0.61	1.4	0.7	14.9	3.49
X – среднее значение							10.8	0.6	2	3.67	0.29	2.78	-1.78	3.54	3.3
стандартное отклонение							0.11	0.05	0.17	0.19	0.13	0.11		0.24	0.1
№ 2. 17 марта, $t_0=6$ ч 54 мин 58 с; $\varphi = 45.73^\circ$, $\lambda = 35.82^\circ$; $h = 17$ км; $K_{\text{П}}=8.7$															
ALU	S	N+E	161		0.18	3	8.17	0.45	4.01	13.4	0.43	1.3	0.7	5.46	3.21
SEV	S	N+E	213		0.02	5	1.69	0.27	3.83	12.8	0.25	6.3	-4.4	1.08	2.76
SUDU	P	Z	113	0.01		4.2	3.37	0.55	0.61	2.03	0.08	4.5	-4.2	0.24	2.85
SUDU	S	N+E	113		0.097	2.3	4.39	0.58	0.97	3.23	0.14	2.4	-1.94	0.71	0.03
X – среднее значение							3.78	0.44	1.74	5.79	0.19	3.1	-2.23	1	3.0
стандартное отклонение							0.14	0.08	0.21	0.21	0.16	0.15		0.28	0.15

Продолжение таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
КРЫМА 2015 ГОДА

Продолжение таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№ 3. 18 марта, $t_0=09$ ч 47 мин 25.1 с; $\varphi = 45.34^\circ$, $\lambda = 37.63^\circ$; $h = 35$ км; $K_{II}=9.3$															
ALU	S	N+E	264		1.2	1.6	10.5	0.88	0.67	2.2	0.14	2.85	-2.5	1.2	3.28
SEV	P	Z	323	0.008		4.8	6.22	0.51	2.03	6.76	0.25	4.82	-3.8	2.1	3.13
SEV	S	N+E	323		0.065	2.6	9.65	0.54	2.62	8.73	0.35	3.11	-1.8	4.2	3.26
SUDU	S	N+E	212		0.26	2.2	21.5	0.61	4.16	1.39	0.61	1.4	0.7	14.9	3.49
X – среднее значение							10.8	0.6	2	3.67	0.29	2.78	-1.78	3.54	3.3
стандартное отклонение							0.11	0.05	0.17	0.19	0.13	0.11		0.24	0.1
№ 4. 9 апреля, $t_0=18$ ч 47 мин 12.7 с; $\varphi = 44.49^\circ$, $\lambda = 35.72^\circ$; $h = 12$ км; $K_{II}=7.7$															
ALU	S	N+E	107		0.65	3	1.65	0.42	0.96	3.2	0.09	0.81	-0.33	0.27	2.75
SUDU	P	Z	73	0.009		5	1.2	0.45	0.59	1.96	0.06	0.12	-0.83	0.12	2.66
SUDU	S	N+E	73		0.78	2.8	1.3	0.40	0.89	2.98	0.09	1.03	-0.59	0.19	2.68
X – среднее значение							1.37	0.42	0.8	2.65	0.08	0.46	-0.06	0.18	2.7
стандартное отклонение							0.04	0.01	0.07	0.07	0.06	0.3		0.1	0.03
№ 5. 4 мая, $t_0=16$ ч 19 мин 54.4 с; $\varphi = 44.43^\circ$, $\lambda = 35.84^\circ$; $h = 12$ км; $K_{II}=7.3$															
SUDU	P	Z	84	0.003		5.8	0.46	0.39	0.35	1.17	0.03	1.46	-1.29	0.03	2.38
SUDU	S	N+E	84		0.03	3.8	0.84	0.33	0.99	3.3	0.08	0.8	-0.31	0.14	2.55
X – среднее значение							0.62	0.36	0.59	2	0.05	1.1	-0.81	0.06	2.5
стандартное отклонение							0.13	0.04	0.23	0.23	0.21	0.13		0.33	0.1
№ 6. 21 мая, $t_0=20$ ч 52 мин 34.8 с; $\varphi = 43.38^\circ$, $\lambda = 35.01^\circ$; $h = 7$ км; $K_{II}=9.0$															
ALU	P	Z	153	0.012		4	2.4	0.56	0.6	2.0	0.08	7.44	-7.14	0.24	2.86
ALU	S	N+E	153		0.3	2.4	10.9	0.53	3.25	10.8	0.42	1.64	-0.09	5.92	3.29
SEV	S	N+E	168		0.08	2.25	2.86	0.50	1.02	3.4	0.13	6.26	-5.75	0.49	2.91
SIM	S	N+E	189		0.5	1.9	10.1	0.59	2.17	7.24	0.31	1.77	-0.07	3.65	3.27
SUDU	P	Z	168	0.045		3.1	7.44	0.6	1.5	5.0	0.22	2.4	-1.65	1.86	3.18
SUDU	S	N+E	168		0.32	2	11.4	0.51	3.81	12.7	0.47	1.56	0.34	7.26	3.31
X – среднее значение							6.32	0.54	1.7	5.69	0.23	2.82	-1.97	1.8	3.1
стандартное отклонение							0.12	0.01	0.13	0.13	0.12	0.12		0.25	0.2
№ 7. 13 июня, $t_0=11$ ч 54 мин 14.8 с; $\varphi = 46.47^\circ$, $\lambda = 35.16^\circ$; $h = 11$ км; $K_{II}=10.8$															
ALU	S	N+E	195		1.2	2.2	59.1	0.58	13.6	45.2	1.89	8.05	-1.27	134	3.78
SEV	P	Z	233	0.02		5.2	9.7	0.45	4.73	15.8	0.51	4.9	-4.66	7.7	3.26
SEV	S	N+E	233		0.18	3	14.1	0.42	8.18	27.3	0.84	33.8	-29.7	19.2	3.37
SIM	P	Z	177	0.2		3.7	32.4	0.6	6.44	21.5	0.94	14.7	-11.4	34.9	3.61
SIM	S	N+E	177		1.6	1.9	47.2	0.67	6.98	23.3	1.13	10.1	-6.58	55	3.72
SUDU	P	Z	162	0.2		3.2	59.3	0.70	7.61	25.4	1.29	8.02	-4.22	75.2	3.79
SUDU	S	N+E	162		0.81	2.0	43.7	0.63	7.53	25.1	1.16	10.9	-7.12	54.8	3.7
X – среднее значение							31.68	0.57	7.52	25.1	1.04	10.8	-7.04	39.7	3.6
стандартное отклонение							0.12	0.03	0.03	0.06	0.07	0.07		0.15	0.2
№ 8. 29 июня, $t_0=02$ ч 47 мин 37.4 с; $\varphi = 44.78^\circ$, $\lambda = 36.24^\circ$; $h = 14$ км; $K_{II}=8.7$															
ALU	S	N+E	146		0.3	3	10.5	0.42	6.08	20.5	0.61	1.0	2.02	10.6	3.28
SEV	S	N+E	204		0.018	3.2	1.23	0.40	0.87	2.9	0.08	8.7	-8.24	0.18	2.66
SUDU	P	Z	95	0.01		4.6	1.81	0.49	0.69	2.31	0.08	5.87	-5.52	0.21	2.78
SUDU	S	N+E	95		0.12	2.9	3.96	0.44	0.21	6.94	0.22	2.69	-1.65	1.57	3.0
X – среднее значение							3.10	0.44	0.94	5.56	0.17	3.42	-2.95	0.89	2.9

Продолжение таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
стандартное отклонение							0.21	0.02	0.3	0.22	0.21	0.21		0.4	0.2
№ 9. 5 июля, $t_0=13$ ч 23 мин 34.1 с; $\varphi = 45.74^\circ$, $\lambda = 36.69^\circ$; $h = 18$ км; $K_{\Pi} = 9.9$															
ALU	P	Z	214	0.01		3.6	3.16	0.65	0.51	1.7	0.08	26.8	-26.5	0.27	2.94
ALU	S	N+E	214		1.0	2.2	60.3	0.61	11.7	38.9	1.72	1.4	4.43	117.0	3.79
SEV	P	Z	271	0.015		5	8.41	0.47	3.65	12.2	0.41	10.1	-8.24	5.1	3.22
SEV	S	N+E	271		0.14	3.6	15.0	0.37	12.7	42.3	1.15	5.64	0.71	31.7	3.39
SIM	P	Z	219	0.09		4.2	20.5	0.55	5.27	17.6	0.71	4.12	-1.49	18.0	3.48
SIM	S	N+E	219		1.22	2.2	53.1	0.61	10.3	34.2	1.52	1.59	3.54	90.9	3.75
SUDU	P	Z	162	0.07		3.8	23.4	0.61	4.46	14.9	0.66	3.61	-1.36	17.4	3.52
SUDU	S	N+E	162		0.67	2.1	42.9	0.64	7.21	24.0	1.12	1.97	1.63	51.5	3.69
X – среднее значение							20.1	0.56	5.13	17.1	0.69	4.21	-1.65	17.2	3.5
стандартное отклонение							0.15	0.03	0.16	0.16	0.15	0.15		0.3	0.2
№ 10. 16 августа, $t_0=22$ ч 38 мин 0.2 с; $\varphi = 44.56^\circ$, $\lambda = 37.39^\circ$, $h = 7$ км; $K_{\Pi} = 10.8$															
ALU	S	N+E	237		1.0	1.7	78.8	0.74	8.35	27.8	1.51	6.06	-1.86	110	3.87
SEV	S	N+E	294		0.2	2.1	19.6	0.60	3.01	13	0.57	24.3	-22.3	12.8	3.45
SIM	S	N+E	262		1.56	1.5	68.1	0.84	4.96	16.5	1.01	6.98	-4.51	56.2	3.83
SUDU	P	Z	193	0.08		3.6	28.2	0.62	5.16	17.2	0.78	16.9	-14.3	24.3	3.57
SUDU	S	N+E	193		0.75	2.2	48.1	0.58	11.0	36.6	1.54	9.88	-4.36	88.6	3.72
X – среднее значение							42.7	0.67	5.89	20.6	1.01	11.1	-8.2	44.3	3.7
стандартное отклонение							0.11	0.03	0.1	0.08	0.08	0.11		0.18	0.1
№ 11. 29 августа, $t_0=04$ ч 53 мин 49.7 с; $\varphi = 44.51^\circ$, $\lambda = 34.42^\circ$; $h = 20$ км; $K_{\Pi} = 9.5$															
SEV	P	Z	59	0.05		4.2	6.49	0.55	1.67	5.56	0.22	6.53	-5.69	1.81	3.14
SEV	S	N+E	59		0.3	2.9	7.44	0.46	3.3	11.0	0.37	5.69	-4.04	4.09	3.18
SUDU	P	Z	62	0.08		4	10.2	0.58	2.27	7.55	0.32	4.15	-3.02	3.85	3.28
SUDU	S	N+E	62		0.47	2.8	11.5	0.48	4.57	15.2	0.53	3.7	-1.42	8.72	3.31
SIM	P	Z	54	0.3		2.95	17.8	0.79	1.58	5.27	0.3	2.38	-1.59	4.69	3.44
SIM	S	N+E	54		1.6	1.6	18.1	0.84	1.35	4.49	0.27	2.34	-1.67	4.06	3.44
X – среднее значение							11.1	0.6	2.23	7.41	0.32	3.83	-2.7	4.1	3.3
стандартное отклонение							0.08	0.04	0.08	0.08	0.05	0.08		0.09	0.1
№ 12. 29 августа, $t_0=05$ ч 2 мин 12.3 с; $\varphi = 44.52^\circ$, $\lambda = 34.41^\circ$; $h = 21$ км; $K_{\Pi} = 9.0$															
SEV	S	N+E	58		0.19	2.9	4.63	0.46	2.05	6.84	0.23	4.59	-3.56	1.58	3.05
SUDU	P	Z	62	0.04		4.5	5.1	0.52	1.61	5.38	0.2	4.16	-3.36	1.37	3.08
SUDU	S	N+E	62		0.42	2.8	10.2	0.48	4.08	13.6	0.47	2.07	-0.03	6.96	3.28
X – среднее значение							6.22	0.49	2.38	7.94	0.29	3.41	-2.22	2.5	3.1
стандартное отклонение							0.11	0.02	0.12	0.12	0.11	0.11		0.23	0.1
№ 13. 30 августа, $t_0=02$ ч 51 мин 48.1 с; $\varphi = 44.46^\circ$, $\lambda = 34.47^\circ$; $h = 18$ км; $K_{\Pi} = 7.7$															
SEV	S	N+E	63		0.017	3.5	0.44	0.38	0.34	1.13	0.03	3.07	-2.9	0.025	2.36
ALU	S	E	25		0.21	3	1.5	0.45	0.74	2.45	0.08	0.89	-0.5	0.18	2.72
SUDU	P	Z	63	0.0042		5.8	0.54	0.4	0.37	1.23	0.04	2.46	-2.3	0.034	2.43
SUDU	S	N+E	63		0.042	2.9	1.04	0.46	0.46	1.54	0.05	1.29	-1.0	0.08	2.61
X – среднее значение							0.78	0.42	0.45	1.51	0.05	1.72	-1.5	0.06	2.5
стандартное отклонение							0.12	0.02	0.08	0.08	0.09	0.12		0.19	0.1
№ 14. 30 августа, $t_0=10$ ч 47 мин 24.1 с; $\varphi = 44.60^\circ$, $\lambda = 35.4^\circ$; $h = 11$ км; $K_{\Pi} = 9.3$															

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
КРЫМА 2015 ГОДА

Продолжение таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ALU	S	N+E	79		0.71	2.3	13.4	0.55	3.51	11.7	0.47	2.24	-0.5	7.84	3.35
SEV	P	Z	136	0.01		4.8	2.5	0.47	1.08	3.61	0.12	12	-11.5	0.45	2.87
SEV	S	N+E	136		0.04	3.2	1.82	0.40	1.28	4.28	0.12	16.5	-15.9	0.39	2.79
SUDU	P	Z	45	0.11		4.4	6.49	0.51	2.17	7.23	0.27	4.62	-3.5	2.35	3.14
SUDU	S	N+E	45		1.05	2.3	15.8	0.55	4.14	13.8	0.55	1.9	0.17	10.9	3.4
SIM	S	N+E	109		0.46	2.5	8.4	0.51	2.84	9.47	0.35	3.56	-2.14	4.0	3.22
X – среднее значение							6.12	0.5	2.23	7.45	0.27	4.9	-3.8	2.28	3.1
стандартное отклонение							0.16	0.02	0.1	0.1	0.12	0.16		0.25	0.2
№ 15. 30 августа, $t_0=23$ ч 44 мин 44.6 с; $\varphi = 44.67^\circ$, $\lambda = 35.24^\circ$; $h = 27$ км; $K_{II} = 7.3$															
SUDU	P	Z	31	0.07		6.0	0.56	0.39	0.42	1.39	0.04	1.2	-1.0	0.04	2.43
SUDU	S	N+E	31		0.093	3.7	1.42	0.36	1.3	4.34	0.11	0.47	0.18	0.31	2.7
X – среднее значение							0.89	0.37	0.74	2.46	0.07	0.75	-0.38	0.11	2.6
X- среднее значение							0.2	0.02	0.25	0.25	0.22	0.2		0.44	0.1
№ 16. 23 сентября, $t_0=02$ ч 53 мин 4.2 с; $\varphi = 44.53^\circ$, $\lambda = 34.59^\circ$; $h = 35$ км; $K_{II} = 9.0$															
SEV	S	N+E	72		0.07	3.3	2.77	0.43	1.54	5.12	0.16	7.66	-6.9	0.71	2.9
SUDU	P	Z	51	0.09		4.6	14.5	0.53	4.16	13.9	0.54	1.46	0.62	10.1	3.38
SUDU	S	N+E	51		0.27	2.8	8.31	0.51	2.82	9.39	0.34	2.55	-1.15	3.9	3.22
SIM	P	Z	60	0.07		4.2	6.35	0.59	1.39	4.62	0.2	3.34	-2.65	1.47	3.14
SIM	S	N+E	60		0.3	3.1	5.2	0.46	2.39	7.97	0.27	4.09	-2.89	2.07	3.08
X – среднее значение							6.43	0.5	2.27	7.55	0.28	3.3	-2.2	2.43	3.1
стандартное отклонение							0.12	0.02	0.09	0.09	0.09	0.12		0.2	0.1

Наилучшая сходимость стационарных 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 $\delta r_0 = 0.01 \div 0.02$. 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 ± 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 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\bar{\sigma}$, \bar{y} , E_u и M_w) получены для двух наиболее сильных землетрясений 13 июня (№ 7) и 16 августа (№ 10) с $K_{II} = 10.8$, произошедших в Азово-Кубанском и Керченско-Анапском районах на глубинах, соответственно, $h = 11$ км и $h = 7$ км. В целом, с ростом энергетического уровня землетрясений количественные значения динамических параметров очагов увеличивались в пределах разброса измеряемых величин. Радиационное трение $\Delta\sigma$, для всех исследованных землетрясений имело отрицательное значение, указывая на сложное скольжение разрыва в очаге за счет неравномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах. Во всем диапазоне энергий средняя величина сброшенных напряжений не превысила $\Delta\sigma = 8 \cdot 10^5$ Па (8 бар), а кажущихся напряжений $\eta\bar{\sigma} < 12 \cdot 10^5$ Па (12 бар).

Анализ стационарных определений по данным за 2015 год показал, что значения сейсмических моментов M_0 и, соответственно, моментной магнитуды M_w ,

восстановленные по записям станции «Севастополь», как по продольным, так и поперечным волнам во всех случаях получились существенно ниже, чем по записям станции «Судак» и «Симферополь». В дальнейшем предполагается на статистически значимом материале установить, являются ли эти стационарные отклонения систематическими для всех очаговых зон и глубин очагов для введения соответствующих поправок или есть технические ошибки в расчетах амплитудно-частотных характеристик регистрирующей цифровой аппаратуры на станции.

Сравнение полученных в 2015 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами [10], как и в предыдущие годы [2, 11, 12], проведено только для сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 (Рис. 4). Эти параметры определяются непосредственно по спектрам записей сейсмических колебаний на станциях регистрации, а остальные параметры вычисляются по их значениям. Для сравнения использованы зависимости $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$ [10].

$$\lg M_0 = 0.645(\pm 0.027) \cdot K_{II} + 15.142(\pm 0.271), \rho = 0.99$$

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

где: ρ – коэффициент корреляции.

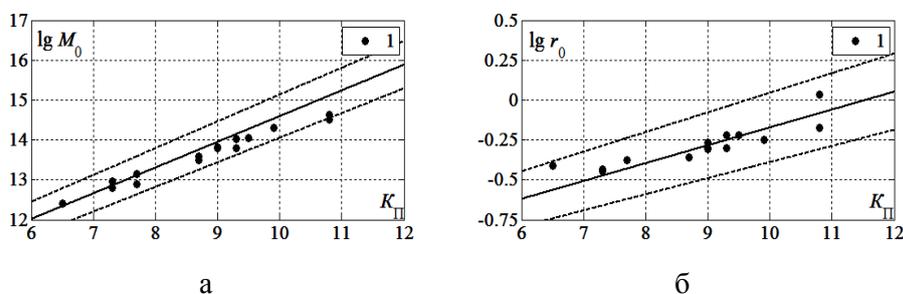


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2015 г.: *а* – сейсмического момента M_0 и *б* – радиуса круговой дислокации r_0 с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$, 1 – экспериментальные данные за 2015 г. Пунктиром обозначены пределы погрешностей долговременных зависимостей [10].

Из рисунка 4 наглядно видно, что для большинства землетрясений 2015 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 r_0 были равномерно распределены относительно регрессии $r_0(K_{II})$, а M_0 – в основном располагались ниже средней зависимости $M_0(K_{II})$. Наибольшее отличие M_0 от долговременных параметров по зависимости $M_0(K_{II})$ получены для наиболее сильных землетрясений: 13 июня (№ 7), и 16 августа (№ 10) с $K_{II} = 10.8$. Эти отклонения могут быть связаны как с участием в осреднении M_0 данных по станции «Севастополь», дающей заниженные значения M_0 , так и с возможными ошибками в

определении глубин очагов краевых зон региона ($h = 11$ км и $h = 7$ км. соответственно), влияющих на выбор скоростных моделей среды для расчета M_0 . Как следует из формулы (1), точность оценок M_0 существенно зависит от корректности задания условий модели среды в районе очага и пути распространения сейсмических волн. Так, отнесение гипоцентра к верхней части земной коры или нижней (при ошибке $\delta h = 5-10$ км) может привести к различиям в сейсмическом моменте почти в 2 раза. Кроме того, невозможно точно учесть не только многообразие физических свойств среды на пути распространения сейсмических колебаний и в верхней толще пород под станциями регистрации, но также направленности излучения без знания механизма очагов для слабых землетрясений.

Список литературы

1. Свидлова В. А., Сыкчина З. Н., Пасынков Г. Д. Оценка представительности землетрясений Крыма по материалам цифровых станций // Сейсмологический бюллетень Украины за 2009 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. С. 65–67.
2. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2014 года // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «География». 2014. Т 27 (66). № 4. С. 70–86
3. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
4. Brune I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal Geophysical Research. 1970, v.75, no. 26, pp. 4997–5009.
5. Аптекман Ж. Я., Белавина Ю. Ф., Захарова А. И., Зобин В. М., Коган С. Я., Корчагина О. А., Москвина А. Г., Поликарпова Л. А., Чепкунас Л. С. Спектры P -волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 66–79.
6. 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.
7. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
8. Кейлис-Борок В. И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Труды Геофизического Института АН СССР. 1959. № 9 (136). С. 20–42.
9. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale // Journal Geophysical Research. 1979, v. 84, no. 35, pp. 2348–2350.
10. 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.
11. Пустовитенко Б. Г., Калинин И. В., Мерзей Е. А., Пустовитенко А. А. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2012 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013. С. 11–21.
12. Пустовитенко Б. Г., Мерзей Е. А., Пустовитенко А. А., Калинин И. В. Очаговые параметры землетрясений Крыма 2013 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. С. 12–21.

**SPECTRAL AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE FOCI
OF 2015 CRIMEAN EARTHQUAKES**

Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E.

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

The spectral and dynamic source parameters ($(M_0, r_0, \Delta\sigma, \varepsilon, \eta\sigma, \Delta, \bar{u}, Eu$ и $Mw)$) of 16 Crimean earthquakes with $K_{II} = 6.5-10.8$, restored by 118 amplitude spectra of longitudinal and transverse seismic waves recorded by digital regional seismic stations have been shown. Approximation of the spectra and the source dynamic parameters calculation based on their parameters has been performed in the framework of the Brune dislocation model. The best convergence station definitions were obtained for the radius of the circular dislocation, the size of which does not explicitly depend on the orientation of the radiation energy from the source and environmental conditions under the registration station. The degree of dispersion of individual determinations r_0 for the majority of the studied earthquakes ranged $\delta r_0 = 0.01 \div 0.02$. The standard deviation of the other parameters for the majority of earthquakes less $\delta X < 0.2$. Surely determined average values of moment magnitude Mw with an error no greater than ± 0.2 , with a predominance of $\delta Mw \pm 0.1$. For estimates of the magnitude Mw is fairly high accuracy.

The highest values of dynamic parameters ($M_0, r_0, \Delta\sigma, \varepsilon, \eta\sigma, \bar{u}, Eu$ и Mw) have been obtained for the earthquakes on 13 June and 16 August with $K_{II} = 10.8$, which occurred in the Azov-Kuban and Kerch-Anapa areas at depths, respectively, $h = 11$ km and $h = 7$ km. In general, with increasing energy values of dynamic parameters of earthquake foci increased. The radiation friction $\Delta\sigma$, for all the earthquakes had a negative value, pointing to complex slide of the rupture in the source to the uneven distribution of the strength properties of depth media in the focal areas.

In the whole energy range, the average value of the released stress did not exceed $\Delta\sigma = 8 \cdot 10^5$ PA (8 bar) and perceived stress $\eta\sigma < 12 \cdot 10^5$ PA (12 bar). For most 2015 earthquakes, the average M_0 и r_0 values were within the confidence regions of long-term dependencies $M_0(K_{II}), r_0(K_{II})$. The values of r_0 were evenly distributed about the regression $r_0(K_{II})$ and M_0 is mostly located below the average according to $M_0(K_{II})$. The biggest difference of M_0 from the long-term parameters depending on the $M_0(K_{II})$ were obtained for the most strong earthquakes: June 13, and August 16 with $K_{II} = 10.8$. These deviations can be associated with participation in the M_0 data averaging of the station "Sevastopol", which gives low values of M_0 and possible errors in determining the depths of foci influencing the choice of velocity models of the environment to calculate M_0 .

Keywords: amplitude spectrum, Bruno model, spectral density, the angular frequency, seismic moment, dislocation radius, apparent stress drop, radiation friction.

References

1. Svidlova V. A., Sykchina Z. N., Pasyukov G. D. Ocenka predstavitel'nosti zemletryasenij Kryma po materialam cifrovyyh stancij (Evaluation of the Crimean earthquakes representativeness by the materials

- of the digital stations). Seismologicheskij byulleten Ukrainy za 2009 god. Sevastopol: NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2011, pp. 65–67 (in Russian).
2. Pustovitenko B. G., Ehredzhepov E. E. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2014 goda (Spectral and dynamic parameters of the foci of 2014 Crimean earthquakes). Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya «Geografiya. 2014, v. 27(66), no. 4, pp. 70–86 (in Russian).
 3. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma (Spectral and focal parameters of earthquakes of the Crimea). Kiev: Naukova dumka, 1990, pp. 251 (in Russian).
 4. Brune I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal Geophysical Research. 1970, v.75, no. 26, pp. 4997–5009 (in English).
 5. 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 *P*-voln v zadache opredeleniya dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Perekhod ot stacionnogo spektra k ochagovomu i raschet dinamicheskikh parametrov ochaga (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. 1989, no. 2, pp. 66–79 (in Russian).
 6. 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 *P*-voln v zadache opredeleniya dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Unifikaciya iskhodnyh dannyh i procedury rascheta amplitudnyh spektrov (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. 1985, no. 2, pp. 60–70 (in Russian).
 7. Kostrov B. V. Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya (Mechanics of the tectonic earthquake focus). Moscow: Nauka, 1975, 179 p. (in Russian).
 8. Kejlis-Borok V. I. Issledovanie istochnikov, priblizhenno ehkvivalentnyh ochagam zemletryasenij (Study of the sources, approximately equivalent to the foci of earthquakes). Trudy Geofizicheskogo Instituta AN SSSR. 1959, no. 9 (136), pp. 20–42 (in Russian).
 9. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale // Journal Geophysical Research. 1979, v. 84, no. 35, pp. 2348–2350 (in English).
 10. Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A., Kapitanova S. A., Porechnova E. I. Prostranstvennye osobennosti ochagovyh parametrov zemletryasenij Kryma (Spatial features of focal parameters of earthquakes in the Crimea). Sejsmichnost' Severnoj Evrazii. Obninsk: GS RAN, 2008, pp. 238–242 (in Russian).
 11. Pustovitenko B. G., Kalinyuk I. V., Merzhej E. A., Pustovitenko A. A. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2012 goda (Spectral and dynamic parameters of the foci of earthquakes of the Crimea in 2012). Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2012 god. Sevastopol: NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2013, pp. 11–21 (in Russian).
 12. Pustovitenko B. G., Merzhej E. A., Pustovitenko A. A., Kalinyuk I. V. Ochagovye parametry zemletryasenij Kryma 2013 goda (Focal parameters of earthquakes of the Crimea in 2013). Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 g. Sevastopol: NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2014, pp. 12–21 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.11.2016 г.