

УДК 550.348.435

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ

### ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2017 ГОДА

*Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э., Бондарь М. Н.*

*Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия*

*E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

Приведены спектральные и динамические параметры очагов ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\sigma$ ,  $\Delta\sigma_r$ ,  $\bar{U}$ ,  $E_U$  и  $M_w$ ) десяти землетрясений Крыма 2017 года в диапазоне энергетических классов  $K_{II} = 6.5 \div 10.9$ , восстановленные по спектрам записей продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных цифровыми региональными сейсмическими станциями. Всего получено 78 станционных амплитудных спектров, положенных в основу расчета динамических параметров очагов с использованием теоретической дислокационной модели Брюна. 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

В 2017 г. региональной сетью станций Крыма зарегистрировано 89 местных землетрясений, часть из которых относится к представительным для региона с  $K_{II} > 8.0$  [1]. Инструментальные записи сейсмических колебаний послужили основой не только определения основных параметров землетрясений (время, место, энергетический класс и магнитуда), но и дополнительных характеристик источника излучения: спектральных и динамических параметров очагов.

К динамическим параметрам очага относятся: скалярный сейсмический момент  $M_0$ , радиус круговой дислокации  $r_0$ , сброшенное напряжение  $\Delta\sigma$ , величина деформации сдвига  $\varepsilon$ , кажущееся напряжение  $\eta\sigma$ , величина радиационного трения  $\Delta\sigma_r$ , средняя подвижка по разрыву  $\bar{U}$  (или величина дислокации),  $E_U$  – энергия образования дислокации в очаге. Для восстановления этих параметров используются количественные связи, установленные между спектральными характеристиками амплитудных спектров объемных волн, зарегистрированных на сейсмических станциях и существующими теоретическими моделями источников.

В данной работе, как и в предыдущие годы [2–4], в качестве теоретического источника использована дислокационная модель Брюна [5], в рамках которой хорошо описываются экспериментальные данные по спектрам записей местных землетрясений Крыма [6].

#### 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчета спектров и определения на их основе динамических параметров очагов выбраны все наиболее значимые сейсмические события 2017 года с  $K_{II} > 9.0$ , а также более слабые толчки, произошедшие в непосредственной близости к Южному

берегу Крыма и в менее изученных районах региона: Севастопольском (№1) и Степном Крыму (№6). По такому критерию первоначально были отобраны и просмотрены сейсмограммы большинства землетрясений из этих районов по всем региональным станциям с оценкой качества записей, пригодных для расчета спектров. В результате анализа для решения обратной задачи восстановления динамических параметров очагов выбраны сейсмограммы пяти сейсмических станций («Алушта», «Севастополь», «Симферополь», «Судак», «Ялта») десяти землетрясений с энергетическими классами  $K_{II}=6.5-10.9$  (Рис. 1). Основные параметры изученных землетрясений по данным сводной обработки в Крыму приведены в таблице 1.

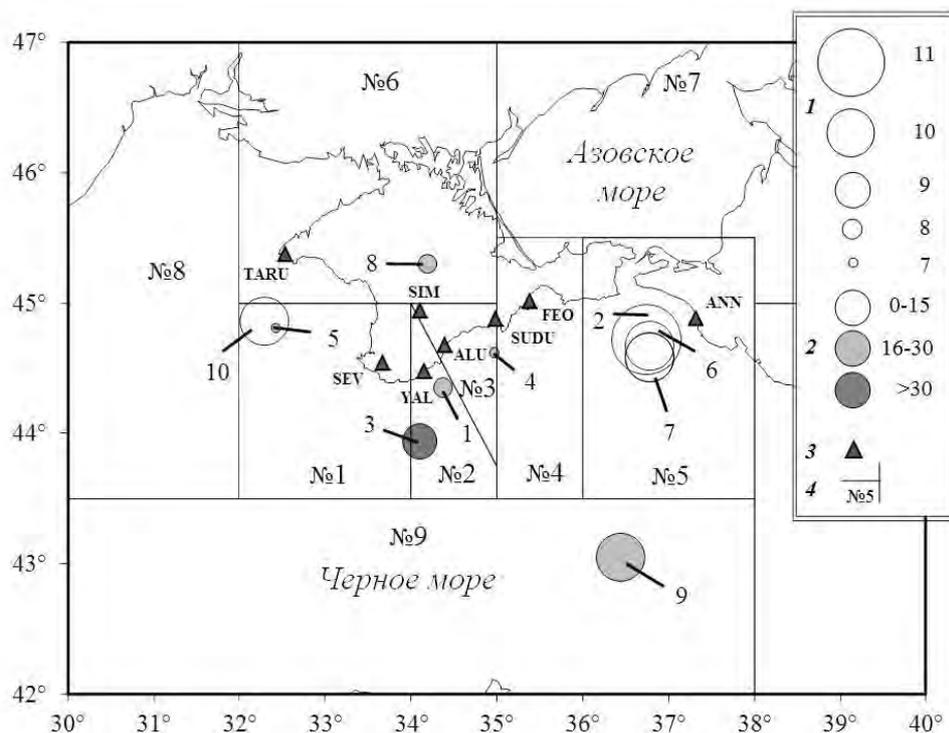


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2017 г., для которых восстановлены динамические параметры: 1 – энергетический класс  $K_{II}$  [7]; 2 – глубина очага; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница и № районов. Цифры рядом с эпицентрами – номера землетрясений в соответствии с Табл. 1.

Наибольшее количество рассмотренных землетрясений (3 события), относится к Керченско-Анапской зоне очагов (район №5), по два – к Севастопольскому и Ялтинскому (районы №1 и №2), по одному к Алуштинскому (район №3), Степному Крыму (район №6) и к Черноморской впадине (район №9).

Таблица 1.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2017 ГОДА

Основные параметры землетрясений Крыма за 2017 год,  
для которых восстановлены динамические параметры очагов

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	Эпицентр		$h$ , км	Магнитуда			$K_{II}$	Район
			$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		$M_c$	$M_w/n$ , Табл. 3	$MSH$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	27.01	19 05 25.9	44.35	34.37	29		3.0/1		8.1	Ялтинский (№ 2)
2	16.06	18 17 34.8	44.75	36.74	9	3.6	4.0/9	3.7	10.9	Керченско-Анапский (№ 5)
3	05.07	20 12 41.4	43.94	34.10	47	2.5	3.5/6	3.1	9.0	Ялтинский (№ 2)
4	09.07	20 37 12.1	44.62	34.97	24		2.5/2		6.5	Алуштинский (№ 3)
5	13.07	12 49 40.5	44.81	32.42	7		2.4/2		7.4	Севастопольский (№ 1)
6	08.08	04 08 50.5	44.68	36.77	8	3.1	3.3/8	3.4	9.9	Керченско-Анапский (№ 5)
7	08.08	05 32 20.3	44.59	36.77	5		3.4/8	3.6	10.2	Керченско-Анапский (№ 5)
8	30.08	20 24 40.9	45.30	34.19	25		2.4/3		7.7	Степной Крым (№ 6)
9	02.10	13 58 34.0	43.05	36.44	30		3.5/4	3.3	9.6	Черноморская впадина (№ 9)
10	12.11	12 58 29.2	44.86	32.29	9	2.9	3.6/5	3.4	9.8	Севастопольский (№ 1)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 даны по данным сводной обработки в Крыму; значения  $M_w/n$  – из Табл. 2

Для расчета амплитудных спектров и восстановления по ним динамических параметров очагов использовано 16 записей продольных ( $P$ ) и 62 – поперечных ( $S$ ) волн на сейсмических станциях «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU) и «Ялта» (YAL). Для этих станций в 2017 году была проведена калибровка сейсмографов и уверенно определены амплитудно-частотные характеристики.

Наибольшее количество спектров получено по записям сейсмических станций «Алушта» и «Судак». Процент участия этих же станций в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 90% и 80%. Меньше всего для анализа привлекались записи станции «Ялта» (50%), особенно для относительно слабых землетрясений. 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 ( $P$ ). Для анализа отобраны только записи 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. 2.

Как и в предыдущие годы [2–4] не использованы для анализа записи сейсмостанции «Феодосия», которая расположена на мергелистых глинах с пониженными прочностными свойствами подстилающих пород и повышенным затуханием высоких частот. Сейсмические колебания от местных землетрясений на этой станции существенно осложнены микросейсмическим шумом и не отвечают критерию выбора записей для анализа. Сейсмограммы новой станции «Тарханкут» также пока не привлечены для исследования.

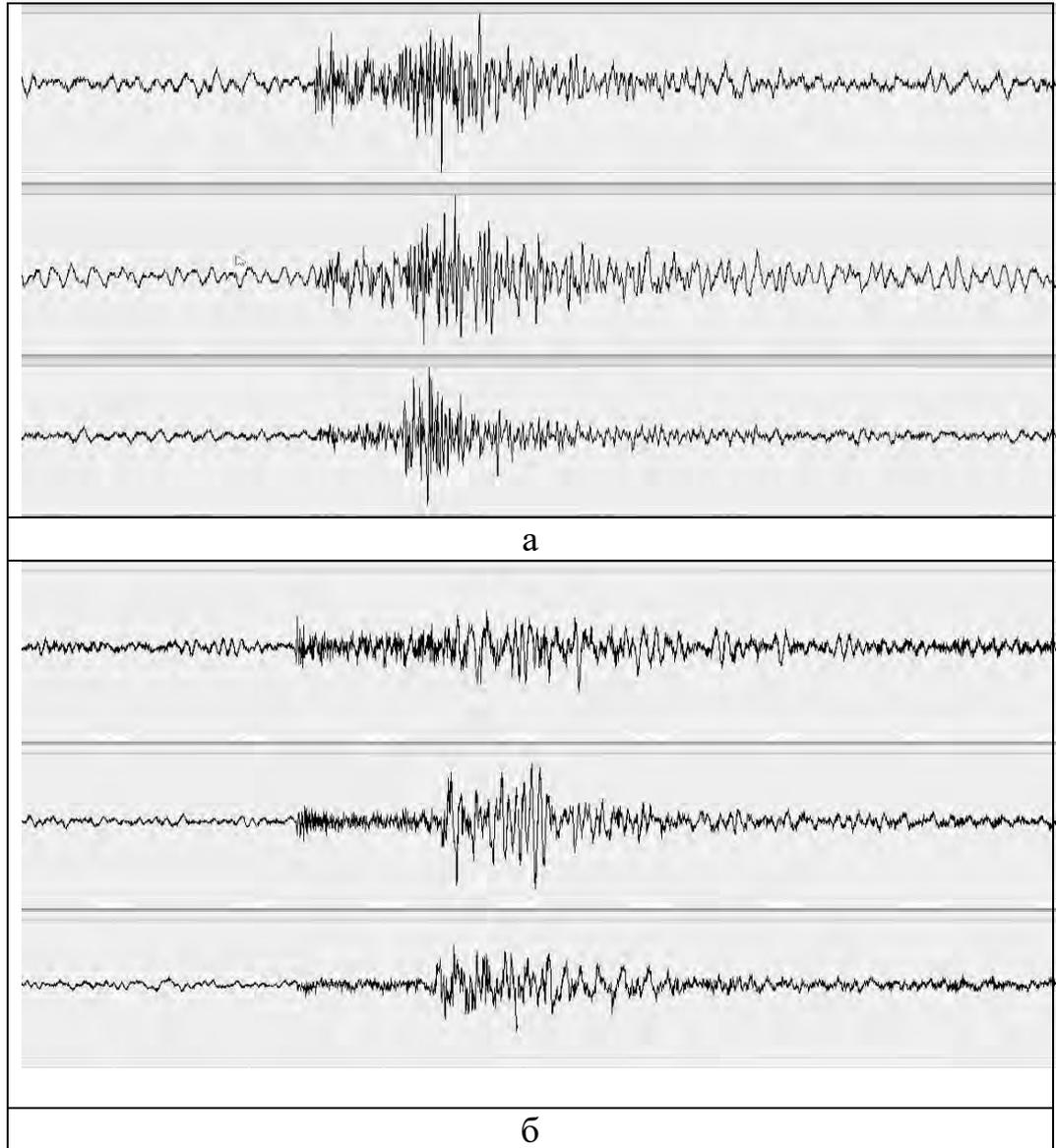


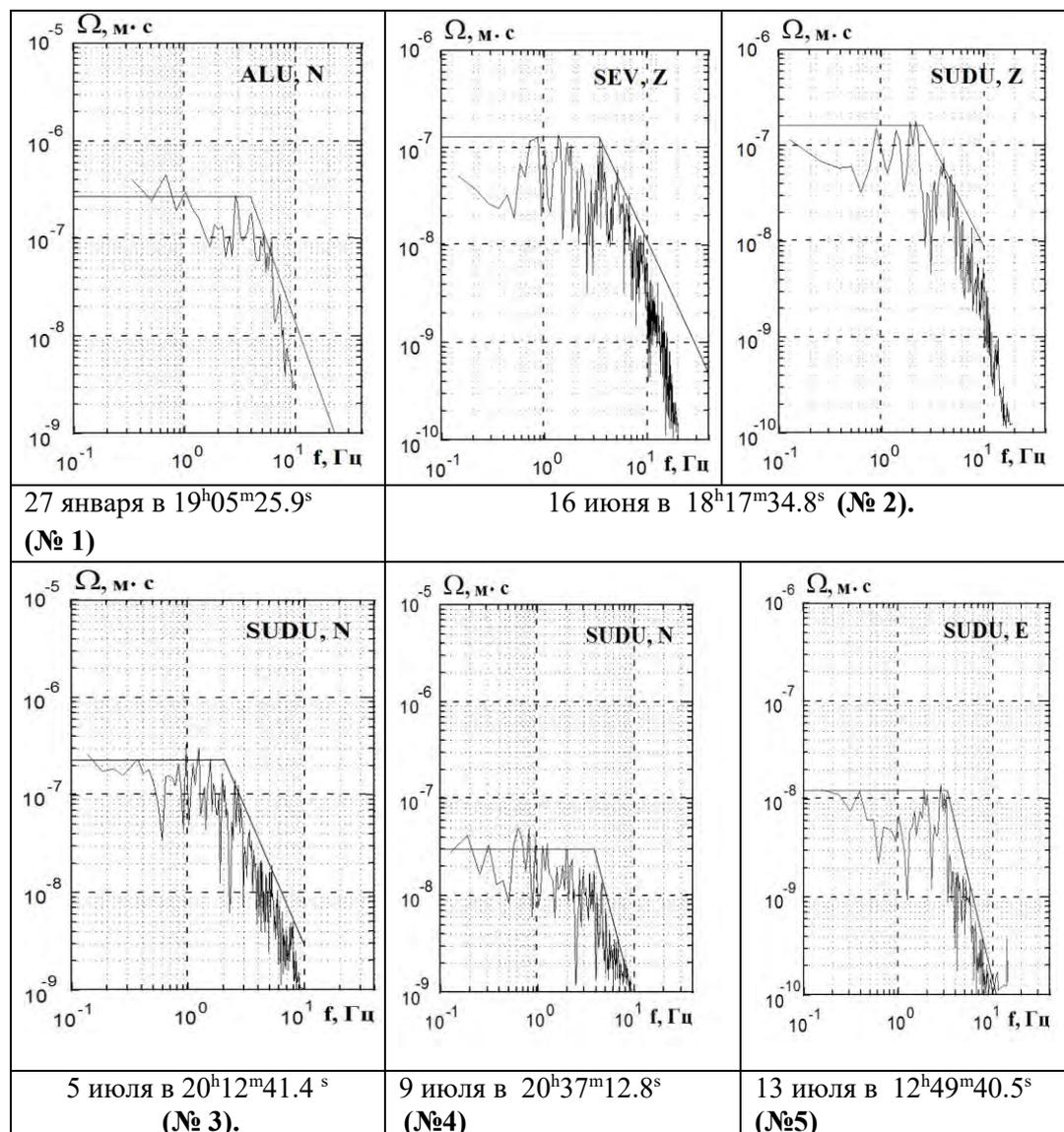
Рис. 2. Примеры записей землетрясений 2017 г. по составляющим Z, N-S, E-W (сверху вниз): *a* – 9 июля с  $K_{II} = 6.5$  (№4 по Табл. 1); *б* – 30 августа с  $K_{II} = 7.7$  (№8 по Табл. 1) соответственно на станциях «Судак»,  $\Delta=30$  км и «Симферополь»,  $\Delta=44$  км.

## 2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ

Станционные спектры поперечных волн (*S*) рассчитывались по полному вектору колебаний на двух горизонтальных компонентах (N-S) и (E-W), а продольных (*P*) – по вертикальной составляющей (*Z*). Относительная длительность

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2017 ГОДА

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  $\frac{1}{3} A_{\max}$  [6]. Спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье. Всего по записям объемных волн, отобранных для анализа десяти землетрясений, рассчитано 78 амплитудных спектров по разным типам волн и составляющим записи на сейсмограмме. Примеры спектров даны на Рис. 3.



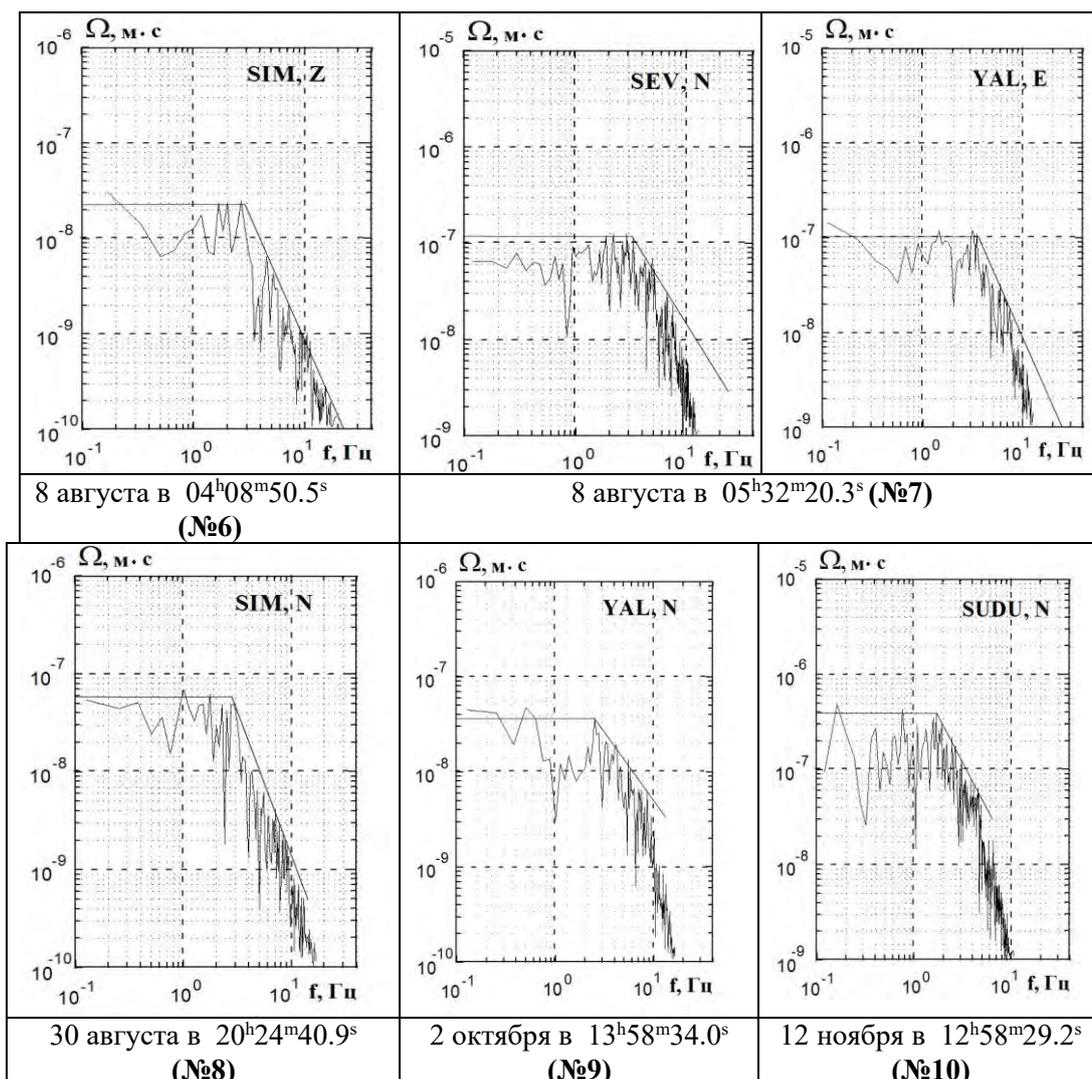


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2017 г. по записям региональных цифровых сейсмостанций и их аппроксимация в рамках теоретической модели Брюна. Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в таблице 1.

Согласно теоретической дислокационной модели Брюна ( $\omega^{-2}$ ) [5] 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  $\gamma \sim -2$ . Из приведенных примеров (Рис. 3) видно, что спектры реальных записей землетрясений Крыма за 2017 г. уверенно аппроксимируются в рамках выбранной теоретической модели ( $\omega^{-2}$ ).

### 3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА

Для восстановления очаговых параметров землетрясений в рамках дислокационной модели Брюна [5] используются две главные характеристики амплитудных спектров: спектральная плотность  $\Omega_0$ , 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  $\Omega_0$  – 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 стационарного спектра к спектру источника подробно изложена в работах [6, 8, 9] 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  $r_0$  определены средние величины напряжений в очаге: сброшенное  $\Delta\sigma$  и кажущееся  $\eta\bar{\sigma}$ , средняя подвижка по разрыву  $\bar{U}$  по формулам из работ [10, 11]:

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r_0^3} \quad \eta\bar{\sigma} = \frac{\mu \cdot E_S}{M_0} \quad \bar{U} = \frac{M_0}{\mu \cdot \pi r_0^2}$$

где  $\mu$  – модуль сдвига;  $\eta$  – сейсмический коэффициент полезного действия;  $E_S$  – энергия источника ( $\lg E_S = 11.8 + 1.5M_{LH}$ ).

Величина радиационного трения  $\Delta\sigma_r$ , связанного с шероховатостью поверхности разрыва в очаге, определяется по формуле из [10]:

$$\Delta\sigma_r = 1/2 \Delta\sigma - \eta\bar{\sigma} \quad (3)$$

Оценка энергии  $E_U$  выполнена по дислокации в очаге и сброшенному напряжению [5]:

$$E_U = \frac{1}{2} \Delta\sigma \bar{U} \cdot \pi r_0^2$$

С использованием уравнения из теории упругости, связывающего деформацию с напряжением, оценена упругая деформация сдвига в окрестности очага:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{\mu}$$

Моментная магнитуда рассчитана по индивидуальным оценкам сейсмических моментов  $M_0$  с использованием формулы Канамори [12]:

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

где  $M_0$  имеет размерность  $H \cdot m$ .

Вычисление средних значений параметров и стандартных отклонений для конкретного землетрясения выполнено по стационарным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [6]. Стационарные параметры радиационного трения  $\Delta\sigma_r$  получились отрицательными или знакопеременными, в связи с этим их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям  $\Delta\sigma$  и  $\eta\sigma$  по формуле (3). В этом случае графа «стандартное отклонение» в таблице 2 не заполнялась. Средняя величина моментной магнитуды  $M_w$  определена как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Результаты расчета стационарных и средних значений спектральных и динамических параметров очагов землетрясений за 2017 год даны в таблице 2. 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.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Количественные параметры амплитудного стационарного спектра 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 землетрясений Крыма за 2017 год использованы записи как продольных ( $P$ ), так и поперечных ( $S$ ) волн четырех региональных станций. В осреднении очаговых параметров в большинстве случаев участвовало от четырех до девяти стационарных определений. Только для одного относительно слабого сейсмического толчка (№1), с энергетическим классом  $K_{II} = 8.1$ , произошедшего в Ялтинском районе, динамические параметры рассчитаны по  $S$ -волне на ближайшей к очагу станции «Алушта».

Наилучшая сходимость стационарных определений получена для радиуса круговой дислокации ( $\delta r_0 = 0.01 \div 0.04$ ), величина которого в явном виде не зависит от направленности излучения энергии из очага и условий среды под станцией регистрации. Стандартные отклонения по другим параметрам для большинства землетрясений  $\delta X < 0.2$ . Наибольший разброс стационарных определений, отмечен для слабого сейсмического события ( $K_{II} = 7.7$ ), произошедшего 30.08.2017 г. в районе Степного Крыма (№8). Вероятно, это связано с разной направленностью очагового излучения  $R_{\theta\phi}$  (формула 1) разных типов волн на станцию регистрации «Алушта». Так значения сейсмического момента  $M_0$  по спектрам  $P$ - и  $S$ -волн получились

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2017 ГОДА**

различающимися на порядок (Табл. 2), что при близких значениях радиуса круговой дислокации  $r_0$  повлекло за собой к разбросу данных по другим динамическим параметрам на порядок и более.

Таблица 2.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2017 год

Станция	Волна	Составляющая	$\Delta$ , 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	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\dot{y} \cdot 10^{-2}$ , м	$\eta \sigma \cdot 10^5$ , Па	$\Delta \sigma_r \cdot 10^5$ , Па	$E_{\text{в}} \cdot 10^8$ , Дж	$M_w^*$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>№ 1. 27 января, <math>t_0=19</math> ч 05 мин 25.9 с; <math>\varphi = 44.35^\circ</math>, <math>\lambda = 34.37^\circ</math>; <math>h = 29</math> км; <math>K_{\text{п}}=8.1</math></b>															
ALU	S	N+E	37		0.32	3.85	4.59	0.37	4.04	13.5	0.36	0.83	1.2	3.1	3.0
<b>№ 2. 16 июня, <math>t_0=18</math> ч 17 мин 34.8 с; <math>\varphi = 44.72^\circ</math>, <math>\lambda = 36.14^\circ</math>; <math>h = 9</math> км; <math>K_{\text{п}}=10.9</math></b>															
ALU	S	E	185		1.8	1.5	263	0.89	16.1	53.8	3.5	2.55	5.51	708	4.22
SEV	P	Z	243	0.12		2.4	116	0.74	12.3	41	2.22	5.79	0.36	238	3.98
SEV-1	S	N+E	243		0.56	1.68	117	0.8	10.1	33.6	1.95	5.74	0.7	196	3.98
SEV	S	N+E	243		0.8	1.6	176	0.84	12.4	41.4	2.53	4.02	0.22	346	4.09
SUDU	P	Z	139	0.18		2.4	102	0.93	5.51	18.4	1.24	6.61	-3.86	93.2	3.94
YAL	P	Z	206	0.1		2.45	84.6	0.91	4.9	16.3	1.08	7.93	<b>-5.5</b>	68.9	3.89
YAL	S	N+E	206		0.54	1.6	98.7	0.84	7.34	24.5	1.49	6.8	<b>-3.13</b>	121	3.93
SIM	P	Z	208	0.12		2.41	102	0.93	5.51	18.4	1.24	6.61	-3.86	93.2	3.94
SIM	S	N+E	208		0.54	1.6	98.7	0.84	7.34	24.5	1.49	6.8	<b>-3.13</b>	121	3.93
X- среднее значение							<b>120.56</b>	<b>0.86</b>	<b>8.36</b>	<b>27.88</b>	<b>1.73</b>	<b>5.6</b>	<b>-1.42</b>	<b>166.8</b>	<b>3.99</b>
стандартное отклонение							<b>0.05</b>	<b>0.01</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>		<b>0.11</b>	<b>0.07</b>
<b>№ 3. 5 июля, <math>t_0=20</math> ч 12 мин 41.4 с; <math>\varphi = 43.94^\circ</math>, <math>\lambda = 34.10^\circ</math>; <math>h = 47</math> км; <math>K_{\text{п}}=9.0</math></b>															
ALU	P	Z	86	0.02		3.1	7.38	0.99	0.34	56.3	0.04	5.76	-5.59	0.21	3.18
ALU	S	N+E	86		0.91	2.17	51.9	0.76	5.27	8.78	0.48	0.82	1.82	22.8	3.75
SEV	S	N+E	75		0.14	2.15	10.9	0.76	1.08	1.79	0.1	3.9	-3.37	0.97	3.29
SUDU	P	Z	127	0.05		3.0	37.7	1.02	1.56	2.61	0.2	1.13	-0.34	4.95	3.65
SUDU	S	N+E	127		0.32	2.2	37.3	0.74	3.95	6.58	0.36	1.14	0.84	12.3	3.65
YAL	S	N+E	61		0.34	2.2	19.0	0.74	2.01	3.35	0.2	2.24	-1.23	3.18	3.46
X- среднее значение							<b>21.94</b>	<b>0.83</b>	<b>1.7</b>	<b>6.09</b>	<b>0.17</b>	<b>1.94</b>	<b>-1.09</b>	<b>3.11</b>	<b>3.5</b>
стандартное отклонение							<b>0.14</b>	<b>0.03</b>	<b>0.17</b>	<b>0.22</b>	<b>0.16</b>	<b>0.14</b>		<b>0.3</b>	<b>0.19</b>
<b>№ 4. 9 июля, <math>t_0=20</math> ч 37 мин 12.1 с; <math>\varphi = 44.62^\circ</math>, <math>\lambda = 34.97^\circ</math>; <math>h = 24</math> км; <math>K_{\text{п}}=6.5</math></b>															
ALU	S	N+E	46		0.03	3.6	0.61	0.37	0.52	1.73	0.05	0.27	-0.015	0.053	2.46
SUDU	S	N	30		0.05	3.8	0.76	0.35	0.76	2.53	0.065	0.22	0.15	0.096	2.52
X- среднее значение							<b>0.68</b>	<b>0.36</b>	<b>0.63</b>	<b>2.1</b>	<b>0.06</b>	<b>0.24</b>	<b>0.08</b>	<b>0.07</b>	<b>2.49</b>
стандартное отклонение							<b>0.05</b>	<b>0.01</b>	<b>0.08</b>	<b>0.08</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>		<b>0.13</b>	<b>0.03</b>
<b>№ 5. 13 июля, <math>t_0=12</math> ч 49 мин 40.5 с; <math>\varphi = 44.81^\circ</math>, <math>\lambda = 32.42^\circ</math>; <math>h = 7</math> км; <math>K_{\text{п}}=7.4</math></b>															
SEV	S	N+E	104		0.012	3.1	0.35	0.38	0.27	0.88	0.025	2.75	-2.62	0.015	2.3
SUDU	S	N+E	203		0.015	3.15	0.84	0.32	0.68	2.26	0.062	1.13	-0.79	0.095	2.55

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
							S	N+E	187		0.45	2.2			
X- среднее значение							<b>0.54</b>	<b>0.35</b>	<b>0.43</b>	<b>1.41</b>	<b>0.04</b>	<b>1.76</b>	<b>-1.55</b>	<b>0.04</b>	<b>2.42</b>
стандартное отклонение							<b>0.19</b>	<b>0.04</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.19</b>		<b>0.4</b>	<b>0.12</b>
<b>№ 6. 8 августа, <math>t_0=04</math> ч 08 мин 50.5 с; <math>\varphi = 44.68^\circ</math>, <math>\lambda = 36. 77^\circ</math>; <math>h = 8</math> км; <math>K_{п} = 9.9</math></b>															
ALU	S	N+E	187		0.45	2.2	32.9	0.61	6.36	21.2	0.94	2.57	0.61	34.9	3.61
SEV	P	Z	245	0.02		4.0	10.0	0.58	2.23	7.42	0.31	8.44	-7.32	3.72	3.27
SEV	S	N+E	245		0.14	2.3	13.4	0.58	2.96	9.87	0.42	6.31	-4.83	6.62	3.35
SIM	P	Z	211	0.025		3.1	10.8	0.75	1.12	3.73	0.2	7.81	-7.25	2.02	3.29
SIM	S	N+E	211		0.14	2.1	11.6	0.64	1.95	6.49	0.3	7.3	-6.3	3.76	3.31
SUDU	P	Z	141	0.02		4.0	5.79	0.58	1.28	4.28	0.18	14.6	-14.0	1.24	3.11
SUDU	S	N+E	141		0.4	2.2	22.1	0.61	4.27	14.2	0.63	3.82	-1.69	15.8	3.5
YAL	S	N+E	208		0.09	2.9	9.77	0.46	4.33	14.4	0.48	8.66	-6.5	7.04	3.26
X- среднее значение							<b>12.73</b>	<b>0.6</b>	<b>2.61</b>	<b>8.7</b>	<b>0.38</b>	<b>6.64</b>	<b>-5.34</b>	<b>5.55</b>	<b>3.34</b>
стандартное отклонение							<b>0.08</b>	<b>0.02</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	<b>0.08</b>		<b>0.17</b>	<b>0.11</b>
<b>№ 7. 8 августа, <math>t_0=05</math> ч 32 мин 20.3 с; <math>\varphi = 44.59^\circ</math>, <math>\lambda = 36. 77^\circ</math>; <math>h = 5</math> км; <math>K_{п} = 10.2</math></b>															
ALU	S	N+E	188		0.5	2.8	31.0	0.45	14.7	48.9	1.61	5.44	1.89	75.7	3.6
SEV	P	Z	245	0.03		3.95	13.4	0.57	3.23	10.8	0.44	12.6	-11.0	7.19	3.35
SEV	S	N+E	245		0.16	3.0	13.0	0.42	7.54	25.1	0.77	13.0	-9.24	16.3	3.35
SIM	S	N+E	214		0.16	2.75	11.3	0.46	5.08	16.9	0.57	14.9	-12.4	9.58	3.31
SUDU	P	Z	144	0.05		4.05	13.1	0.55	3.41	11.4	0.46	12.9	-11.2	7.45	3.35
SUDU	S	N+E	144		0.43	2.8	20.5	0.45	9.7	32.3	1.06	8.23	-3.38	33.1	3.48
YAL	P	Z	208	0.02		0.04	7.54	0.55	1.96	6.54	0.26	22.4	-21.4	2.47	3.19
YAL	S	N+E	208		0.15	3.0	10.3	0.42	5.99	20.0	0.61	16.4	-13.4	10.6	3.28
X- среднее значение							<b>13.74</b>	<b>0.48</b>	<b>5.38</b>	<b>17.95</b>	<b>0.63</b>	<b>12.28</b>	<b>-9.59</b>	<b>12.37</b>	<b>3.36</b>
стандартное отклонение							<b>0.07</b>	<b>0.02</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.09</b>	<b>0.07</b>		<b>0.16</b>	<b>0.06</b>
<b>№ 8. 30 августа, <math>t_0=20</math> ч 24 мин 40.9 с; <math>\varphi = 45.30^\circ</math>, <math>\lambda = 34.19^\circ</math>; <math>h = 25</math> км; <math>K_{п} = 7.7</math></b>															
ALU	P	Z	75	0.0012		5.8	0.13	0.4	0.08	0.29	0.01	10.5	-10.5	0.02	2.01
ALU	S	N+E	75		0.07	3.1	1.42	0.43	0.77	2.56	0.08	0.09	-0.06	0.18	2.7
SIM	S	N+E	44		0.09	3.05	0.9	0.44	0.46	1.55	0.05	1.49	-1.26	0.07	2.57
X- среднее значение							<b>0.55</b>	<b>0.42</b>	<b>0.3</b>	<b>1.05</b>	<b>0.03</b>	<b>1.12</b>	<b>-0.97</b>	<b>0.06</b>	<b>2.43</b>
стандартное отклонение							<b>0.32</b>	<b>0.01</b>	<b>0.3</b>	<b>0.29</b>	<b>0.27</b>	<b>0.6</b>		<b>0.28</b>	<b>0.28</b>
<b>№ 9. 2 октября, <math>t_0=13</math> ч 58 мин 34.0 с; <math>\varphi = 43.05^\circ</math>, <math>\lambda = 36.44^\circ</math>; <math>h = 30</math> км; <math>K_{п} = 9.6</math></b>															
ALU	P	Z	245	0.01		3.0	12.1	0.82	0.96	3.2	0.19	4.96	-4.48	1.93	3.33
YAL	S	N	244		0.056	2.3	12.9	0.62	2.42	8.08	0.36	4.64	-3.43	5.21	3.34
SUDU	S	N+E	236		0.18	2.0	39.8	0.71	4.92	16.4	0.84	1.5	0.95	32.6	3.67
SIM	S	N+E	282		0.085	2.1	22.5	0.67	3.21	10.7	0.53	2.67	-1.06	12.0	3.5
X- среднее значение							<b>19.34</b>	<b>0.7</b>	<b>2.46</b>	<b>8.21</b>	<b>0.42</b>	<b>3.1</b>	<b>-1.87</b>	<b>7.92</b>	<b>3.46</b>
стандартное отклонение							<b>0.12</b>	<b>0.03</b>	<b>0.15</b>	<b>0.15</b>	<b>0.14</b>	<b>0.12</b>		<b>0.26</b>	<b>0.15</b>
<b>№ 10. 12 ноября, <math>t_0=12</math> ч 58 мин 29.2 с; <math>\varphi = 44.86^\circ</math>, <math>\lambda = 32.29^\circ</math>; <math>h = 9</math> км; <math>K_{п} = 9.8</math></b>															
ALU	S	N+E	168		0.71	2.1	32.8	0.57	7.85	26.2	1.08	2.58	1.34	42.9	3.61
SEV	S	N+E	115		0.56	2.3	18.1	0.52	5.7	19.0	0.72	4.87	-1.95	17.2	3.44
SIM	S	N+E	144		0.7	1.9	28.0	0.63	4.97	16.6	0.76	3.02	-0.5	23.2	3.57
SUDU	P	Z	213	0.1		3.3	38.7	0.68	5.45	18.2	0.89	2.19	0.5	35.2	3.66
SUDU	S	N+E	213		0.7	1.9	28.0	0.63	4.97	16.6	0.76	3.02	-0.53	23.2	3.57
X- среднее значение							<b>28.26</b>	<b>0.06</b>	<b>5.7</b>	<b>19.03</b>	<b>0.83</b>	<b>3.02</b>	<b>-0.17</b>	<b>26.86</b>	<b>3.48</b>
стандартное отклонение							<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>	<b>0.06</b>		<b>0.07</b>	<b>0.15</b>

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2017 ГОДА

Наибольшие значения динамических параметров ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\sigma$ ,  $\bar{u}$ ,  $E_u$  и  $M_w$ ) получены для землетрясения 16 июня с  $K_{II} = 10.9$ , произошедшего в восточной части региона (район 5) на глубине  $h = 9$  км (№2), а наименьшие – для слабых толчков 9 июля с  $K_{II} = 6.5$  (№4) и 30 августа с  $K_{II} = 7.7$  (№8). В целом, с ростом энергетического уровня землетрясений количественные значения динамических параметров очагов увеличивались в пределах разброса измеряемых величин. Радиационное трение  $\Delta\sigma_r$  для 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  $\eta\sigma < 13 \cdot 10^5$  Па (13 бар).

Анализ индивидуальных станционных определений по данным за 2017 год показал, что значения сейсмических моментов  $M_0$  и, соответственно, моментной магнитуды  $M_w$ , восстановленные по записям продольных волн  $P$  в большинстве случаев получились существенно ниже, чем по записям поперечных  $S$ : среднее по всем станциям значение отношений  $k = M_0 S / M_0 P$  получилось равным 2.5 при максимальном  $k = 11$  по данным станции «Алушта» для очага землетрясения №8.

Сравнение полученных в 2017 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами [13], как и в предыдущие годы [2–4], проведено только для сейсмического момента  $M_0$  и радиуса круговой дислокации  $r_0$  (Рис. 4). Эти параметры определяются непосредственно по характеристикам спектров записей сейсмических колебаний на станциях регистрации по формулам 1 и 2, а остальные параметры вычисляются по их значениям. Для сравнения использованы зависимости  $M_0(K_{II})$  и  $r_0(K_{II})$  из [13]:

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

где  $\rho$  – коэффициент корреляции.

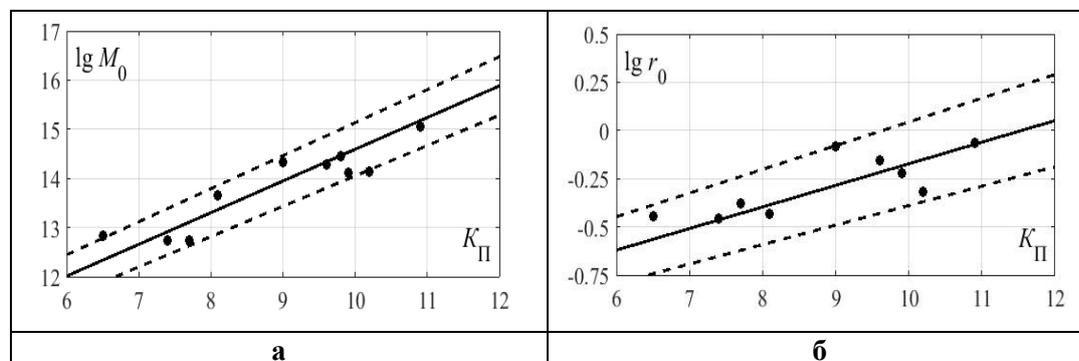


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2017 г.: а – сейсмического момента  $M_0$ ; б – радиуса круговой дислокации  $r_0$  с долговременными зависимостями  $M_0(K_{II})$  и  $r_0(K_{II})$  [13]. Пунктиром обозначены пределы погрешностей долговременных зависимостей.

Полученные в 2017 г. средние значения сейсмических моментов и радиусов круговой дислокации (Рис. 4) попадают в доверительный интервал средних долговременных параметров. Наибольшее отличие от средней аппроксимирующей прямой  $M_0(K_{II})$  отмечено для землетрясений 9 июля (№4) с  $K_{II} = 6.5$  и №7 с  $K_{II} = 10.2$ . В первом случае  $M_0$  получилось завышенным, а во втором – заниженным.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам сейсмического мониторинга в 2017 г, база данных по очаговым параметрам местных землетрясений Крыма дополнена 47 станционными определениями для 10 сейсмических событий в диапазоне энергетических классов  $K_{II}=6.5\div 10.9$ , произошедших в различных районах региона на эпицентральных расстояниях от 30 км до 245 км от станций регистрации. Для достоверных оценок спектральных и динамических параметров очагов землетрясений за 2017 год были использованы четкие записи объемных сейсмических волн, не осложненные микросейсмическими помехами на сейсмических станциях с надежными амплитудно-частотными характеристиками регистрирующей аппаратуры. Средние значения динамических параметров очагов в большинстве случаев оценены по группе станций и по разным типам волн, что обеспечило в основном малую величину показателя степени рассеяния индивидуальных оценок. В этой связи, количественные оценки очаговых параметров землетрясений за 2017 год можно отнести к категории надежных для дальнейшего их использования в научных и научно-прикладных задачах, в том числе при моделировании прогнозных сейсмических воздействий в соответствии с методикой [14, 15].

## **Список литературы**

1. Свидлова В. А., Сыччина З. Н., Бондарь М. Н., Бойко В. А. Сейсмичность Крыма в 2016 году // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. Серия «География. Геология». 2016. Том 3(69). N4. С. 7–50.
2. Пустовитенко Б. Г., Мержей 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.
3. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Спектральные и динамические параметры землетрясений Крыма 2015 года // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского; серия «География. Геология». 2016. Том 2(68). N4. 2016. С. 53–68.
4. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона 2016 года // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского; серия «География. Геология». 2017. Том 3(69). N4. С. 51–69.
5. 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.
6. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
7. 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.

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2017 ГОДА

8. 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. N2. С. 66–79.
9. 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. N2. С. 60–70.
10. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
11. Кейлис-Борок В. И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Труды Геофизического Института АН СССР. 1959. N9(136). С. 20–42.
12. Hanks Т. С., Kanamori Н. А. Moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 1979, v. 84, no. 35, pp. 2348–2350.
13. 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.
14. 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. N6. С. 20–23.
15. Пустовитенко Б. Г., Мержей Е. А. К прогнозу ожидаемых сейсмических воздействий от сильных землетрясений Крыма // Доповіді Національної Академії Наук України. 2014. N5. С.102–109.

## SPECTRAL AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE FOCI OF 2017 CRIMEAN EARTHQUAKES

*Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., Bondar M. N.*

*Institute of seismology and geodynamics FSAEI HE «Of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University», Simferopol, Republic of Crimea, Russia  
E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

The spectral and dynamic parameters of foci ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\sigma$ ,  $\Delta\sigma_r$ ,  $\bar{u}$ ,  $Eu$  and  $Mw$ ) of ten 2017 Crimea earthquakes in the range of energy classes  $K_{II}=6.5\div 10.9$  are given. Focal parameters reconstructed from the recordings of longitudinal ( $P$ ) and transverse ( $S$ ) seismic wave records recorded by digital regional seismic stations: «Alushta» (ALU), «Sevastopol» (SEV), «Simferopol» (SIM), «Sudak» (SUDU), «Yalta» (YAL). A total of 78 station amplitude spectra were calculated. To approximate the spectra and calculate the dynamic parameters of the foci, the Brune dislocation model ( $\omega^{-2}$ ) was used.

For reliable estimates of the average values of the focal parameters of each earthquake, in most cases, from four to nine station definitions are used. Only for one relatively weak seismic shock on January 27 with the energy class  $K_{II} = 8.1$ , which occurred in the Yalta zone, the dynamic parameters are calculated using the  $S$ -wave at the closest to the source of the «Alushta» station.

The average values of seismic moments  $M_0$  and radii of circular dislocations  $r_0$  obtained in 2017 corresponded to confidence intervals of average long-term parameters. The greatest difference from the average approximating straight line  $M_0(K_{II})$  was observed for

earthquakes on July 9 with  $K_{II} = 6.5$  and on August 8 with  $K_{II} = 10.2$ . In the first case,  $M_0$  turned out to be overestimated, and in the second – underestimated.

The largest values of dynamic parameters ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\sigma$ ,  $\bar{u}$ ,  $Eu$  and  $Mw$ ) were obtained for the June 16 earthquake with  $K_{II} = 10.9$ , which occurred in the eastern part of the region at a depth of  $h = 9$  km, and the smallest – for weak shocks on July 9 with  $K_{II} = 6.5$  and on August 30 with  $K_{II} = 7.7$ . In general, with an increase in the energy level of earthquakes, the quantitative values of the dynamic parameters of foci increased within the range of measured values. Radiation friction  $\Delta\sigma_r$  for the studied earthquakes had a negative value, indicating a complex slip of the gap in the source due to the uneven distribution of the strength properties of the deep environment in the source zones. In the whole energy range, the average value of the stress drop did not exceed  $\Delta\sigma = 8 \cdot 10^5$  Pa (8 bar), and the apparent stresses  $\eta\sigma < 13 \cdot 10^5$  Pa (13 bar).

Analysis of individual station definitions from the data for 2017 showed that the values of the seismic moments  $M_0$  and the moment magnitude  $Mw$  from the records of longitudinal waves  $P$  in most cases turned out to be significantly less than from the records of transverse  $S$ -waves: the mean value of the ratios  $k = M_0S / M_0P$  for all stations, it turned out to be 2.5 with a maximum  $k = 11$  according to the «Alushta» station data for the earthquake focus of August 30 with a  $K_{II} = 7.7$ .

**Keywords:** amplitude spectrum, Brune model, spectral density, the angular frequency, seismic moment, radius of dislocation, stress drop, displacement along a discontinuity, radiation friction.

## 1. References

2. Svidlova V. A., Sykchina Z. N., Bondar' M. N., Bojko V. A. Sejsmichnost' Kryma v 2016 godu // Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2017, T. 3(69), no. 4, pp. 7–50 (in Russian).
3. Pustovitenko B. G., Merzhej E. A., Pustovitenko A. A., Kalinyuk I. V. Ochagovye parametry zemletryasenij Kryma 2013 goda // Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 g. Sevastopol': NPC «EHKOSI Gidrofizika». 2014, pp. 12–21 (in Russian).
4. Pustovitenko B. G., Ehredzhepov E. E. Spektral'nye i dinamicheskie parametry zemletryasenij Kryma 2015 goda // Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2016. T. 2(68), no. 4, 2016, pp. 53–68 (in Russian).
5. Pustovitenko B. G., Ehredzhepov E. E. Ochagovye parametry zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona 2016 goda // Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2017. T. 3(69), no. 4. pp. 51–69 (in Russian).
6. 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).
7. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma. Kiev: Naukova dumka, 1990. 251 p. (in Russian).
8. Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E. Ob ehnergeticheskoy ocenke zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona // Magnituda i ehnergeticheskaya klassifikaciya zemletryasenij. M.: IFZ AN SSSR. 1974. T. 2, pp. 113–125 (in Russian).
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  $P$ -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).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2017 ГОДА

---

10. Aptekman Zh. Ya., Daragan S. K., Dolgopolov V. V., Zaharova A. I., Zobin V. M., Kogan S. Ya., Korzhagina 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 // *Vulkanologiya i seismologiya*. 1985, no. 2, pp. 60–70 (in Russian).
11. Kostrov B. V. *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya*. M.: Nauka, 1975. 179 p. (in Russian).
12. Kejlis-Borok V. I. Issledovanie istochnikov, priblizhenno ehkvivalentnyh ochagam zemletryasenij // *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 zemletryasenij Kryma. *Seismichnost' Severnoj Evrazii*. Obninsk: GS RAN. 2008, pp. 238–242 (in Russian).
15. Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E., Kalinyuk I. V., Merzhej E. A. Sravnitel'nye karakteristiki akselerogramm, smodelirovannyh dlya raznyh sejmotektonicheskikh uslovij // *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2012, no. 6, pp. 20–23 (in Russian).
16. Pustovitenko B. G., Merzhej E. A. K prognozu ozhidaemyh sejsmicheskikh vozdeystvij ot sil'nyh zemletryasenij Kryma // *Dopovidi Nacional'noi Akademii Nauk Ukraïni*. 2014, no. 5, pp. 102–109 (in Russian).