География. Геология. Том 6 (72). № 4. 2020 г. С. 67-85.

#### УДК 550.348.435

# СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2019 ГОДА

Пустовитенко Б. Г.<sup>1</sup>, Эреджепов Э. Э.<sup>1, 2</sup>, Бондарь М. Н.<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», Симферополь, Республика Крым, Россия. <sup>2</sup>Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия.

E-mail: bpustovitenko@mail.ru

Приведены результаты расчета и анализа спектральных и динамических параметров очагов ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta \sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $\eta \sigma$ ,  $\Delta \sigma_r$ ,  $\tilde{u}$ , Eu и Mw) 15 землетрясений Крыма 2019 года в диапазоне энергетических классов  $K_{\Pi} = 5.8-10.0$ . Динамические параметры очагов восстановлены по амплитудным спектрам записей продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных семью цифровыми региональными сейсмическими станциями. Использовано 86 станционных амплитудных спектров, положенных в основу определения динамических параметров очагов с использованием теоретической дислокационной модели Бруна. Спектральные свойства очагов 10 землетрясений рассмотрены также по энергетическим спектрам записей на станции «Алушта». Дается анализ полученных результатов. Ключевые слова: амплитудный спектр, модель Бруна, спектральная плотность, угловая частота, сейсмический момент, радиус дислокации, сброшенное и кажущееся напряжения, подвижка по разрыву, радиационное трение, энергетический спектр.

#### введение

Современная сеть сейсмических станций Крыма, оснащенных цифровыми регистраторами, позволяет более оперативно проводить спектральный анализ волновых форм землетрясений. В то же время, сейсмические колебания на станциях осложнены различными помехами (шумами), имеющими как природный, так и приборный генезис. Для исключения помех и выделения полезного (сейсмического) сигнала используются различные фильтры, корректность применения которых не всегда очевидна, особенно при слабой записи. В этой связи расчет спектров Фурье сейсмических колебаний и восстановления по ним динамических параметров очагов ежегодно проводится только для ограниченного числа зарегистрированных землетрясений. Кроме жестких условий отбора волновых форм для анализа, необходимы также надежные данные об амплитудно-частотных и фазовых характеристиках сейсмографов.

Крымско-Черноморский регион в 2019 году характеризовался относительно слабой сейсмичностью, как по выделенной сейсмической энергии, так и количеству представительных землетрясений. Для исследований отобрано 14 землетрясений в диапазоне энергетических классов КП = 5.8–10.0, что составляет 16% от всех зарегистрированных за год сейсмических событий в диапазоне КП = 4.4–10.0.

#### 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчета амплитудных спектров Фурье и определения на их основе динамических параметров очагов выбраны записи наиболее значимых представительных землетрясений 2019 года с  $K_{\Pi} > 9.0$ , а также более слабых

толчков с  $K_{\Pi} = 5.8-7.1$ . Эти слабые землетрясения произошли на материковой части и вблизи Южного берега Крыма с отчетливыми волновыми формами объемных волн на ближайших станциях: ALU, YAL, SEV с эпицентральными расстояниями  $\Delta = 8-32 \ \kappa m$  (Рис. 1). Основные параметры землетрясений 2019 г., для которых исследованы спектральные и динамические параметры очагов приведены в таблице 1 по данным сводной обработки в Крыму.





Наибольшее количество изученных землетрясений (5 событий), произошло в Алуштинской зоне очагов (район № 3), по два — в Ялтинской, Судакско-Феодосийской и Черноморской впадине (районы № 2, 4 и 9), по одному — в Севастопольской, Керченско-Анапской и Северо-Западной (районы № 1, 5 и 8).

По записям объемных волн на семи сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Тарханкут» (TARU) и «Донузлав-2» (DNZ2) рассчитано 86 амплитудных спектров: 24 для продольных (*P*) и 62 для поперечных (*S*) волн. Как и в предыдущие годы [2–4] не использованы для анализа записи сейсмостанций «Феодосия» (FEO) и «Керчь» (KERU), волновые формы на которых не отвечают критерию надежности и высокого качества исходных данных для расчета спектров.

# Таблица 1.

	Пата		Эпин	центр	1.	N	Лагнитуд	1a		
№	дата, д м	1 <sub>0</sub> , ч мин с	φ°, N	λ°, E	п, км	Mc	<i>М</i> w/n, табл. 4	MLws g	$K_{\Pi}$	Район
1	3.01	18 29 16.0	44.63	34.69	16		2.5/2		6.4	Алуштинский (№ 3)
2	5.01	14 50 52.0	44.61	34.66	15		2.0/2		5.8	Алуштинский (№ 3)
3	11.01	19 00 14.3	44.63	34.63	13		2.5/1		6.5	Алуштинский (№ 3)
4	12.01	23 21 54.0	44.66	35.34	25		3.2/6	3.2	9.9	Судакско- Феодосийский (№ 4)
5	26.01	02 59 55.8	44.77	34.37	19		1.9/2		6.0	Алуштинский (№ 3)
6	29.01	19 40 00.9	44.60	36.98	11		2.9/2	2.8	9.0	Керченско-Анапский (№ 5)
7	13.02	12 37 49.9	44.77	34.40	20		2.4/1		6.2	Алуштинский (№ 3)
8	19.02	10 43 52.0	43.14	35.22	44	2.8	3.5/3	3.0	9.7	Черноморская впадина (№ 9)
9	7.03	06 27 02.7	44.46	34.06	7		2.1/3		7.1	Ялтинский (№ 2)
10	6.04	08 01 11.3	44.66	35.49	35	3.1	3.3/7		9.9	Судакско- Феодосийский (№ 4)
11	8.05	19 51 29.8	43.11	31.66	50	3.4	3.7/6	3.6	10.0	Черноморская впадина (№ 9)
12	23.05	20 48 56.3	44.56	35.73	24		2.8/4		7.7	Судакско- Феодосийский (№ 4)
13	4.08	15 25 49.3	44.41	33.48	28		2.2/1		7.1	Севастопольский (№ 1)
14	23.09	08 56 56.8	44.11	34.21	35	2.5	3.2/8	2.6	9.5	Ялтинский (№ 2)
15	4.12	09 43 29.3	44.06	30.32	46	3.4	3.8/6	3.7	10.0	Северо-Западный (№ 8)

## Основные параметры землетрясений Крыма за 2019 год, для которых восстановлены динамические параметры очагов

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 даны по данным сводной обработки в Крыму, значения *Mw* — из табл. 2, *n* — число индивидуальных определений, участвовавших в осреднении.

Наибольшее количество спектров получено по записям сейсмических станций «Алушта», «Севастополь» и «Судак». Процент участия этих же станций в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 71, 50 и 36%. Меньше всего для анализа привлечены записи станций «Тарханкут» и «Донузлав-2», наиболее удаленных от выбранных для исследования очагов землетрясений.

Для расчета амплитудных спектров отобраны записи только с четкими формами объемных *P*- и *S*-волн, с превышением полезного сигнала над фоном помех в два и более раза. Примеры таких записей даны на рисунке 2.



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



Рис. 2. Примеры записей землетрясений 2019 г.: *а* — 7 марта с  $K_{\Pi}$  = 7.1 (с/ст. «Ялта»,  $\Delta$  = 8 км);  $\delta$  — 8 мая с  $K_{\Pi}$  = 10.0 (с/ст. «Донузлав-2»,  $\Delta$  = 281 км).

# 2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ

Методика расчета, обработки и интерпретации амплитудных спектров не изменилась по сравнению с предыдущими годами [2–5 и др.]. Для поперечных волн (S) спектры рассчитывались по двум горизонтальным составляющим (N-S) и (E-W) и спектральная плотность вычислялась, как полный вектор колебаний, а продольных (P) — по вертикальной (Z). Относительная длительность **т** исследуемого участка записи принята равной интервалу времени от момента вступления S- и P-волн до времени спада их амплитуд  $A_{\text{max}}$  на уровень  $\frac{1}{3}A_{\text{max}}$  [5]. Спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье.

Интерпретация амплитудных спектров выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна ( $\omega^{-2}$ ) [6]. Все рассчитанные в 2019 г. спектры объемных волн удовлетворительно аппроксимируется 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  $\gamma \sim -2$ , что соответствует модели ( $\omega^{-2}$ ). Примеры амплитудных спектров приведены на рис. 3.



СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2019 ГОДА



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

Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2019 г. по записям региональных цифровых сейсмостанций и их аппроксимация в рамках теоретической модели Бруна. Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в таблице 1.

## 3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА

Для восстановления динамических параметров очага в рамках дислокационной модели Брюна [6] 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 круговой дислокации  $r_0(2)$ .

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

где  $\Omega_0$  — максимальное значение спектральной плотности при  $\omega \to 0$ ; 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 [5, 7, 8] и не изменилась по сравнению с предыдущими годами.

Для дислокационной модели Брюна с разрывом в виде круга, радиус дислокации *r*<sub>0</sub> вычисляется по угловой частоте *f*<sub>0</sub> по формуле:

$$r_{0} = 2.34 \frac{V}{2\pi f_{0}}$$
(2)

Другие динамические параметры очагов: сброшенное напряжение  $\Delta \sigma$ , величина деформации сдвига  $\varepsilon$ , кажущееся напряжение  $\eta \overline{\sigma}$ , величина радиационного трения  $\Delta \sigma_r$ , средняя подвижка по разрыву  $\overline{U}$  (или величина дислокации), энергия образования дислокации в очаге  $E_U$  и моментная магнитуда Mw определены по формулам из работ [5–10] с использованием значений сейсмического момента  $M_0$  и размеров разрыва  $r_0$ :

$$\Delta \sigma = \frac{7M_0}{16 r_0^3}, \ \eta \sigma = \frac{\mu E_s}{M_0}, \ \sigma_r = \frac{1}{2} \Delta \sigma - \eta \sigma, \ \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{\mu}, \ U = \frac{M_0}{\mu \cdot \pi r_0^2},$$
$$Eu = \frac{1}{2} \Delta \sigma \overline{U} \cdot \pi r_0^2, \qquad M_W = \frac{2}{3} (\lg M_0 + 7) - 10.7, \tag{3}$$

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

\_ \_ \_

Для половины землетрясений динамические параметры получены по группе независимых станционных определений (табл. 2). Только для одного слабого сейсмического толчка ( $\mathbb{N}$  7), с энергетическим классом  $K_{\Pi} = 6.2$ , произошедшего на материковой части Крыма в зоне Демерджинского разлома, динамические параметры рассчитаны по записям только *S*-волн на одной, ближайшей к очагу станции «Алушта», расположенной на эпицентральном расстоянии  $\Delta = 9 \ \kappa m$ .

Вычисление средних значений параметров (S) и стандартных отклонений ( $\delta S$ ) выполнено по индивидуальным станционным определениям с учетом логнормального закона распределения величин с соответствующим стандартным отклонением [5]. Средние значения радиационного трения  $\Delta \sigma_r$  вычислялись по среднегеометрическим для данного очага напряжениям  $\Delta \sigma$  и  $\eta \overline{\sigma}$ , поскольку станционные значения получились знакопеременными. Среднее значение моментной магнитуды Mw определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

В итоговой таблице 2 для каждой станции регистрации указаны эпицентральное расстояние  $\Delta$ , *км*, тип использованной волны (*P*, *S*) и составляющая записи, где (N+E) означает полный вектор колебаний по горизонтальным составляющим N+S и E–W, а спектральная плотность обозначена как  $\Sigma\Omega_0$ .

Таблица 2.

- Станция	Волна	Составляющая	$\Delta, KM$	$\sim \Omega_0 \cdot 10^{-6}, mc$	$\sum \Omega_0 \cdot 10^{-6}, Mc$	$f_0, \Gamma \eta$	$M_0 \cdot 10^{13}, H \cdot M$	р, км	<ul> <li>Δσ·10<sup>5</sup>, Πa</li> </ul>	5 E·10 <sup>-6</sup>	$[\bar{u} \cdot 10^{-2}, M$	5 ησ·10 <sup>5</sup> /Πα	5 Δσ <sub>r</sub> ·10 <sup>5</sup> , <i>Πα</i>	Еu-10 <sup>8</sup> , Дж	MM 1
	2	2	5	4	<u> </u>	6	1(0)	8	9		11	12	15	14	15
		у янва	аря,	$t_0 = 1$	\$ 4 29. [		16.0 C	$; \varphi = 4$	4.65°,	$\lambda = 3^{\prime}$	4.69°;	h = 1	6 <i>км</i> ;	$K\Pi = 6.4$	12.40
ALU	P C		23	0.02	0.12	6.1	0.67	0.57	0.0	1.99	0.05	0.19	0.11	0.07	2.49
ALU	2	N+E	23		0.15	4.1	0.8	0.31	1.2	3.93	0.08	0.16	0.45	0.10	2.54
			<u>0</u>				0.75	0.34	0.85	2.8	0.00	0.17	0.20	0.11	2.5
ļ	<u> </u>		92				0.04	0.04	0.15	0.15	0.1	0.04		0.18	0.05
N	<u>∲ 2. </u> 5	5 янва	аря,	$t_0 = 14$	<i>4</i> 50	мин	<u>52.0 c</u>	$; \varphi = 4$	4.61°,	$\frac{\lambda = 3}{10}$	4.66°;	h=1	5 км;	$K\Pi = 5.8$	
ALU	P(e)	Z	22	0.002	0.05	6.0	0.05	0.36	0.05	0.18	0.005	0.7	-0.7	0.005	1.78
ALU	S	N+E	22	<u> </u>	0.05	4.0	0.2	0.28	0.4	1.35	0.027	0.21	-0.08	0.014	2.14
			S				0.1	0.32	0.14	0.49	0.01	0.38	-0.31	0.01	1.96
			δS				0.3	0.05	0.45	0.44	0.37	0.26		0.22	0.18
N	<u>9</u> 3. 1	1 янв	аря	$, t_0 = 1$	9 <u>4 00</u>	мин	14.3 c	;;φ=4	44.63°,	$\lambda = 3$	4.63°	; h = 1	13 км;	Кп = 6.5	
ALU	S	N+E	19		0.14	4.0	0.72	0.32	0.99	3.3	0.08	0.22	0.28	0.12	2.51
N	<u>9</u> 4. 1	2 янв	аря	$, t_0 = 2$	<del>3</del> 4 21	мин	54.0 c	;; φ = 4	44.66°,	$\lambda = 3$	5.34°	; $h = 2$	25 км;	Кп = 9.9	
1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ALU	Р	Ζ	74	0.05		4.0	7.97	0.58	1.77	5.9	0.25	17.8	-16.9	2.35	3.2
YAL	Р	Ζ	95	0.03		4.2	6.15	0.55	1.58	5.27	0.21	23.1	-22.3	1.62	3.13
YAL	S	N+E	95		0.15	2.7	5.88	0.5	2.1	7.0	0.25	24.2	-23.1	2.06	3.12
SIM	Р	Ζ	102	0.05		4.35	10.8	0.54	3.1	10.3	0.4	13.1	-11.6	5.57	3.29
SIM	S	N+E	102	ļ!	0.78	2.1	32.3	0.64	5.43	18.1	0.84	4.4	-1.7	29.2	3.64
SEV	S	N+E	132	<u> </u>	0.08	2.5	4.18	0.54	1.19	3.95	0.15	34	-33.4	0.83	3.02
	S							0.56	2.21	7.37	0.3	16.4	-15.3	3.2	3.23
δS						0.12	0.015	0.1	0.1	0.1	0.13		0.22	0.15	
			δS				0.13	·	·	-					
N	<u>• 5. 2</u>	<u>6 янв</u>	δ <i>S</i> аря,	$, t_0 = 0$	2 <u>ч</u> 59	мин	55.8 c	; <b>φ</b> = 4	<b>14.</b> 77°,	$\lambda = 3$	4.37°	; <i>h</i> = 1	19 км;	Кп = 6.0	
ALU	<b>9 5. 2</b> P(e)	<b>6</b> янв Z	δ <i>S</i> аря, 10	$t_0 = 0$	<b>2 4 59</b> 0.001	<i>мин</i> 6.2	<b>55.8</b> <i>c</i> 0.026	e;φ=4 0.36	<b>44.77°,</b> 0.024	$\lambda = 3$ 0.08	<b>34.37°</b> 0.003	; <b>h</b> = 2.34	<b>19 км;</b> -2.33	<b><i>K</i>π = 6.0</b> 0.0001	1.54
N ALU ALU	<u>9</u> 5. 2 P(e) S	<b>6 янв</b> Z N+E	δ <i>S</i> аря, 10 10	$t_0 = 0$	<b>2 4 59</b> 0.001 0.075	<i>мин</i> 6.2 4.15	0.026 0.35	<b>α; φ =</b> 4 0.36 0.31	<b>44.77°,</b> 0.024 0.54	$\lambda = 3$ $0.08$ $1.79$	<b>34.37°</b> 0.003 0.04	; <b>h</b> = 2.34 0.17	<b>19 км;</b> -2.33 0.1	<b>Кп = 6.0</b> 0.0001 0.03	1.54 2.3
ALU ALU	≥ 5. 2 P(e) S	<b>6</b> янв Z N+E	δS аря, 10 10 S	$, t_0 = 0$	<b>2 4 59</b> 0.001 0.075	<i>мин</i> 6.2 4.15	<b>55.8</b> <i>c</i> 0.026 0.35 <b>0.1</b>	<b>c; φ</b> = 4 0.36 0.31 <b>0.33</b>	<b>44.77°,</b> 0.024 0.54 <b>0.11</b>	$\lambda = 3$ 0.08 1.79 <b>0.38</b>	<b>34.37°</b> 0.003 0.04 <b>0.01</b>	; <i>h</i> = 2.34 0.17 <b>0.63</b>	<b>19 км;</b> -2.33 0.1 <b>-0.58</b>	Кп = 6.0 0.0001 0.03 0.002	1.54 2.3 <b>1.92</b>

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2019 год

		0			1						Γ	Ірод	олжен	ие табли	цы 2
1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N	2 6. 2	9 янв	аря	$, t_0 = 1$	9 ч 40	мин	00.9	c; φ = ·	44.60°,	$\lambda = 3$	36.98°	; <i>h</i> =	11 км;	Кп = 9.0	
SUDU	Р	Z(e)	160	0.006		4.3	1.75	0.52	0.55	1.82	0.07	10.2	-9.9	0.16	2.77
SUDU	S	N+E	160		0.06	2.7	3.19	0.47	1.35	4.51	0.15	5.6	-4.9	0.72	2.94
			S				2.36	0.49	0.86	2.86	0.1	7.56	-7.13	0.34	2.9
			δS				0.13	0.02	0.19	0.2	0.17	0.13		0.33	0.09
N⁰	7.13	в февј	раля	<b>1, t</b> o = 1	12 4 3'	7 ми	н 49.9	<i>c</i> ; φ =	44.77°	', λ =	<b>34.40</b> °	p; h =	20 км	; <i>K</i> п = 6.2	
ALU	S	N+E	9		0.11	3.2	0.54	0.4	0.38	1.27	0.036	0.16	0.04	0.034	2.42
N₂	8. 19	февр	раля	$t_0 = 1$	0 ч 43	8 мин	<i>i</i> 52.0	<i>c</i> ; φ =	43.14°	,λ=	35.22	°; h =	44 км	и; <i>К</i> п = 9.7	'
ALU	Р	Ζ	167	0.015		4.9	12.0	0.63	2.12	3.54	0.16	10.0	-8.9	2.11	3.32
ALU	S	N+E	167		0.5	3.0	60.5	0.55	16.2	27.1	1.08	1.98	6.14	81.8	3.79
SEV	S	N+E	182		0.06	2.9	11.8	0.57	2.86	4.76	0.2	10.2	-8.73	2.8	3.32
			S				20.5	0.58	4.6	7.7	0.33	5.87	-3.57	7.85	3.48
			δS				0.24	0.02	0.28	0.28	0.26	0.24		0.51	0.2
,	<u>№</u> 9.	7 ма	рта,	$t_0=00$	б ч 27	мин	02.7 c	; φ = 4	4.46°,	$\lambda = 3$	4.06°;	h = 7	км; К	Cπ = 7.1	
YAL	Р	Ζ	8	0.009		7.0	0.18	0.32	0.24	0.8	0.02	2.62	-2.5	0.007	2.11
YAL	S	N+E	8		0.07	4.2	0.26	0.30	0.41	1.37	0.03	1.85	-1.65	0.018	2.21
SEV	S	N+E	32		0.014	4.1	0.15	0.31	0.23	0.76	0.017	3.09	-2.97	0.006	2.06
			S				0.19	0.31	0.28	0.94	0.02	2.46	-2.32	0.01	2.13
			δS				0.07	0.01	0.08	0.08	0.07	0.07		0.15	0.05
N	<u>e</u> 10.	6 апр	еля	$, t_0 = 0$	8 <i>4</i> 01	мин	11.3 a	c; φ = ·	14.66°,	$\lambda = 3$	85.49°	; $h = 3$	35 км;	Кп = 9.9	
YAL	Р	Ζ	107	0.02		3.95	5.99	0.62	1.09	3.63	0.16	23.7	-23.1	1.09	3.12
YAL	S	N+E	107		0.12	2.8	6.86	0.51	2.33	7.7	0.28	20.7	-19.5	2.66	3.16
ALU	Р	Ζ	86	0.04		4.0	9.68	0.61	1.83	6.08	0.27	14.7	-13.7	2.95	3.26
SIM	Р	Ζ	113	0.08		3.75	12.7	0.66	1.97	6.57	0.31	11.2	-10.7	4.16	3.34
SIM	S	N+E	113		0.78	2.1	23.6	0.67	3.37	11.2	0.55	6.02	-4.3	13.3	3.52
SEV	Р	Ζ	144	0.016		3.9	6.18	0.63	1.08	3.6	0.16	23.0	-22.4	1.11	3.13
SEV	S	N+E	144		0.22	2.0	16.2	0.71	2.0	6.67	0.34	8.76	-7.76	5.41	3.41
			S				10.26	0.63	1.82	6.1	0.27	13.9	-13	3.11	3.3
			δS				0.09	0.02	0.07	0.07	0.07	0.09		0.15	0.09
J	<b>№</b> 11.	. 8 ма	я, <i>t</i> (	o = 19	ч 51 м	ин 2	9.8 c;	φ = 43	.11°, λ	= 31.	.66°; h	a = 50	км; К	<b>π</b> = 10.0	
SEV	S	N+E	228		0.06	2.5	18.9	0.67	2.79	4.64	0.23	12.6	-11.2	4.39	3.45
TARU	S	N+E	261		0.3	2.0	81.1	0.83	6.11	10.2	0.62	2.95	11.0	41.3	3.88
DNZ2	S	N+E	281		0.18	2.35	52.7	0.71	6.44	10.7	0.56	4.53	-1.31	28.3	3.75
ALU	S	N+E	281		0.24	2.25	53.4	0.74	5.73	9.56	0.52	4.47	-1.6	25.5	3.76
SIM	S	N+E	284		0.19	2.15	55.6	0.78	5.21	8.68	0.49	4.29	-1.69	24.2	3.77

											Γ	Іродо	элжен	ие табли	цы 2
1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SUDU	S	N+E	332		0.2	2.3	67.6	0.73	7.75	12.9	0.68	3.53	3.38	43.6	3.82
			S				50.3	0.74	5.42	9.03	0.5	4.74	-2.03	22.7	3.74
			δS				0.09	0.01	0.06	0.06	0.07	0.1		0.15	0.10
№ 12. 23 мая, t0 = 20 ч 48 мин 5								φ = 44	4.56°, 7	l = 35	5.73°;	h=2	4 км; 1	Кп = 7.7	
SUDU	Р	Ζ	68	0.01		5.1	1.48	0.46	0.68	2.27	0.08	0.9	-0.56	0.17	2.72
SUDU	S	N+E	68		0.11	3.05	3.11	0.44	1.6	5.34	0.17	0.43	0.37	0.83	2.93
ALU	Р	Ζ	106	0.005		5.8	0.74	0.40	0.5	1.68	0.05	1.8	-1.55	0.06	2.52
ALU	S	N+E	106		0.1	3.1	2.84	0.43	1.54	5.13	0.16	0.47	0.3	0.73	2.91
			S				1.76	0.43	0.96	3.2	0.1	0.76	-0.28	0.28	2.77
			δS				0.14	0.01	0.13	0.13	0.13	0.14		0.27	0.14
Nº	13.	4 авг	уста	$, t_0 = 1$	5 ч 25	мин	49.3	c; φ = ·	44.41°,	$\lambda = 3$	33.48°	; <i>h</i> =	28 км;	Кп = 7.1	
SEV	S	N+E	22		0.015	4.0	0.21	0.34	0.24	0.81	0.02	2.28	-2.15	0.008	2.15
Nº 1	4. 23	в сент	ябр	я, <i>t</i> 0 =	08 ч 5	56 мі	ін 56.8	β <i>c</i> ; φ:	= 44.11	°, λ =	= 34.21	l°; <i>h</i> :	= 35 кл	и; Кп = 9.	5
YAL	Р	Ζ	42	0.022		4.6	3.14	0.57	0.76	2.51	0.1	13.5	-13.1	0.4	2.93
YAL	S	N+E	42		0.8	2.6	21.3	0.57	4.96	16.5	0.69	1.99	0.5	17.7	3.49
SEV	Р	Ζ	64	0.01		5.0	21.1	0.52	0.65	2.17	0.08	20.1	-19.7	0.23	2.82
SEV	S	N+E	64		0.1	2.9	3.94	0.51	1.27	4.24	0.16	10.8	-10.1	0.84	3.0
ALU	Р	Ζ	65	0.022		4.6	3.14	0.57	0.76	2.52	0.1	13.5	-13.1	0.4	2.93
ALU	S	N+E	65		0.8	2.6	21.3	0.57	4.96	16.5	0.69	1.99	0.5	17.7	3.49
SUDU	Р	Ζ	107	0.025		4.1	8.08	0.64	1.38	4.58	0.21	5.24	-4.56	1.85	3.21
SUDU	S	N+E	107		0.2	2.5	12.1	0.6	2.49	8.31	0.36	3.51	-2.27	5.01	3.33
			S				8.81	0.57	1.59	5.28	0.22	6.42	-5.63	1.75	3.15
			δS				0.13	0.01	0.13	0.13	0.13	0.14		0.26	0.23
N₂	15.4	дека	бря,	$t_0 = 0$	9 <i>u</i> 43	мин	29.3	<i>c</i> ; φ = -	44.06°,	$\lambda = 3$	30.32°	; h =	46 км;	Кп = 10.0	)
SEV	Р	Ζ	273	0.026		3.7	33.4	0.83	2.6	8.67	0.52	3.57	-2.27	14.5	3.62
SEV	S	N+E	273		0.15	2.2	29.8	0.74	3.16	10.5	0.57	4.01	-2.43	15.7	3.59
SIM	Р	Ζ	317	0.02		3.7	29.8	0.83	2.32	7.74	0.47	4.0	-2.84	11.5	3.59
SIM	S	N+E	317		0.35	2.1	80.7	0.78	7.43	24.8	1.41	1.48	2.23	100.0	3.87
SUDU	Р	Ζ	382	0.06		3.4	107.0	0.9	6.47	21.6	1.41	1.12	2.12	115.0	3.96
SUDU	S	N+E	382		0.32	2.0	88.3	0.82	7.02	23.4	1.39	1.35	2.16	103.0	3.9
			S				53.2	0.82	4.31	14.4	0.85	2.25	-0.1	38.2	3.8
δS						0.11	0.01	0.09	0.1	0.1	0.11		0.2	0.16	

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

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Записи сейсмических колебаний на каждой станции регистрации имеют свои особенности, связанные с амплитудно-частотными характеристиками, как аппаратуры, так и локальной среды. Кроме того, параметры станционных волновых форм существенно зависят от спектрального состава очагового излучения и от направленности на станцию регистрации. Поэтому для усреднения индивидуальных станционных особенностей и надежных итоговых оценок очаговых параметров землетрясений необходимо использовать записи нескольких станций и разных типов волн. Поскольку почти половина изученных землетрясений 2019 г. были слабыми  $(K_{\Pi} = 5.8 - 7.1)$ , очаговые параметры по ним восстановлены в основном по 1-2 станциям. В связи с этим, для этих очагов получены менее надежные оценки средних значений с большим разбросом индивидуальных определений и высокой стандартного отклонения величиной  $\delta S$ . показателя степени рассеяния индивидуальных оценок (табл. 2).

Наилучшая сходимость станционных определений, как и в предыдущие годы [2–4] получена для радиуса круговой дислокации, размеры которого в явном виде не зависят от направленности излучения энергии из очага и условий среды под станцией регистрации (см. формулу 2). Степень рассеяния индивидуальных определений  $r_0$  для большинства изученных землетрясений не превысила  $\delta r_0 = 0.05$  даже для слабых толчков. Стандартные отклонения по другим параметрам для наиболее сильных землетрясений менее  $\delta S < 0.3$ . Наибольший разброс данных по станционным определениям отмечен для величины энергии дислокации  $E_U$  достигающий иногда более одного порядка. Соответственно, стандартное отклонение  $\delta E_U$  было максимальным. Значения моментных магнитуд Mw определены с погрешностью не выше  $\pm 0.2$ . Исключение составляет только Mw с погрешностью  $\pm 0.38$  для землетрясения 26 января (№ 5), определенное по станции «Алушта» с использованием относительно слабого сигнала продольной волны (в табл. 2 обозначено, как P(e)). Не исключена также и ошибка за счет отклонения реальной направленности излучения  $R_{\theta\phi} = 0.4$  для неизвестного механизма очага данного землетрясения.

Радиационное трение  $\Delta \sigma_r$  для большинства исследованных землетрясений имело отрицательное значение, связанное с неравномерным распределением прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах [9]. Во всем диапазоне энергий средняя величина сброшенных напряжений не превысила  $\Delta \sigma = 6 \cdot 10^5 \Pi a$  (6 *бар*), а кажущихся напряжений  $\eta \overline{\sigma} < 16 \cdot 10^5 \Pi a$  (16 *бар*).

Проведем сравнение полученных в 2019 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами [5, 11], полученными по станциям Крыма с аналоговой регистрацией сейсмических волн. Как и в 2018 г [4], сравнение проведено для сейсмического момента  $M_0$ , радиуса круговой дислокации  $r_0$  и сброшенного напряжения  $\Delta \sigma$  (Рис. 4). Для сравнения использованы зависимости  $M_0$  ( $K_{\Pi}$ ),  $r_0(K_{\Pi})$  и 1g  $\Delta \sigma(K_{\Pi})$  из [5, 11].

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

lg $M_0 = 0.645 (\pm 0.027) K_{\Pi} + 15.142 (\pm 0.271),$	$\rho = 0.99,$
lg $r_0 = 0.112(\pm 0.011) K_{\Pi} - 1.293(\pm 0.107),$	ρ = 0.93,
lg $\Delta \sigma = (0.42 \pm 0.01) K_{\Pi} - (3.28 \pm 0.10),$	$\rho = 0.9$

где р — коэффициент корреляции.



Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2019 г.: *a* — сейсмического момента  $M_0$ , *б* — радиуса круговой дислокации  $r_0$  и *g* — сброшенного напряжения  $\Delta \sigma$  с долговременными зависимостями  $M_0(K_{\Pi})$ ,  $r_0(K_{\Pi})$  и  $\Delta \zeta(K_{\Pi})$  [5, 11]. Пунктиром обозначены пределы погрешностей долговременных зависимостей.

В целом значения  $M_0$  и  $r_0$  для очагов землетрясений за 2019 г. укладываются в диапазон доверительного интервала долговременных зависимостей  $M_0(K_{\Pi})$ ,  $r_0(K_{\Pi})$ , полученных за длительный интервал времени аналоговой регистрации сейсмических колебаний (рис. 4 *a*,  $\delta$ ). В то же время сброшенное напряжение  $\Delta \sigma$  для большинства землетрясений 2019 г. выходят за пределы доверительного интервала  $\Delta \zeta(K_{\Pi})$ , как и в 2018 г. [12], находясь преимущественно ниже долговременной зависимости  $\Delta \zeta(K_{\Pi})$  для наиболее сильных и выше — для слабых толчков (рис. 4 *в*). Ранее было показано, что сброшенные напряжения существенно меняются как в пространстве, так и во времени при одном энергетическом уровне [4, 12].

Наибольшее отличие  $r_0$  от долговременных параметров получено для самого слабого землетрясения 13 февраля (№ 7) с  $K_{\Pi} = 6.2$ , параметры которого восстановлены только по одной станции ALU (*S*-волна). Кроме того, для слабых очагов менее надежно определяется глубина очага и, соответственно, могут быть ошибки при выборе скоростных моделей среды.

# 5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В 2019 году, продолжено изучение спектральных свойств очагов землетрясения не только по амплитудным, но и по энергетическим спектрам. Рассмотрены энергетические спектры только по данным записей станции «Алушта», поскольку ранее по этой станции получены их некоторые общие свойства и особенности [5, 13].

Переход от спектральной плотности амплитудного спектра к энергетическому спектру осуществлялся по формуле из [14]:

$$q = \frac{2.3\rho c}{2\pi} \omega^3 \Omega^2(\omega)$$

(4)

где,  $\rho$  — плотность пород в окрестности очага, c — скорость распространения объемных волн (*P* или *S*),  $\Omega$  ( $\omega$ ) — модуль спектральной плотности, определяемый из амплитудного спектра.

Энергетические спектры, также как и амплитудные спектры, получаются сильно изрезанными. Для наглядности и более точного определения диапазона частот, на которые приходится максимум плотности сейсмической энергии qmax, энергетические спектры сглаживались скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот. На рис. 5 даны примеры энергетических спектров, представленные в билогарифмической системе координат (рис. 5).

Для всех энергетических спектров по трем компонентам записи (рис. 5) характерна резонансная форма с одним выраженным максимумом плотности энергии qmax в ограниченной области частот (fqmax).

Диапазон ширины максимума спектра  $\delta fq$  на уровне 0.75 от максимального значения qmax в высокочастотной (fq1) и низкочастотной (fq2) части спектра:  $\delta fq = (fq1-fq2)$  получился различным, для разного энергетического уровня землетрясений и эпицентрального расстояния. Результаты расчета fqmax и  $\delta fq$  по разным составляющим записи (E, N, Z) представлены в таблице 3.





Рис. 5. Примеры энергетических спектров землетрясений Крыма 2019 г. по записям станции «Алушта».

Таблица 3.

Характеристики энергетических спектров землетрясений 2019 г. по данным станции «Алушта»

N₂	Дата	$K_{\Pi}$	Δ, κм	Fq <i>max,</i> Гц			$\delta fq (f_1 - f_2), \Gamma u$			
				Z	Ν	Е	Z	Ν	E	
1	01.03	6.4	23	5.8	4.51	4.53	4.5–7	3.6–5.7	2.7-5.6	
2	01.05	5.8	22	7.1	4.52	3.5	6.1-8.8	3.4–5.7	2.8-5.7	
3	01.11	6.5	19	5.8	4.52	3.52	4.4-6.8	3.5-5.65	2.8-4.8	
4	01.12	10.1	74	4.51			3.5-5.25			
5	01.26	6.0	10	5.8	3.6	3.6	4.67-9.1	2.4-4.2	2.8-4.9	
7	02.13	6.2	9		2.86	4.5		2.3-4.57	2.8-5.7	
8	02.19	9.6	167	7.2	4.55	4.54	4.5-8.1	2.9-5.72	2.3-5.7	
11	05.08	10.0	281		2.86	2.85		1.8-5.6	1.8-4.54	
12	05.23	7.7	106	5.7	3.6	2.3	3.1-6.6	2.45-6	1.2-4.5	
14	09.23	9.5	65	4.5	4.54	2.9	3.7–7.3	2.8-6.2	1.78-5.25	

Ранее в работе [13] все энергетические спектры условно были разделены на 4 группы, отличающиеся эпицентральными расстояниями:  $1 - (26 \pm 2) \kappa m$ ;  $2 - (46 \pm 3) \kappa m$ ;  $3 - (165 \pm 14) \kappa m$ ;  $4 - (235 \pm 12) \kappa m$ .

Землетрясения 2019 г. под номерами № 1, 2 и 3 с эпицентральным расстоянием 23 км, 22 км и 19 км строго не попадают в первую из отобранных групп очагов ( $\Delta = 26 \pm 2 \kappa M$ ), однако находятся вблизи нее. Учитывая, данный факт и погрешности оценок эпицентральных расстояний для слабых толчков, проведено сравнение параметров энергетических спектров землетрясений № 1, 2 и 3 с первой группой. Сравнение показало, что для этих очагов максимумы fqmax на диапазонах частот 3.5 Ги и 4.51 Ги для поперечных N и Е-компонент частично попадают в пределы погрешностей fqmax = (3.33 ± 0.33) Ги для данной первой группы [14].

Землетрясение под номером  $\mathbb{N}$  8 попадает в третью группу по эпицентральному расстоянию ( $\Delta = 165 \pm 14$ ), но его спектр по энергии был более высокочастотным (fqmax = 4.5 Гц по S-волне), что почти в полтора раза больше диапазона частот максимальных значений энергетического спектра qmax, для данной группы fqmax = (2.37 ± 0.41) [13]. Вероятно, это связано как с недостаточно большой базой данных спектров принадлежащей этой группе, так и с индивидуальными особенностями очагового излучения землетрясения  $\mathbb{N}$  8, произошедшего в переходной зоне кора — мантия на глубине 44 км.

Остальные из рассмотренных землетрясений за 2019 г. или находятся в непосредственной близости к сейсмической станции «Алушта» ( $\Delta = 9-10 \ \kappa m$ ), или — на удаленном от нее расстоянии и не попадают в отобранные диапазоны эпицентральных расстояний [13].

С учетом всех изученных энергетических спектров в 2014, 2015, 2018 и 2019 гг. предварительно создано 9 групп землетрясений по близким эпицентральным расстояниям до станции «Алушта» (табл. 1).

Таблица 4.

N⁰	$K_{\Pi}$	Δ, км	<i>f</i> q max	х, Гц	$\delta fq (f_1 -$	-f <sub>2</sub> ), Гц
			P(Z)	S(N+E)	P(Z)	S(N+E)
1	6.3	5	7.1	$4.65\pm1.5$	5.56	$2.6 \pm 0.9$
2	6.0-6.2	$10 \pm 1$	5.8	$3.6 \pm 0.7$	4.43	$2.3 \pm 0.5$
3	5.8-6.5	$21 \pm 2$	$6.23\pm0.75$	$4.2 \pm 0.5$	$2.5 \pm 0.15$	$2.4 \pm 0.4$
4	7.7–9.8	$26 \pm 2$	$5.75\pm0.04$	$3.1\pm0.76$	$6 \pm 0.6$	$4.6 \pm 1.6$
5	7.2–11.2	$46 \pm 3$	$5.4\pm0.6$	$3.3 \pm 1$	$5.5 \pm 0.9$	$4.9\pm0.6$
6	7.7-10.1	$82 \pm 16$	$4.9\pm0.7$	$3.3 \pm 1$	$3.55 \pm 0.1$	$3.1\pm0.76$
7	8.7–10.8	$165 \pm 17$	$5.3 \pm 1.8$	$2.7 \pm 1.3$	$6.1 \pm 1.4$	$4.3 \pm 1$
8	8.5–11	$232 \pm 18$	$4.8 \pm 0.9$	$2.57 \pm 1$	4.6-2.1	$4 \pm 1.3$
9	10-11	$272 \pm 14$	$3.2 \pm 2.7$	$2.6 \pm 1.1$	$3.1 \pm 1.5$	2.20.76

# Характеристики энергетических спектров 9-ти групп землетрясений по записям станции «Алушта»

Из табл. 4 видно, что, несмотря на вариации индивидуальных спектров рассмотренных групп очагов и разных уровней  $K_{\Pi}$ , общий диапазон fq max и ширины спектра  $\delta f$ , находится в достаточно ограниченном интервале значений.

Качественно можно отметить естественную тенденцию к преобладанию высокочастотных спектров для слабых толчков и близких эпицентральных расстояний. Количественно оценить рост fq max и  $\delta fq$  с увеличением энергетического уровня и эпицентрального расстояния можно будет только при существенном увеличения статистически значимого материала по энергетическим спектрам.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма за 2019 год изучены как по амплитудным, так и энергетическим спектрам. Специализированная база данных по динамическим параметрам очагов дополнена 54 станционными определениями для 15 сейсмических событий в диапазоне энергетических классов  $K_{\Pi} = 5.8 \div 10.0$ , произошедших в различных районах региона на эпицентральных расстояниях от 9 км (станция ALU) до 382 км (станция SUDU). Средние значения динамических параметров очагов землетрясений 2019 г. в большинстве случаев оценены по нескольким станциям и по разным типам волн, что обеспечило в основном малую величину показателя степени рассеяния индивидуальных оценок и соответствуют долговременным зависимостям от энергетического уровня землетрясений.

Статистика по частотному составу сейсмических колебаний, несущих на себе сейсмическую энергию дополнена ланными максимальную ЛЛЯ лесяти землетрясений по записям станции «Алушта» для **V**ТОЧНЕНИЯ системы энергетических спектров, полученной ранее по данным за период 2014–2015гг. [13]. С учетом энергетических спектров за 2014, 2015, 2018 гг. [4, 13] и новых за 2019 г. предварительно выделено 9 групп землетрясений по близким эпицентральным расстояниям до станции «Алушта». На качественном уровне отмечен сдвиг максимума спектра (fq max) в сторону более высоких частот для слабых толчков и количественных эпицентральных расстояний. Для установления близких зависимостей значений параметров энергетических спектров fq max и  $\delta fq$  от энергетического уровня землетрясений и эпицентрального расстояния имеющихся данных пока недостаточно. Исследования необходимо продолжить с целью получения и увеличения экспериментального материала по энергетическим спектрам, необходимого для статистической обработки данных.

#### Список литературы

- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Том 2. С. 113–125.
- Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона 2016 года // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2017, Том 3 (69), № 4. С. 51–69.
- 3. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э., Бондарь М. Н. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2017 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018, Том 4 (70), № 4. С. 69–83.

- 4. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Бондарь М. Н, Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2018 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им В. И. Вернадского География. Геология. 2019, Том 5 (71), № 4. С. 77–96
- 5. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
- 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.
- 7. 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 *Р*-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.
- 8. 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 *Р*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 60–70.
- 9. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
- 10. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale, J. Geophys. Res. 1979. V. 84. no 35, pp. 2348–2350.
- Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Капитанова С. А., Поречнова Е. И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 238–242.
- Пустовитенко Б. Г., Мержей Е. А., Пустовитенко А. А. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по данным цифровых сейсмостанций // Геофизический журнал. № 5. 2013. С. 172–186.
- Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Сводные энергетические спектры землетрясений Крыма по записям сейсмической станции «Алушта» // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018, Том 4 (70), № 4. С. 191–206.
- 14. Ризниченко Ю. В., Сейдузова С. С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. М.: Наука, 1984. 180 с.

## SPECTRAL AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE FOCI

# **OF 2019 CRIMEAN EARTHQUAKES**

Pustovitenko B. G.<sup>1</sup>, Eredzhepov E. E.<sup>1,2</sup>, Bondar M. N<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Autonomous Institution «Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities»

<sup>2</sup>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 results of the calculation and analysis of the spectral and dynamic parameters of the sources ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\sigma$ ,  $\Delta\sigma_r$ ,  $\bar{u}$ , Eu  $\mu$  Mw) of 15 Crimean earthquakes in 2019 in the range of energy classes  $K\pi = 5.8-10.0$  are presented. The earthquakes occurred in different regions of the region at epicentral distances from 9 km (ALU station) to 382 km (SUDU station). The dynamic parameters of the earthquake sources were reconstructed from the amplitude spectra of the records of P and S seismic waves recorded by seven digital regional seismic stations. 86 station amplitude spectra were used, which served as the basis for determining the dynamic parameters of the sources using the Brun's theoretical dislocation model.

In most cases, the average values of the dynamic parameters of the 2019 earthquake foci were estimated for several stations and for different types of waves, which mainly

provided a small value of the scattering degree of individual estimates and correspond to long-term dependences on the energy level of earthquakes.

The spectral properties of the foci of 10 earthquakes were also considered from the energy spectra of records at the station «Alushta». Taking into account the energy spectra for 2014, 2015, 2018 [4, 13] and new ones for 2019 preliminary identified 9 groups of earthquakes at close epicentral distances to the station «Alushta». On a qualitative level, had noted a shift of the spectrum maximum (fq max) towards higher frequencies for weak shocks and close epicentral distances. To establish quantitative dependences of the values of the parameters of the energy spectra fq max and  $\delta fq$  on the energy level of earthquakes and the epicentral distance, the available data are still insufficient.

*Keywords:* amplitude spectrum, Brune model, spectral density, angular frequency, seismic moment, dislocation radius, discharged and apparent stresses, displacement along a gap, radiation friction, energy spectrum.

#### References

- Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E. Ob ehnergeticheskoj ocenke zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (On the energy assessment of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). Magnituda i ehnergeticheskaya klassifikaciya zemletryasenij. Moscow, IFZ AN SSSR, 1974, V. 2, pp. 113–125 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Ochagovye parametry zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona 2016 goda (Focal parameters of earthquakes of the Crimean-Black Sea region in 2016). Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2017, V. 3(69), no 4, pp. 51–69 (in Russian).
- 3. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., Bondar' M. N. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2017 goda (Spectral and dynamic parameters of the centers of Crimea earthquakes in 2017). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2018, V. 4 (70), no 4, pp. 69–83 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., Bondar' M. N. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2018 goda (Spectral and dynamic parameters of the centers of Crimea earthquakes in 2018). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. V. 5 (71), no 4, 2019, pp. 77–96 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma (Spectral and focal parameters of Crimea earthquakes). Kiev, Naukova dumka Publ, 1990. 251 p. (in Russian).
- 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.
- 7. 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 dinamicheskih parametrov ochagov zemletryasenij. Perekhod ot stancionnogo spektra k ochagovomu i raschet dinamicheskih parametrov ochaga (*P*-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. Transition from the station spectrum to the focal spectrum and calculation of the dynamic parameters of the focal point). Vulkanologiya i sejsmologiya. 1989, no 2, pp. 66–79 (in Russian).
- Aptekman Zh. Ya., Daragan S. K., Dolgopolov 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 dinamicheskih parametrov ochagov zemletryasenij. Unifikaciya iskhodnyh dannyh i procedury rascheta amplitudnyh spektrov (*P*-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. Unification of input data and procedures for calculating amplitude spectra). Vulkanologiya i sejsmologiya. 1985, no 2, pp. 60–70 (in Russian).

- 9. Kostrov B. V. Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya (The mechanics of the source of a tectonic earthquake). Moscow, Nauka Publ., 1975, 179 p. (in Russian).
- 10. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale, J. Geophys. Res. 1979, V. 84, no 35, pp. 2348–2350.
- Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A., Kapitanova S. A., Porechnova E. I. Prostranstvennye osobennosti ochagovyh parametrov zemletryasenij Kryma (Spatial features of the focal parameters of Crimea earthquakes). Sejsmichnost' Severnoj Evrazii. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii. Obninsk, GS RAN, 2008, pp. 238–242 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Merzhej E. A., Pustovitenko A. A. Dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma po dannym cifrovyh sejsmostancij (The dynamic parameters of the centers of the earthquakes of Crimea according to digital seismic stations). Geofizicheskij zhurnal, 2013, no 5, pp. 172–186 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Svodnye energeticheskie spektry zemletryasenij Kryma po zapisyam sejsmicheskoj stancii «Alushta» (Aggregate energy spectra of Crimea earthquakes according to the records of the Alushta seismic station). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2018, V. 4 (70), no 4, pp. 191–206 (in Russian).
- 14. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. Spektral'no-vremennaya harakteristika sejsmicheskoj opasnosti (Spectral-temporal characteristics of seismic hazard). Moscow, Nauka Publ., 1984. 180 p. (in Russian).