Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского.
География. Геология. Том 7 (73). №4 .2021 г. С. 70–86.

УДК 550.348.435

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2020 ГОДА

***Пустовитенко Б. Г.* [1], *Эреджепов Э. Э.* [1,2], *Бондарь М. Н.* [1,2]**

[1]***ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», Симферополь, Республика Крым, Россия.***
[2]***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, $\Delta\sigma$, ε, $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, $\bar{u}$, Eu и Mw) пяти наиболее сильных представительных землетрясений Крыма 2020 года в диапазоне энергетических классов $K_П$ =9.0–11.3 и шести сравнительно слабых с $K_П$ =5.2–7.9, произошедших на материковой части и вблизи Южного берега Крыма. Динамические параметры очагов восстановлены по амплитудным спектрам записей продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных восьмью цифровыми региональными сейсмическими станциями. Использовано 70 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

Крымско-Черноморский регион в 2020 году характеризовался умеренной сейсмичностью, как по выделенной сейсмической энергии, так и по количеству представительных землетрясений. Для исследования спектральных свойств местных землетрясений и восстановления на их основе очаговых параметров с оценкой магнитуд по сейсмическому моменту отобрано пять представительных сейсмических событий в диапазоне энергетических классов $K_П$ =9.3–11.3, и шесть сравнительно слабых с $K_П$ =5.2–7.9, представляющих особый интерес, т. к произошли в слабоизученном районе на Тарханкутском полуострове и вблизи Южного берега Крыма. Кроме того, по записям станции «Алушта» исследованы энергетические спектры ближайших к станции землетрясений для оценки частотного состава колебаний, несущих максимальную сейсмическую энергию.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчета амплитудных спектров Фурье и определения на их основе динамических параметров очагов выбраны записи наиболее значимых землетрясений 2020 года (рис. 1), отвечающие критериям высокого качества.

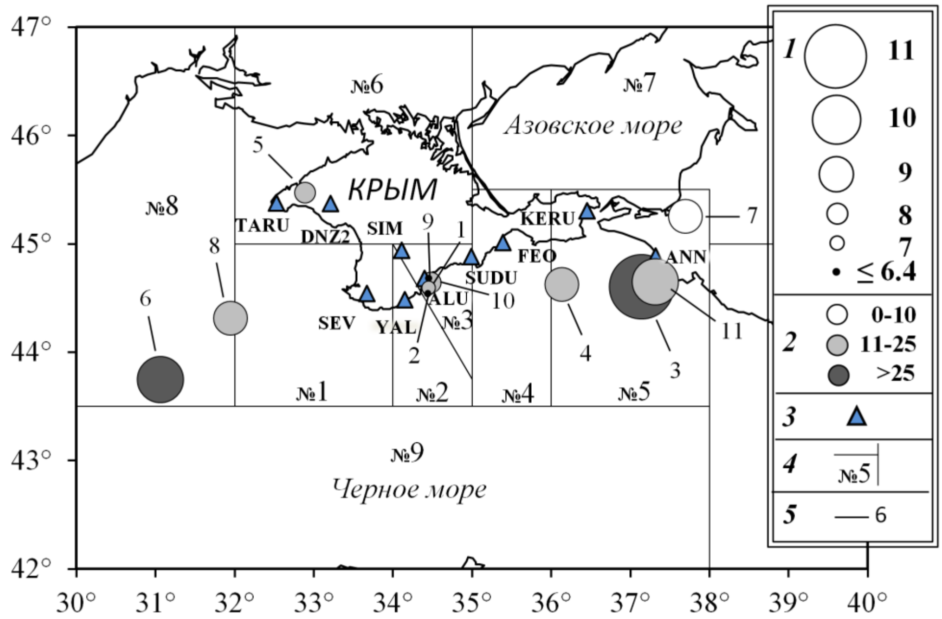


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2020 г., для которых восстановлены динамические параметры очагов: *1* — энергетический класс $K_П$ [1]; *2* — глубина очага; *3* — сейсмическая станции; *4* — граница районов; *5* — номера землетрясений в соответствии с табл. 1.

Основные параметры землетрясений 2020 г., для которых исследованы спектральные и динамические параметры очагов, приведены в таблице 1 по данным сводной обработки в Крыму.

Наибольшее количество изученных землетрясений (по 4 события) произошло в Алуштинской и Керченско-Анапской зонах очагов (районы № 3 и № 5), два — в Северо-Западной (район № 8) и одно — в Степном Крыму (Тарханкутский полуостров).

По записям объемных волн на восьми региональных сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Тарханкут» (TARU), «Донузлав-2» (DNZ2) и «Керчь» (KERU), рассчитано и обработано 70 амплитудных спектров: 14 для продольных (P) и 56 – поперечных (S) волн. Как и в предыдущие годы [2, 3] не использованы для анализа записи сейсмостанции «Феодосия» (FEO) волновые формы на которой не отвечают критерию высокого качества исходных данных для расчета спектров.

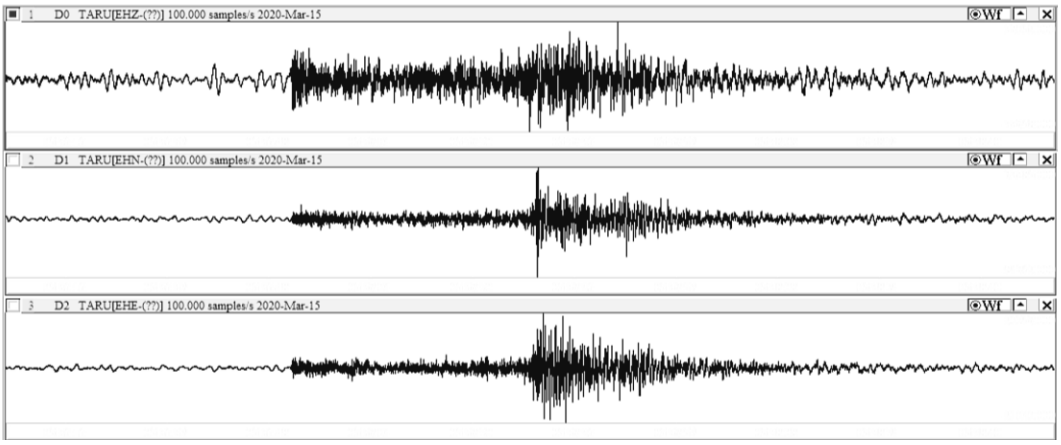
Наибольшее количество спектров получено по записям сейсмических станций «Алушта», «Судак» и «Севастополь». Процент участия этих станций в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший и составляет 55%. Меньше всего для анализа привлечены записи станции «Керчь» с высоким уровнем природных шумов.

Таблица 1.
Основные параметры землетрясений Крыма за 2020 год, для которых восстановлены динамические параметры очагов

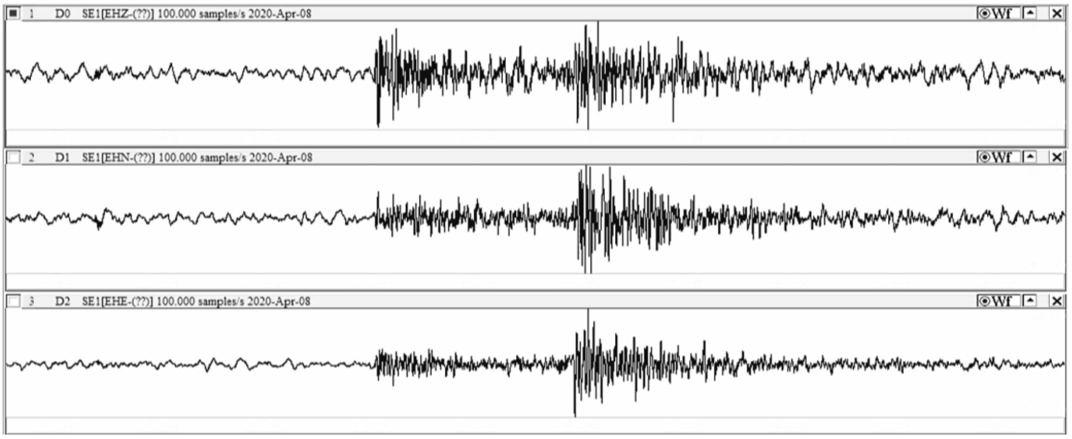
№	Дата, *д м*	t_0, *ч мин с*	Эпицентр		*h*, *км*	Магнитуда			$K_П$	Район
			φ°, N	λ°, E		*Mc*	*Mw/n*, табл. 2	*ML wsg*		
1	*2*	*3*	4	5	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
1	12.03	06 15 16.0	44.59	34.45	14		2.65/1		7.1	Алуштинский (№ 3)
2	12.03	13 21 40.5	44.54	34.44	7		1.9/2		5.2	Алуштинский (№ 3)
3	15.03	05 36 01.1	44.60	37.14	42	4.0	4.02/11	3.9	11.3	Керченско-Анапский (№ 5)
4	01.04	16 11 40.8	44.62	36.14	25		3.12/3	3.0	9.0	Керченско-Анапский (№ 5)
5	08.04	12 12 42.7	45.47	32.89	25		2.51/3		7.9	Степной Крым (№ 6)
6	12.04	02 31 06.6	43.75	31.06	35	3.4	3.63/9	3.6	10.4	Северо-Западный (№ 8)
7	01.06	13 25 13.8	45.25	37.70	9		3.11/3	3.3	9.4	Керченско-Анапский (№ 5)
8	28.08	14 20 51.0	44.31	31.95	19		3.22/1	3.1	9.3	Северо-Западный (№ 8)
9	24.10	08 40 26.5	44.68	34.45	13		2.37/1		6.2	Алуштинский (№ 3)
10	27.10	02 08 45.3	44.64	34.48	14		2.73/5		8.2	Алуштинский (№ 3)
11	12.12	14 54 24.9	44.65	37.31	25	3.1	3.67/5	3.4	10.1	Керченско-Анапский (№ 5)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 даны по данным сводной обработки в Крыму, значения *Mw/n* (графа 8) — из табл. 2, где *n* — число индивидуальных определений, участвовавших в осреднении.

Для расчета амплитудных спектров отобраны только записи с превышением полезного сигнала над фоном помех в два и более раза. Примеры таких записей даны на рисунке 2.



а



б

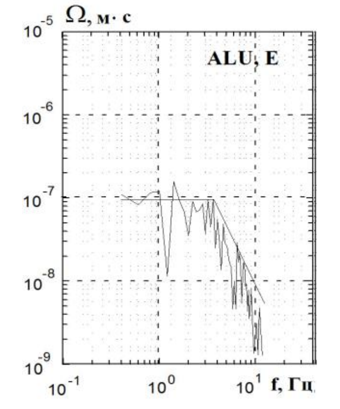
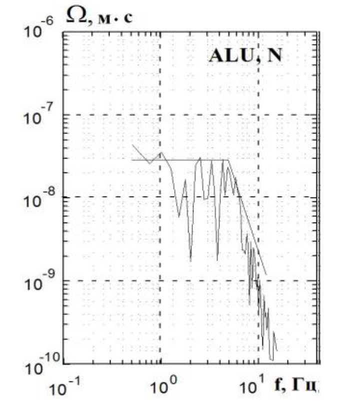
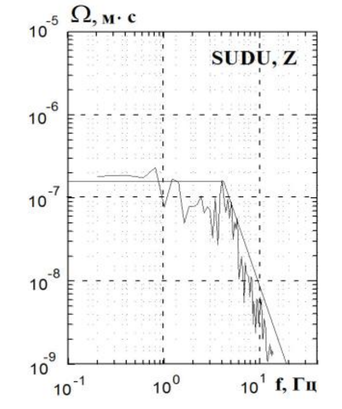
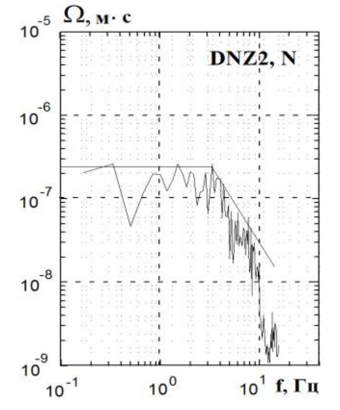
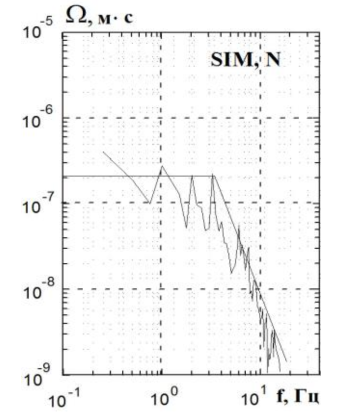
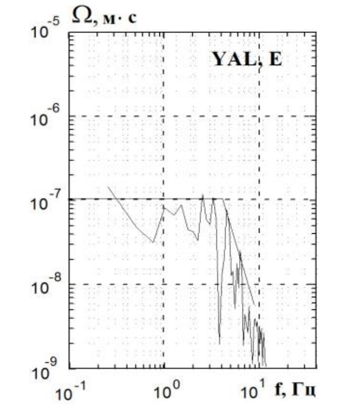
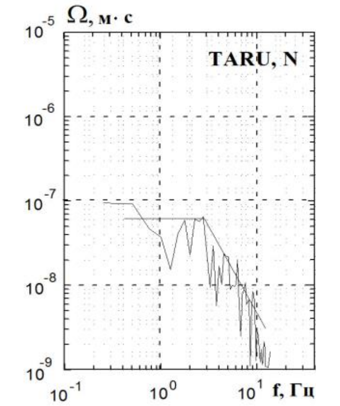
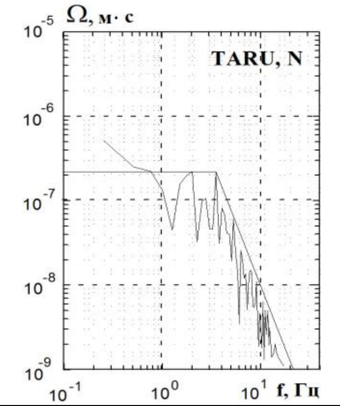
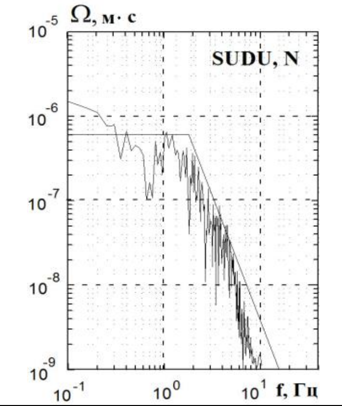
Рис. 2. Примеры записей землетрясений 2020 г.: *а* — 15 марта с $K_П$ = 11.3 (с/ст. «Тарханкут», Δ = 372 *км*); *б* — 8 апреля с $K_П$ = 7.9 (с/ст. «Севастополь», Δ = 120 *км*)

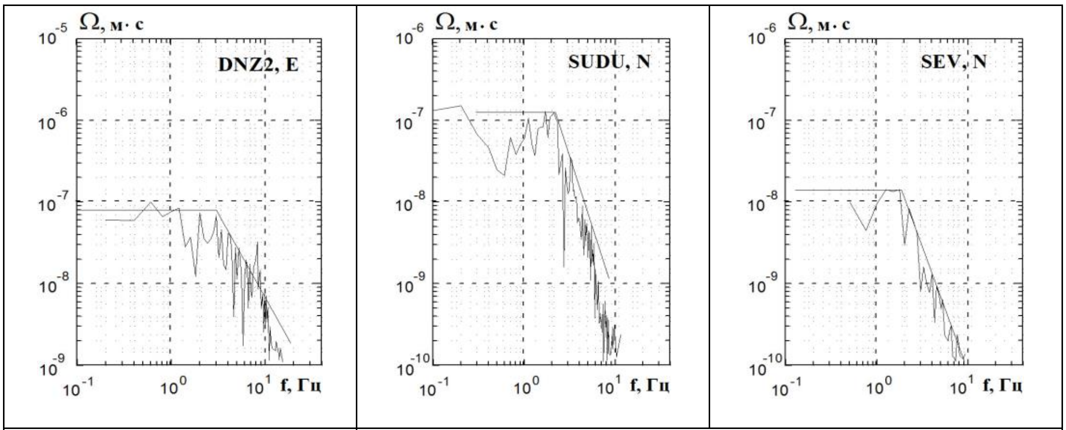
2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ

Методика расчета, обработки и интерпретации амплитудных спектров подробно описана в работе [4] и не изменилась по сравнению с предыдущими годами [2, 3 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 для продольных (*P*) — по вертикальной компоненте (Z). Относительная длительность $\boldsymbol{\tau}$ исследуемого участка записи принята равной интервалу времени от момента вступления *S*- и *P*-волн до времени спада максимальных амплитуд A_{max} на уровень $^1/_3$ A_{max} [4]. Спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье.

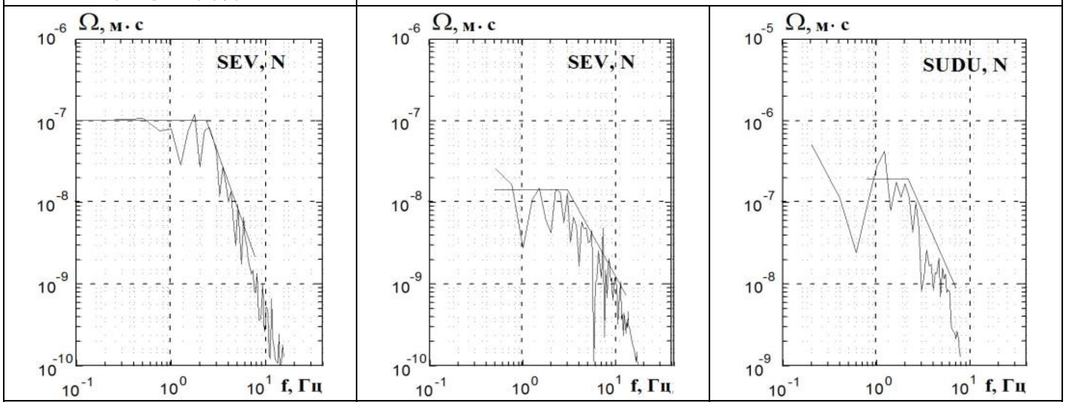
Интерпретация амплитудных спектров выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [5]. Согласно данной модели (ω^{-2}), амплитудный спектр сейсмических колебаний почвы характеризуется основными параметрами: спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ в длиннопериодной части спектра (при $f \rightarrow 0$) и угловой частотой f_0 (ω_0), при которой начинается спад низкочастотной части спектра. При этом спад спектральных амплитуд в сторону высоких частот должен происходить по квадратичному закону (угол наклона γ~ — 2 0). Преобладающее большинство рассчитанных в 2020 г. спектров объемных волн удовлетворительно аппроксимируются в рамках теоретической модели Бруна. Те, немногочисленные случаи, когда форма амплитудного спектра отклонялась от данной модели, были отбракованы и не использованы для расчета динамических параметров очагов. Примеры амплитудных спектров по разным станциям, составляющим записи, и типам волн приведены на рис. 3.

На спектрах прямыми линиями показана их аппроксимация в рамках использованной теоретической модели Бруна.

<table>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>(№1) 12 марта, $06^h15^m16.0^s$</td>
<td>(№2) 12 марта, $13^h21^m40.5^s$</td>
<td>(№3) 15 марта, $05^h36^m01.1^s$</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">(№3) 15 марта, $05^h36^m01.1^s$</td>
<td>(№4) 01 апреля, $16^h11^m40.8^s$</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>(№5)08 апреля, $12^h12^m42.7^s$</td>
<td colspan="2">(№6)12 апреля, $02^h31^m06.6^s$</td>
</tr>
</table>



(№6)12 апреля, $02^h31^m06.6^s$ | (№7)1 июня, $13^h25^m13.8^s$



(№8) 28 августа, $14^h20^m51.0^s$ | (№10) 27 октября, $02^h08^m45.3^s$ | (№11) 12 декабря, $14^h54^m24.9^s$

Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2020 г. 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 Бруна [5] используются две главные характеристики амплитудных спектров: спектральная плотность Ω_0, которая пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 и угловая частота f_0, прямо связанная с размером круговой дислокации r_0 (формулы 1, 2):

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

где Ω_0 — максимальное значение спектральной плотности при $\omega \to 0$; V — скорость распространения объемной волны; ρ – плотность пород в окрестности очага, $R_{\theta\varphi}$ —

направленность излучения из очага на станцию регистрации; $G(\Delta, h)$ — поправка за геометрическое расхождение; C (ω) — частотная характеристика среды под станцией, $Sm(f)$ – поправка за неупругое затухание в мантии.

$$r_0 = 2.34 \frac{V}{2\pi f_0} \tag{2}$$

Параметры модели среды в окрестности очага выбирались в зависимости от глубины гипоцентра рассматриваемого землетрясения.

Поправка за направленность излучения $R_{\theta\varphi}$ была принята одинаковой на все сейсмические станции, равной 0.4 [4], поскольку для землетрясений 2020 г. решение механизма очагов, из которого определяются поправки $R_{\theta\varphi}$, к настоящему времени не получены.

Методика перехода от станционного спектра к спектру источника подробно изложена в работах [6, 7] и не изменилась по сравнению с предыдущими годами. Все формулы для расчета других динамических параметров очагов: сброшенного напряжения $\Delta\sigma$, величины деформации сдвига ε, кажущегося напряжения $\eta\bar{\sigma}$, величины радиационного трения $\Delta\sigma_r$, средней подвижки по разрыву $\bar{U}$ (или величина дислокации), энергии образования дислокации в очаге E_U и моментной магнитуды Mw приведены в [3] по работам [5–9].

Для большинства землетрясений динамические параметры получены по группе независимых станционных определений (табл. 2). Для сравнительно сильного представительного землетрясения № 8 с $K_П = 9.3$, произошедшего в северо-западной части Крыма (район № 8), пригодными для построения спектров оказались записи только *S*-волн на одной, ближайшей к очагу станции «Севастополь», расположенной на эпицентральном расстоянии $\Delta = 140$ *км*. Для трех слабых сейсмических толчков (№№ 1, 2 и 9) с энергетическим классом $K_П = 5.2–7.1$ из Алуштинской зоны (район № 3) динамические параметры восстановлены также только по одной ближайшей станции «Алушта».

Вычисление средних значений параметров (***S***) и стандартных отклонений (δS) выполнено по индивидуальным станционным определениям с учетом логнормального закона распределения величин с соответствующим стандартным отклонением [4]. Станционные значения 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 $\eta\bar{\sigma}$ по формуле [8]:

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

Среднее значение моментной магнитуды Mw определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью. В таблице 2 отмечено (Mw*).

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

Таблица 2.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2020 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*	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, *м*	$\eta\sigma \cdot 10^5$, *Па*	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, *Па*	$Eu \cdot 10^8$, *Дж*	*Mw*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№1. 12 марта, t_0=06 *ч* 15 *мин* 16.0 *с*; φ=44.59°, λ=34.45°; *h*=14 *км*; $K_П$=7.1															
ALU	S	N+E	11		0.2	3.5	1.17	0.36	1.08	3.61	0.01	0.4	0.14	0.21	2.65
№2. 12 марта, t_0=13 *ч* 21 *мин* 40.5 *с*; φ=44.54°, λ=34.44°; *h*=7 *км*; $K_П$=5,2															
ALU	P	Z	16	0.0025		7.1	0.06	0.29	0.11	0.38	0.008	0.24	-0.19	0.001	1.8
ALU	S	N+E	16		0.035	5.2	0.13	0.21	0.57	1.92	0.03	0.12	0.17	0.012	2.0
S – среднее значение							**0.09**	**0.25**	**0.25**	**0.85**	**0.02**	**0.17**	**-0.05**	**0.003**	**1.9**
δ*S* – стандартное отклонение							0.17	0.07	0.36	0.35	0.29	0.15		0.54	0.1
№3. 15 марта, t_0=05 *ч* 36 *мин* 01.1 *с*; φ=44.60°, λ=37.14°; *h*=42 *км*; $K_П$=11.3															
SUDU	P	Z	172	0.18		3.7	216	0.83	16.5	27.5	1.66	12.4	-4.15	297	4.16
ALU	P	Z	216	0.06		3.9	89.1	0.79	7.98	13.3	0.76	30.1	-26.1	59.2	3.9
KERU	P	Z	95	0.2		3.9	118	0.79	10.5	17.5	1.0	22.8	-17.5	103	3.98
KERU	S	N+E	95		1.7	2.7	160	0.62	29.7	49.4	2.22	16.9	-1.92	396	4.07
YAL	P	Z	238	0.08		3.95	131	0.78	12.2	20.3	1.15	20.5	-14.4	133	4.01
YAL	S	N+E	238		0.45	2.6	120	0.64	19.9	33.2	1.55	22.2	-12.3	200	3.99
TARU	S	N+E	372		0.4	2.6	162	0.64	26.8	44.7	2.09	16.5	-3.14	362	4.08
DNZ2	S	N+E	321		0.5	2.6	175	0.64	29.0	48.4	2.26	15.3	-0.76	425	4.1
SIM	P	Z	242	0.1		3.9	138	0.79	12.4	20.6	1.18	19.4	-13.2	142	4.03
SIM	S	N+E	242		0.72	2.8	159	0.60	32.9	54.9	2.38	16.8	-0.35	437	4.07
SEV	S	N+E	274		0.19	2.8	57.1	0.60	11.9	19.7	0.85	47.0	-41.1	56.1	3.77
S – среднее значение							**132**	**0.7**	**17.1**	**28.5**	**1.44**	**20.4**	**-11.9**	**188**	**4.02**
δ*S* – стандартное отклонение							0.05	0.02	0.06	0.06	0.05	0.03		0.1	0.07
№4. 1 апреля, t_0=16 *ч* 11 *мин* 40.8 *с*; φ=44.62°, λ=36.14°; *h*=25 *км*; $K_П$=9.0															
SUDU	P	Z	95	0.01		4	2.03	0.58	0.45	1.5	0.06	10.5	-10.3	0.15	2.81
SUDU	S	N+E	95		0.3	2.8	11.6	0.48	4.63	15.4	0.54	1.83	0.49	8.97	3.31
YAL	S	N+E	159		0.15	2.7	9.47	0.50	3.38	11.3	0.41	2.24	-0.55	5.34	3.25
S – среднее значение							**6.1**	**0.52**	**1.96**	**6.4**	**0.24**	**3.5**	**-2.52**	**1.93**	**3.12**
δ*S* – стандартное отклонение							0.24	0.03	0.31	0.32	0.3	0.24		0.56	0.2
№5. 8 апреля, t_0=12 *ч* 12 *мин* 42.7 *с*; φ=45.47°, λ=32.89°; *h*=25 *км*; $K_П$=7.9															
DNZ2	P	Z	28	0.008		5.0	0.62	0.47	0.27	0.9	0.03	3.05	-2.9	0.03	2.46
DNZ2	S	N	28		0.045	3.1	0.67	0.43	0.36	1.2	0.038	2.84	-2.66	0.04	2.49
TARU	S	N+E	30		0.06	3.1	0.91	0.43	0.49	1.65	0.052	2.07	-1.82	0.075	2.58
S – среднее значение							**0.72**	**0.44**	**0.36**	**1.21**	**0.04**	**2.62**	**-2.44**	**0.05**	**2.51**
δ*S* – стандартное отклонение							0.05	0.013	0.07	0.08	0.07	0.05		0.12	0.05

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№6. 12 апреля, t_0=02 *ч* 31 *мин* 06.6 *с*; φ=43.75°, λ=31.06°; *h*=35 *км*; $K_П$=10.4															
SUDU	P	Z	337	0.05		3.0	52.7	0.94	3.26	10.9	0.75	3.8	-2.17	34.1	3.8
SUDU	S	N+E	337		0.65	2.0	102	0.71	12.6	41.9	2.16	2.34	3.95	213	3.94
YAL	S	N+E	260		0.15	2.2	18.1	0.64	2.98	9.93	0.47	13.1	-11.7	9.0	3.44
SIM	P	Z	277	0.01		2.9	10.3	0.98	0.49	1.62	0.12	23.1	-22.8	0.84	3.28
SIM	S	N+E	277		0.8	2.0	103	0.71	12.7	42.5	2.19	2.31	4.06	219	3.95
SEV	S	N+E	226		0.2	3.1	21.1	0.67	3.02	10.1	0.49	11.3	-9.8	10.6	3.49
DNZ2	S	N+E	249		0.15	2.9	17.4	0.49	6.53	21.8	0.77	13.7	-10.5	18.9	3.43
TARU	S	N+E	214		0.25	2.8	25.1	0.51	8.5	28.3	1.04	9.5	-5.25	35.5	3.54
ALU	S	N+E	285		0.5	2.15	66.6	0.66	10.2	34.0	1.63	3.58	1.52	113	3.82
S – среднее значение							**34.2**	**0.68**	**4.78**	**15.9**	**0.8**	**6.8**	**-4.41**	**27.7**	**3.63**
δ*S* – стандартное отклонение							0.12	0.03	0.15	0.15	0.13	0.12		0.26	0.22
№7. 1 июня, t_0=13 *ч* 25 *мин* 13.8 *с*; φ=45.25°, λ=37.70°; *h*=9 *км*; $K_П$=9.4															
SUDU	P	Z	216	0.015		3.8	5.9	0.59	1.27	4.23	0.18	7.19	-6.55	1.25	3.12
SUDU	S	N+E	216		0.12	2.2	8.58	0.58	1.97	6.56	0.27	4.94	-3.95	2.92	3.23
SEV	S	N+E	326		0.02	2.2	3.59	0.58	0.83	2.75	0.12	11.8	-11.4	0.49	2.97
S – среднее значение							**5.66**	**0.58**	**1.28**	**4.24**	**0.18**	**7.48**	**-6.84**	**1.21**	**3.11**
δ*S* – стандартное отклонение							0.1	0.002	0.1	0.1	0.1	0.11		0.22	0.09
№8. .28 августа, t_0=14 *ч* 20 *мин* 51.0 *с*; φ=44.31°, λ=31.95°; *h*=19 *км*; $K_П$=9.3															
SEV	S	N+E	140		0.15	2.3	8.3	0.58	1.83	6.11	0.26	3.62	-2.7	2.53	3.22
№9. 24 октября, t_0=08 ч 40 *мин* 26.5 *с*; φ=44.68°, λ=34.45°; *h*=13 *км*; $K_П$=6.2															
ALU	S	N+E	4		0.1	4.1	0.44	0.31	0.65	2.18	0.05	0.19	0.13	0.05	2.37
№10. 27 октября, t_0=02 *ч* 08 *мин* 45.3 с; φ=44.64°, λ=34.48°; *h*=14 *км*; $K_П$=8.2															
SIM	P	Z	45	0.032		5.8	2.77	0.39	2.12	7.07	0.2	1.36	-0.3	0.98	2.9
SIM	S	N+E	45		0.1	3.3	1.58	0.38	1.22	4.06	0.11	2.4	-1.8	0.32	2.74
SEV	S	N+E	64		0.025	3.25	0.54	0.39	0.4	1.33	0.04	6.98	-6.78	0.04	2.43
SUDU	S	N+E	50		0.2	3.2	3.45	0.40	2.43	8.11	0.23	1.1	0.12	1.4	2.96
YAL	S	N+E	30		0.1	3.35	1.1	0.38	0.9	2.97	0.08	3.43	-2.99	0.16	2.63
S – среднее значение							**1.55**	**0.39**	**1.18**	**3.91**	**0.11**	**2.44**	**-1.85**	**0.3**	**2.73**
δ*S* – стандартное отклонение							0.14	0.004	0.14	0.14	0.14	0.14		0.28	**0.16**
№11. 12 декабря, t_0=14 *ч* 54 *мин* 24,9. *с*; φ=44.65°, λ=37.31°; *h*=25 *км*; $K_П$=10.1															
SUDU	P	Z	183	0.1		3.0	47.8	0.78	4.48	14.9	0.84	2.97	-0.73	35.7	3.72
SUDU	S	N+E	183		0.45	1.9	41.1	0.71	5.12	17.1	0.88	3.45	-0.89	35.1	3.68
ALU	P	Z	228	0.05		3.1	19.9	0.75	3.09	10.3	0.56	4.75	-3.2	15.4	3.59
ALU	S	N+E	228		0.6	1.8	68.6	0.74	7.36	24.2	1.31	2.07	1.6	83	3.83
SEV	S	N+E	286		0.12	1.95	22.7	0.69	3.06	10.5	0.51	6.25	-4.72	11.6	3.51
S – среднее значение							**36**	**0.73**	**4.37**	**14.6**	**0.77**	**3.63**	**-1.45**	**28.4**	**3.67**
δ*S* – стандартное отклонение							0.1	0.01	0.07	0.07	0.07	0.08		0.15	0.09

Примечание: $\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, *м ·с — спектральная плотность по полному вектору колебаний поперечной волны.*

4. ОБСУЖДЕИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как и в предыдущие годы [2, 3], наилучшая сходимость станционных определений, получена для радиуса круговой дислокации r_0, со стандартным отклонением индивидуальных определений $\delta r_0 \leq 0.07$. 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, отклонение δE_U было максимальным. Значения моментных магнитуд Mw определены преимущественно с погрешностью не выше ± 0.1. Исключение составляет только Mw с погрешностью ± 0.22 для землетрясения 12 апреля (№ 6) в основном за счет существенно заниженного значения Mw для продольной волны по станции «Симферополь». Практически все динамические параметры, восстановленные по этой станции (составляющая Z), также значительно отличаются от станционных определений по другим станциям и типам волн. Вероятно, это связано с влиянием реальной направленности излучения продольных волн из очага на данную станцию, отличающуюся от средней по всем направлениям. Как было отмечено выше, без знания механизма очага средняя поправка за направленность излучения $R_{\theta\varphi}$ принимается $R_{\theta\varphi}$ =0.4 для всех типов волн и станций [4].

Радиационное трение $\Delta\sigma_r$ для большинства исследованных землетрясений имело отрицательное значение, связанное с неравномерным распределением прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах [8]. Во всем диапазоне энергий средняя величина сброшенных напряжений не превысила $\Delta\sigma=17.1\cdot10^5$ *Па* (17 *бар*), а кажущихся напряжений $\eta\overline{\sigma} < 20.4\cdot10^5$ *Па* (20 *бар*).

Как и в 2019 г. [3], проведем сравнение полученных в 2020 г. динамических параметров очагов: сейсмического момента M_0 , радиуса круговой дислокации r_0 и сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ со средними их долговременными величинами (рис. 4). Для сравнения использованы зависимости $M_0(K_П)$, $r_0(K_П)$ и $\lg \Delta\sigma(K_П)$ из [10,11]:

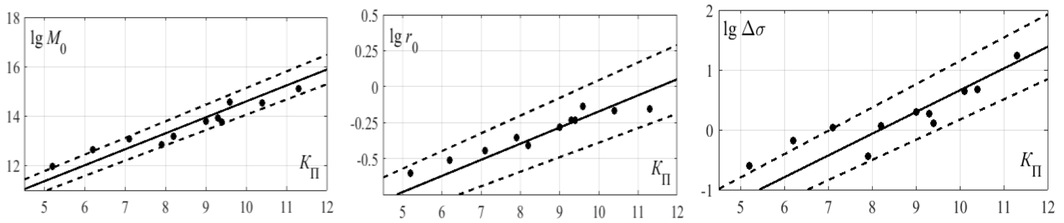
$$\lg M_0 = 0.645(\pm0.027)\, K_П + 15.142(\pm0.271), \qquad \rho=0.99,$$

$$\lg r_0 = 0.112(\pm0.011)\, K_П - 1.293(\pm0.107), \qquad \rho=0.93,$$

$$\lg \Delta\sigma = 0.363(\pm0.026)\, K_П - 2.97(\pm0.23), \qquad \rho=0.8$$

где ρ – коэффициент корреляции.

Как видно из рис. 4 значения сейсмических моментов M_0, радиусов круговой дислокации r_0 для очагов землетрясений за 2020 г. укладываются в диапазон доверительного интервала долговременных зависимостей $M_0(K_П)$, $r_0(K_П)$, полученных за длительный интервал времени аналоговой регистрации сейсмических колебаний (рис. 4*а*, *б*). Величины сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ для большинства землетрясений 2020 г. также не выходят за пределы доверительного интервала регрессии $\Delta\sigma(K_П)$, построенной для периода цифровой регистрации за период 2007–2017 г. [11]. Несколько выше долговременной зависимости $\Delta\sigma(K_П)$ лежат точки $\Delta\sigma$ для двух наиболее слабых толчков с $K_П \leq 6.5$ (рис. 4*в*). Ранее было показано, что сброшенные напряжения существенно меняются как в пространстве, так и во времени при одном энергетическом уровне [11,12].



а ***б*** ***в***

Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2020 г.: ***а*** — сейсмического момента M_0, ***б*** — радиуса круговой дислокации r_0 и ***в*** — сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ с долговременными зависимостями $M_0(K_П)$, $r_0(K_П)$ [10] и $\Delta\sigma(K_П)$ [11]. Пунктиром обозначены пределы погрешностей долговременных зависимостей.

Наибольшие отличия r_0 от долговременных параметров получены для самых слабых землетрясений 12 марта (№ 2) и 24 октября (№ 9) с $K_П$ =5.2 и 6.2, параметры которых восстановлены только по одной станции ALU. Не исключены также ошибки при выборе скоростных моделей среды, т. к. для слабых очагов менее надежно определяется глубина очага и, соответственно, скоростные характеристики в окрестности очаговой зоны, используемые в расчетах r_0.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В 2020 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 [4, 13].

Методика и алгоритм расчета, а также интерпретации энергетических спектров описаны в работах [4, 14].

Для построения спектров было отобрано 10 землетрясений, в диапазоне энергетических классов $K_П$=5.2–7.1, произошедших в Алуштинской очаговой зоне (район № 3) на эпицентральных расстояниях Δ=4–27 *км* от сейсмической станции «Алушта». Для более точного определения диапазона частот, на которые приходится максимум плотности сейсмической энергии q_{max}, энергетические спектры сглаживались скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот, как рекомендовано в работе [14]. Всего по данным станции «Алушта» рассчитано 30 энергетических спектров землетрясений за 2020 г. (таблица 3).

Таблица 3.

Параметры энергетических спектров по данным станции «Алушта»

Дата	Время в очаге *ч мин*	$K_{П}$	Δ, *км*	*fqmax, Гц*			δ *fq* ($f_1 - f_2$), *Гц*		
				Z	N	E	Z	N	E
11.01.2020	14 56	5.3	11	8.3	4.6	4.6	2.5-9.1	2.2-7	3.2-6.9
12.03.2020	06 15	7.1	11	5.86	4.7	3.68	3.33-8.4	2.66-5.9	2.24-5.7
12.03.2020	13 21	5.2	16	6.7	4.6	5.76	3.7-9.2	2.5-7.1	2.4-7.1
12.03.2020	22 18	5.4	17	6.7	4.44		3.3-9.2	2.7-6.6	3.2-6.46
21.03.2020	19 29	5.8	20	2.49	4.7	4.44	2.3-8.25	3.1-6.76	2.2-7.8
16.08.2020	05 46	5.9	4	8.2	5.86	4.44	5.62-9	2.1-7.1	2.72-6.76
06.10.2020	19 00	6.1	26	2.5	4.7	4.4	1.1-8.3	3.5-5.9	2.75-6.1
24.10.2020	08 40	6.2	4	8.25	4.1	2.72	5.1-9.5	3-6.7	1.9-4.7
08.11.2020	13 49	5.4	4	2.49	4.44	4.1	1.7-8.3	2.72-7.8	1.58-6.68
29.12.2020	21 33	5.5	5	6.68	4.45	3.33	4.1-8.7	3.23-6.6	2.5-5.86

Примеры энергетических спектров, представленные в билогарифмической системе координат, даны на рис. 5.

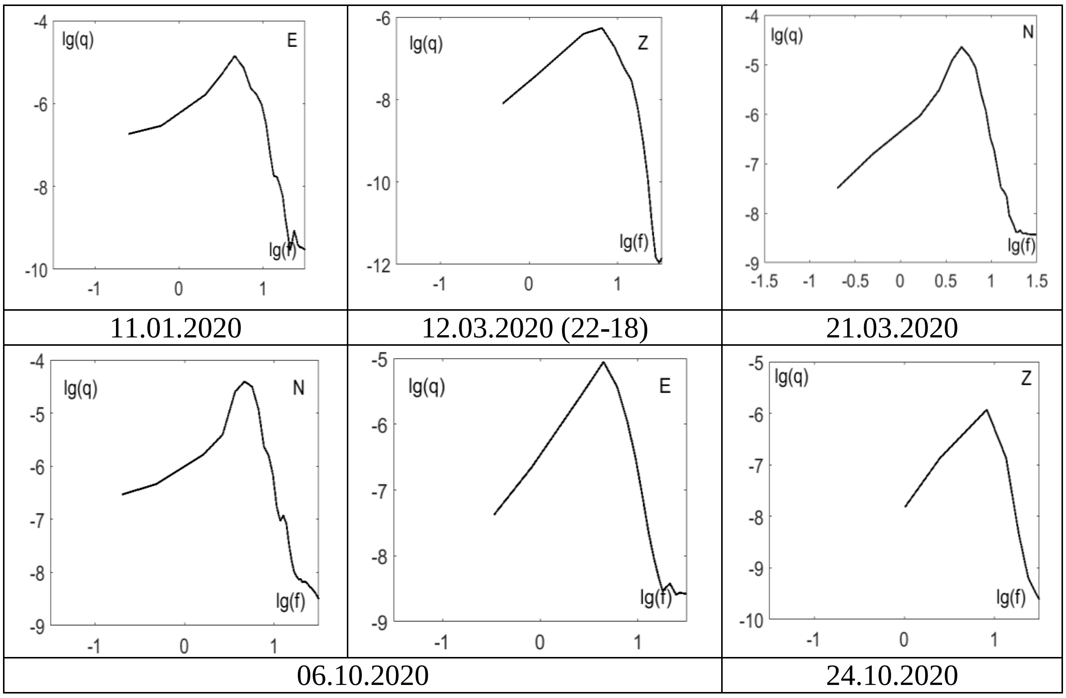


Рис. 5. Примеры энергетических спектров землетрясений 2020 г. по разным составляющим записи на станции «Алушта». Даты землетрясений по табл. 3.

Для всех энергетических спектров по трем компонентам записи (рис. 5) характерна резонансная форма с выраженным максимумом плотности энергии q_{max} в ограниченной области частот (fq_{max}).

Диапазон ширины максимума спектра δfq на уровне 0.75 от максимального значения q_{max} в высокочастотной (f q1) и низкочастотной (fq2) части спектра: δf q = (fq1– fq2) получился различным, для разного энергетического уровня землетрясений и эпицентрального расстояния (табл. 3).

Ранее [13, 15], имеющаяся статистика по энергетическим спектрам землетрясений, была разделена на несколько групп, отличающихся эпицентральными расстояниями до станции «Алушта». Наиболее многочисленной оказалась достаточно компактная группа с Δ=23±3 *км*, которая пополнилась еще 4 землетрясениями за 2020 г. с Δ=16–27 *км* (табл. 3). Для этих очагов максимумы fq_{max} приходятся на диапазон частот от 4.4 *Гц* до 5.8 *Гц* для поперечных N и E-компонент, что в пределах погрешностей попадает в интервал значений fq_{max} = (4.7±0.3) *Гц* для данной группы [13, 15]. Уточненные значения параметров энергетических спектров группы очагов с Δ=23±3 *км* представлены в таблице 4.

Остальные шесть слабых сейсмических событий ($K_П$=5.4-6.3), произошедших в непосредственной близости к сейсмостанции «Алушта» (Δ=4–11*км),* не попали в ранее выделенные группы. В связи с этим, с учетом единичных значений за 2018 и 2019 гг., дополнительно создана новая группа (первая) с Δ=7±3 *км* (табл. 4). Значения максимальных частот энергетических спектров fq_{max} для землетрясений из данной группы получились равными 4.3±0.6 *Гц* для горизонтальных N- и E-компонент и 6.3±2 *Гц* — для вертикальной Z-компоненты. Сводная характеристика спектральных параметров энергетических спектров, для семи групп очагов землетрясений, выделенных по состоянию на 2020 г., представлена в таблице 4.

Таблица 4.

Средние значения параметров энергетических спектров fq_{max} и δfq по данным станции «Алушта» за период 2014-2020 гг. для разных эпицентральных расстояний

Груп-па	$K_П$	Δ, *км*	fq_{max}, *Гц*			δfq (f_1 - f_2), *Гц*		
			Z	N	E	Z	N	E
1	5.4-6.3	7±3	6.6±1.6	4.2±0.7	4.4±0.5	6.4±0.6	4.3±0.6	4.3±0.5
2	5.2-9.8	23±3	5.5±1.1	4.4±0.3	3.6±0.9	5.8±0.6	4.7±0.3	4.1±0.5
3	7.2-11.2	46±3	5.4±0.3	3.3±0.3	5.9±0.5	4.85±0.2	5.4±0.3	3.3±0.3
4	7.7-10.1	85±15	5.1±0.6	4±0.7	3.8±0.8	5±0.4	4.1±0.5	3.2±0.4
5	8.7-10.8	167±13	5.4±0.9	3.2±0.8	2.5±1.1	5.2±0.6	4±0.5	3.4±0.8
6	8.5-11.6	243±22	4.7±0.9	3.1±0.7	2.5±0.9	4±1	3.7±0.8	3±0.8
7	10.9-13.1	374±39				2.4	3.5	2.6±0.2

Несмотря на вариации индивидуальных спектров рассмотренных групп очагов и разных уровней $K_П$ (табл. 4), общий диапазон fq_{max} и ширины спектра δf, находится в достаточно ограниченном интервале значений. Качественно можно отметить естественную тенденцию к преобладанию высокочастотных спектров для слабых толчков и близких эпицентральных расстояний.

Предварительно получена корреляционная связь уменьшения значений $fq max$ с ростом расстояний Δ для энергетических спектров *P*-волн (3) и *S*-волн (4) [15]:

$$Lg\, fq\, max = (0.875 \pm 0.012) - (0.085 \pm 0.006) \cdot Lg\, \Delta, \quad \rho = 0.99 \qquad (3)$$

$$Lg\, fq\, max = (0.701 \pm 0.01) - (0.108 \pm 0.06) \cdot Lg\, \Delta\,, \quad \rho = 0.99 \qquad (4)$$

Подобная тенденция отмечена и для ширины спектра δfq.

Известно, что спектральный состав колебаний сейсмических волн существенно меняется не только с расстоянием вследствие поглощения и рассеяния высоких частот в неоднородной среде, но и зависит от излученной энергии в очаге (энергетического уровня землетрясений). К настоящему времени количественно оценить взаимосвязь δfq одновременно с увеличением энергетического уровня и эпицентрального расстояния не представляется возможным, вследствие недостаточности статистически значимого материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма за 2020 год изучены как по амплитудным, так и энергетическим спектрам. Специализированная база данных по динамическим параметрам очагов дополнена 44 станционными определениями для 11 сейсмических событий в диапазоне энергетических классов $K_П$=5.2÷11.3, произошедших в различных районах региона на эпицентральных расстояниях от 4 *км* (станция ALU) до 372 *км* (станция TARU). Средние значения динамических параметров очагов землетрясений 2020 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 соответствие долговременным зависимостям от энергетического уровня землетрясений.

Статистика по частотному составу сейсмических колебаний, несущих на себе максимальную сейсмическую энергию, дополнена данными для десяти относительно слабых землетрясений по записям станции «Алушта» для уточнения системы энергетических спектров, полученной ранее по данным за период 2014–2015 гг. [13]. В результате выделена новая группа спектров для эпицентральных расстояний Δ = 7±3 *км* и дополнена статистика по второй группе с Δ = 23±3 *км*.

С учетом энергетических спектров за 2014, 2015, 2018–2019 [2, 3, 13] и новых определений за 2020 гг., выделено 7 групп землетрясений по близким эпицентральным расстояниям до станции «Алушта».

Предварительно получена корреляционная связь уменьшения значений $fq max$ энергетических спектров *P*- и *S*-волн с ростом расстояний Δ.

Исследования будут продолжены с целью получения статистических данных, достаточных для расчета корреляционных соотношений $fq max$ (Kп, Δ), δf q(Kп, Δ) и построения региональных систем энергетических спектров для прогноза спектральных параметров сильных сейсмических воздействий.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э., Бондарь М. Н. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2019 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2020, Том 6 (72), № 4. С. 67–85.
4. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
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. 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.
7. 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.
8. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
9. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 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. Материалы Международной конференции. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 238–242.
11. Пустовитенко Б. Г. Эреджепов Э. Э**.** Изучение напряжений и деформаций в очаговых зонах землетрясений Крыма по спектрам записей сейсмических волн. Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Шестой молодежной тектонофизической школы-семинара (под ред. Ю. Л. Ребецкого). Москва: ИФЗ РАН, 2019. С. 193–198.
12. Пустовитенко Б. Г., Мержей Е. А., Пустовитенко А. А. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по данным цифровых сейсмостанций // Геофизический журнал. 2013**.** № 5. С. 172–186.
13. 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. Москва: Наука, 1984. 180 с.
15. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Исследование спектральных свойств землетрясений Крыма по энергетическим спектрам. Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С.75.

SPECTRAL AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE FOCI OF 2020 CRIMEAN EARTHQUAKES

Pustovitenko B. G. [1]***, Eredzhepov E. E.*** [1,2]***, Bondar M. N*** [1,2]

[1-] ***State Autonomous Institution "Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities"***

[2-] ***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, $\Delta\sigma$, ε, $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, $\bar{u}$, Eu и Mw) of 11 Crimean earthquakes in 2020 in the range of energy classes K_Π = 5.2–11.3 are presented. The earthquakes occurred in different regions of the region at epicentral distances from 4 km (ALU station) to 372 km (TARU 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. 70 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 2020 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 2020 preliminary identified 7 groups of earthquakes at close epicentral distances to the station «Alushta». On a qualitative level, a shift of the spectrum maximum (fqmax) towards higher frequencies for weak energy shocks and close epicentral distances was noted. A preliminary correlation was obtained between the decrease in the values of fqmax of the energy spectra of P- and S-waves with increasing distances Δ. To establish quantitative dependences of the values of the parameters of the energy spectra *f*q*max* and δ*f*q 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

1. 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. M.: IFZ AN SSSR. 1974. V. 2, pp. 113–125 (in Russian).
2. 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).
3. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., Bondar' M. N. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2019 goda (Spectral and dynamic parameters of the centers of Crimea earthquakes in 2019). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. V. 6 (72), no 4, 2020. pp. 67–85 (in Russian).
4. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma (Spectral and focal parameters of Crimea earthquakes). Kiev: Naukova dumka, 1990. 251 p. (in Russian).
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. 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).

7. 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).
8. Kostrov B. V. Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya (The mechanics of the source of a tectonic earthquake). M.: Nauka, 1975. 179 p. (in Russian).
9. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale. J. Geophys. Res. 1979, V. 84. no 35, pp. 2348–2350.
10. 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).
11. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Izuchenie napriazhenii i deformatsii v ochagovykh zonakh zemletriasenii Kryma po spektram zapisei seismicheskikh voln (Study of stresses and deformations in focal zones of earthquakes in Crimea based on spectra of seismic wave records). Sovremennaia tektonofizika. Metody i rezul'taty. Materialy Shestoi molodezhnoi tektonofizicheskoi shkola-seminara (pod red. Iu.L. Rebetskogo). M.: IFZ RAN. 2019, pp. 193–198. (in Russian).
12. 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).
13. 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). M.: Nauka, 1984. 180 p. (in Russian).
15. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Issledovanie spektral'nykh svoistv zemletriasenii Kryma po energeticheskim spektram (Investigation of the spectral properties of the Crimean earthquake by energy spectra). Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A. A. Malovichko. Obninsk: GS RAN. 2021, 75 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 10.11.2021 г.