

УДК 550.348.435

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

Пустовитенко Б. Г.¹, Эреджесов Э. Э.², Бондарь М. Н.³

^{1,2,3}ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», Симферополь, Республика Крым, Россия.

^{2,3}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 амплитудных и энергетических спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2021 год в диапазоне энергетических классов $K_{\Pi}=7.0-10.2$. Для 12 землетрясений по амплитудным спектрам восстановлены динамических параметров очагов (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \bar{u} , E_0 и Mw) с использованием теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}). Основу определения динамических параметров очагов составили 116 амплитудных спектров по записям 8 региональных цифровых станций Крыма. Спектральные свойства очагов 8 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 круговой дислокации, сброшенное и кажущееся напряжения, подвижка по разрыву, радиационное трение, энергетический спектр.

ВВЕДЕНИЕ

В 2021 году в Крыму зарегистрировано 96 местных землетрясений в диапазоне энергетических классов $K_{\Pi}=4.6-10.2$, из которых только 16 с $K_{\Pi} \geq 9.0$ относятся к представительным для всего региона. Для всех зарегистрированных землетрясений определены их основные параметры, но дополнительные параметры такие, как спектральные и динамические характеристики очагов стало возможным получить только для ограниченного из них числа в связи с жесткостью отбора исходных данных и сложностью интерпретации. Для исследования выбрано девять наиболее значимых представительных землетрясений в диапазоне $K_{\Pi}=8.7-10.2$ и три сравнительно слабых с $K_{\Pi}=7.0-7.4$, представляющих особый интерес, т. к. одно из них произошло в слабоизученном Северо-Западном районе и два – вблизи побережья Крыма. Как и в предыдущие годы [1, 2] спектральные свойства 8 землетрясений рассмотрены также по энергетическим спектрам объемных сейсмических волн, зарегистрированных на сейсмической станции «Алушта».

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчета амплитудных спектров Фурье и определения на их основе динамических параметров очагов землетрясений использованы записи волновых форм продольных и поперечных сейсмических волн, отвечающие критериям высокого качества: четкие (i) моменты вступления объемных волн, амплитуды полезного сигнала превышают фон помех в 2 и более раза. Примеры двух из 116 отобранных сейсмограмм даны на рис. 1.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

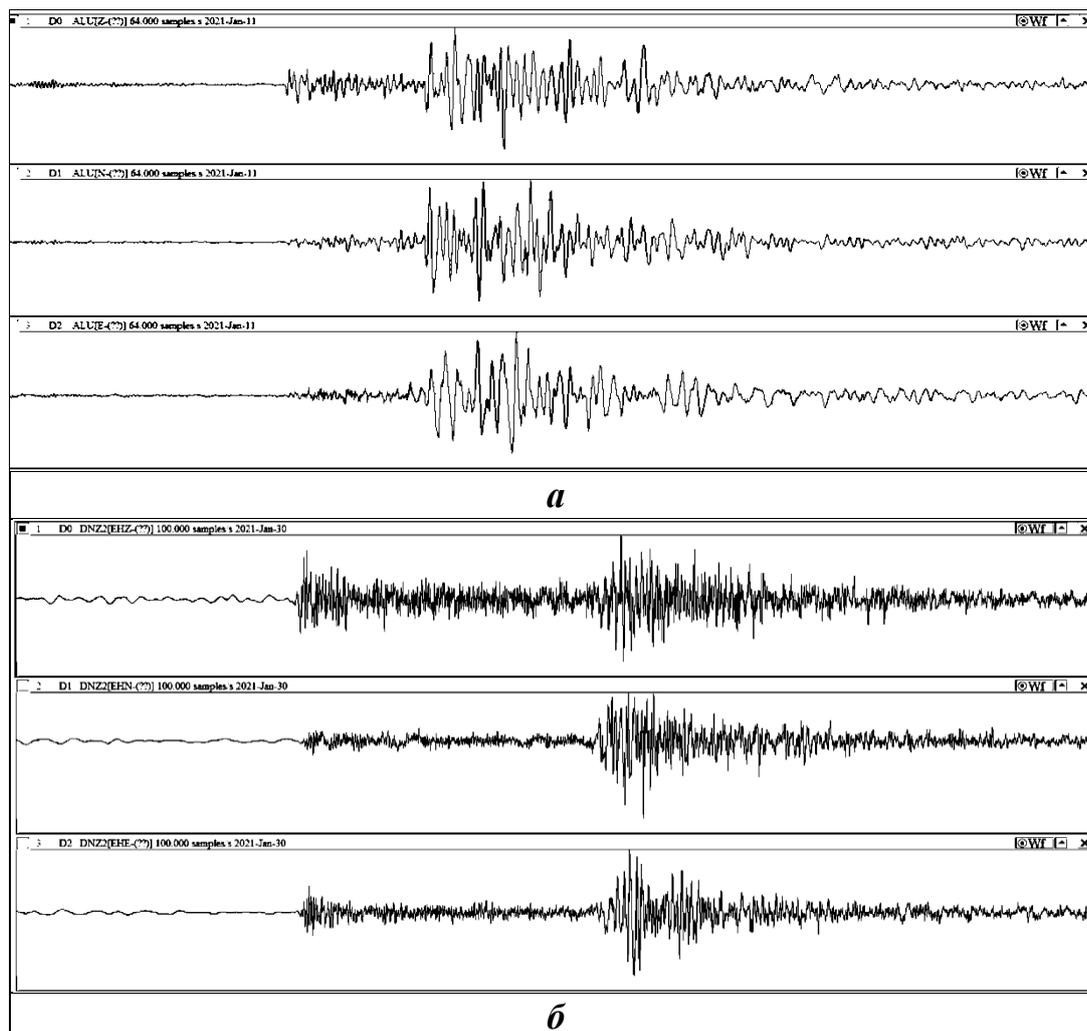


Рис. 1. Примеры записей землетрясений 2021 г.: а – 11 января с $M_w = 8.8$ (с/ст. «Алушта», $\Delta = 31$ км); б – 30 января с $M_w = 9.4$ (с/ст. «Донузлав», $\Delta = 134$ км). Компоненты сейсмограмм: Z, N-S, E-W расположены последовательно сверху вниз.

Основные параметры 12 землетрясений 2021 г., для которых исследованы спектральные и динамические параметры очагов приведены в таблице 1 по данным сводной обработки в Крыму. Пространственное распределение эпицентров изученных землетрясений показано на рис. 2.

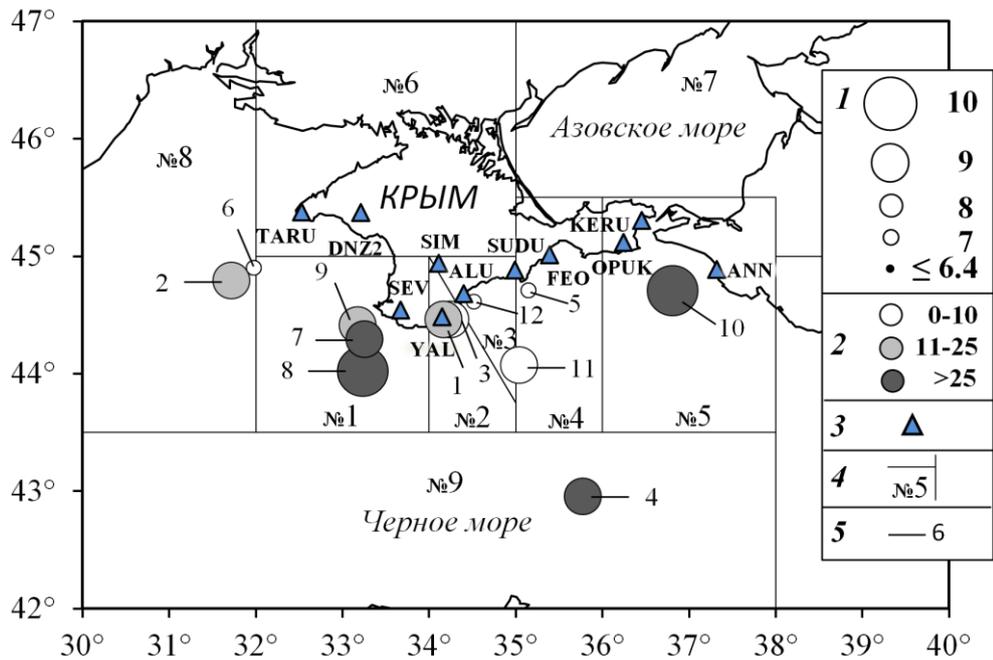


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2021 г., для которых восстановлены динамические параметры очагов: 1 — энергетический класс K_{II} [3]; 2 — глубина очага; 3 — сейсмическая станции; 4 — граница районов; 5 — номера землетрясений в соответствии с табл. 1.

Большинство землетрясений произошло в верхней части земной коры вблизи побережья Крыма на глубинах от 8 до 28 км и только 2 из них — в переходной зоне кора-мантия (табл. 1).

Таблица 1.

Основные параметры землетрясений Крыма за 2021 год, для которых восстановлены динамические параметры очагов

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда			K_{II}	Район
			φ° , N	λ° , E		M_c	M_w/n , табл. 4	ML wsg		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	11.01	20 23 53.1	44.46	34.17	12	2.4	2.8/9	2.9	8.8	ЯЛТИНСКИЙ (№ 2)
2	30.01	0 52 32.8	44.79	31.72	24		3.0/8	3.0	9.4	СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ (№ 8)
3	13.02	20 5 9.9	44.46	34.19	10		2.7/6	2.6	8.7	ЯЛТИНСКИЙ (№ 2)
4	15.03	7 30 1.9	42.95	35.78	23		3.3/2	2.9	9.1	ЧЕРНОМОРСКАЯ ВПАДИНА (№ 9)

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	24.03	6 54 59.9	44.71	35.15	28		2.6/2		7.1	СУДАКСКО-ФЕОДОСИЙСКИЙ (№ 4)
6	13.04	3 6 34.6	44.90	31.98	12		2.05/1		7.0	СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ (№ 8)
7	23.05	6 16 3.3	44.29	33.26	26	2.6	3.1/7	2.8	8.9	СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ (№ 1)
8	02.06	18 16 29.2	44.02	33.23	44	3.2	3.6/12	3.5	10.2	СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ (№ 1)
9	09.08	18 8 4.5	44.41	33.18	23	2.6	3.0/7	2.8	8.7	СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ (№ 1)
10	11.09	6 33 11.2	44.71	36.81	43		3.6/8	3.5	10.2	КЕРЧЕНСКО-АНАПСКИЙ (№ 5)
11	24.11	10 39 26.1	44.07	35.04	8		3.0/2	2.7	9.1	СУДАКСКО-ФЕОДОСИЙСКИЙ (№ 4)
12	20.12	17 16 26.5	44.61	34.52	9		2.4/7		7.4	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)

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

По записям объемных волн на восьми сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Тарханкут» (TARU), «Донузлав-2» (DNZ2) и «Керчь» (KERU), рассчитано 116 амплитудных спектров: 26 для продольных (P) и 90 – поперечных (S) волн. Диапазон эпицентральных расстояний от очагов до станций регистрации составил $\Delta = 3 \div 225$ км с преобладанием $\Delta \leq 100$ км.

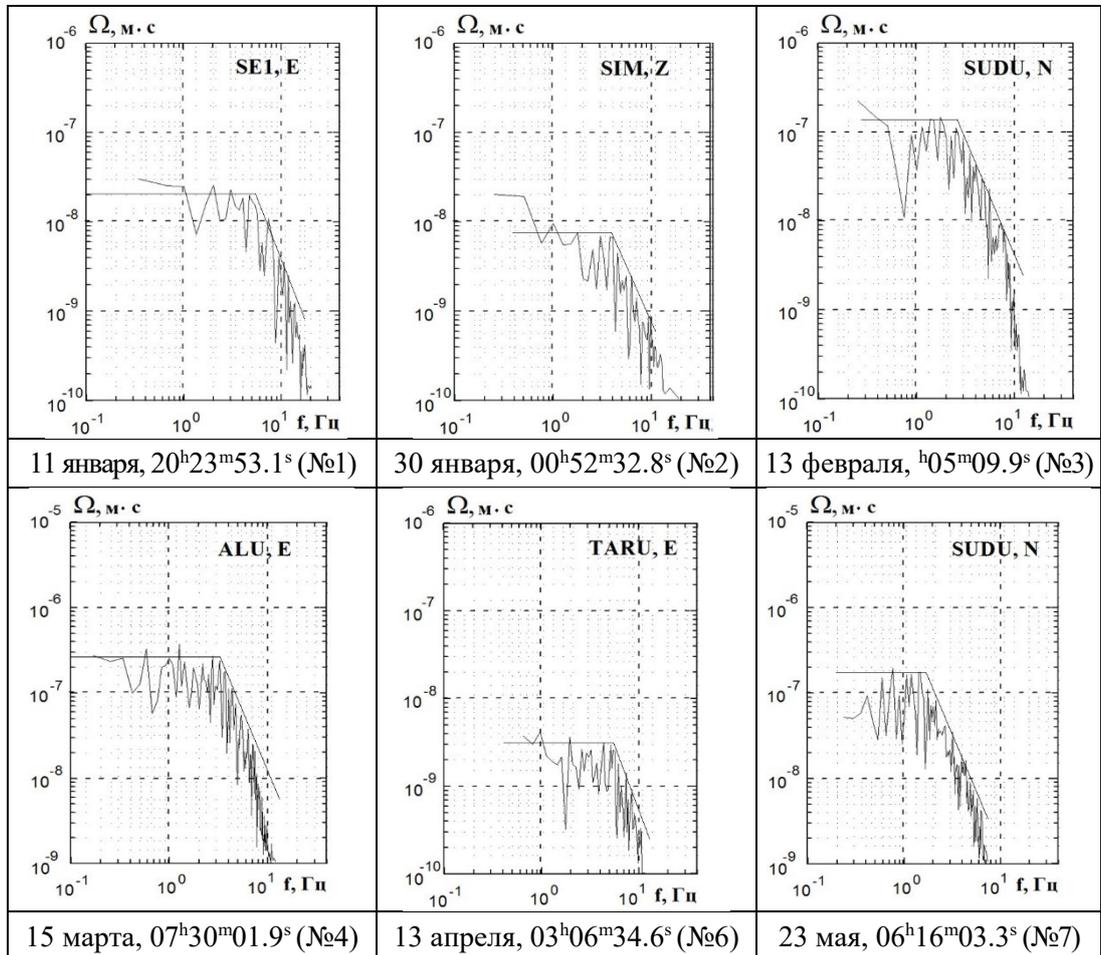
Как и в предыдущий год [2], активно для исследования привлекались записи на новых станциях «Тарханкут» и «Донузлав-2». Сейсмограммы станции «Керчь», оказались пригодными, т. е. соответствующими критериям высокого качества, только для одного наиболее сильного землетрясения с $K_T=10.2$, произошедшего 11.09.2021 г. в восточной части региона на расстоянии 72 км от эпицентра.

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ

Методика расчета, обработки и интерпретации амплитудных спектров не изменились по сравнению с предыдущими годами [1, 2 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 (N+E), а продольных (P) – по вертикальной (Z). Относительная длительность τ исследуемого участка записи принята равной интервалу времени от момента вступления S - и P -волн до времени спада их 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]. Все рассчитанные в 2021 г. спектры

объемных волн удовлетворительно аппроксимируются 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 (ω^{-2}) . Примеры амплитудных спектров P - и S -волн и их аппроксимация в рамках теоретической модели Бруна приведены на рис. 3.



СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

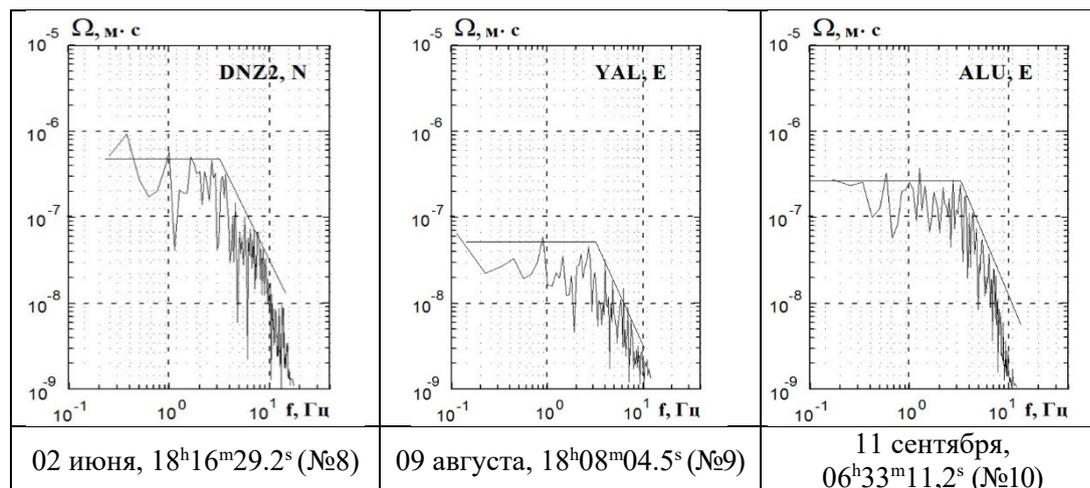


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров P и S -волн землетрясений Крыма 2021 г.

3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ

Расчет динамических параметров очага: сейсмического момента M_0 , радиуса круговой дислокации r_0 , 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} , энергии образования дислокации в очаге E_U и моментной магнитуды M_w выполнен по формулам, приведенным в [1] на основе работ [5–9].

Основными параметрами для расчетов явились две главные характеристики амплитудных спектров (рис. 3): спектральная плотность Ω_0 , которая пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 и угловая частота f_0 , прямо связанная с размером радиуса круговой дислокации r_0 .

Для половины землетрясений динамические параметры получены по группе независимых стационарных определений (табл. 2). Только для одного относительно слабого сейсмического толчка (№ 6), с энергетическим классом $K_{II} = 7.0$, произошедшего в северо-западной части Крыма (район № 8), динамические параметры рассчитаны по записям только S -волн на одной, ближайшей к очагу станции «Тарханкут», расположенной на эпицентральной расстоянии $\Delta = 68$ км.

Вычисление средних значений параметров (S) и стандартных отклонений (δS) выполнено по стационарным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [4]. Средние значения радиационного трения $\Delta\sigma_r$ вычислялись по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\bar{\sigma}$, поскольку стационарные значения получились знакопеременными. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Таблица 2.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2021 год

Станция	Волна	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м.с	$\Sigma \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м.с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Д.Д.	r_0 , км	$\Delta \sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta \sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta \sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_r \cdot 10^8$, Дж	M_w^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№ 1. 11 января, $t_0=20$ ч 23 мин 53.1 с; $\varphi = 44.46^\circ$, $\lambda = 34.17^\circ$; $h = 12$ км; $K_{п} = 8.8$															
YAL	P	Z	3	0.1		5.6	2.22	0.4	1.53	5.09	0.15	4.8	-4.0	0.56	2.83
YAL	S	N+E	3		0.36	3.5	3.96	0.36	3.66	12.1	0.32	2.69	-0.86	2.45	3.0
ALU	P	Z	31	0.014		5.1	0.85	0.44	0.44	1.47	0.05	12.6	-12.4	0.06	2.55
ALU	S	N+E	31		0.36	3.5	3.96	0.36	3.66	12.2	0.32	2.69	-0.86	2.42	3.0
SEV	S	N+E	40		0.05	3.6	0.7	0.35	0.7	2.34	0.06	15.3	-14.9	0.08	2.5
SIM	P	Z	54	0.012		5.0	1.21	0.44	0.6	1.98	0.06	8.8	-8.5	0.12	2.66
SIM	S	N+E	54		0.06	3.3	1.1	0.38	0.85	2.84	0.08	9.68	-9.25	0.15	2.63
SUDU	P	Z	81	0.015		5.0	2.24	0.45	1.1	3.66	0.12	4.76	-4.21	0.41	2.84

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
SUDU	S	N+E	81		0.15	3.2	4.07	0.4	2.87	9.58	0.28	2.61	-1.18	1.95	3.01	
S - среднее значение								1.85	0.4	1.29	4.31	0.12	5.77	-5.13	0.39	2.78
δS-стандартное отклонение								0.1	0.01	0.12	0.12	0.11	0.1		0.22	0.19
№ 2. 30 января, $t_0=00$ч 52 мин 32.8 с; $\varphi = 44.79^\circ$, $\lambda = 31.72^\circ$; $h = 24$ км; $K_{п} = 9.4$																
TARU	S	N+E	91		0.075	3.0	2.37	0.42	1.38	4.59	0.14	16.2	-15.5	0.54	2.85	
ALU	S	N+E	212		0.12	2.85	8.49	0.44	4.24	14.1	0.46	4.5	-2.38	6.0	3.22	
DNZ2	P	Z	134	0.03		5.1	8.41	0.46	3.87	12.9	0.43	4.55	-2.61	5.41	3.22	
DNZ2	S	N+E	134		0.17	2.95	7.67	0.43	4.24	14.1	0.44	4.98	-2.86	5.42	3.19	
SEV	P	Z	157	0.03		5.2	0.98	0.45	0.48	1.59	0.05	39.1	-38.9	0.08	2.6	
SEV	S	N+E	157		0.03	3.0	1.57	0.42	0.91	3.05	0.094	24.3	-23.8	0.24	2.73	
SIM	P	Z	190	0.009		4.7	3.57	0.5	1.28	4.28	0.15	10.7	-10.1	0.76	2.97	
SIM	S	N+E	190		0.095	2.7	6.06	0.43	2.57	8.57	0.29	6.3	-5.02	2.6	3.12	
S - среднее значение								3.8	0.44	1.85	6.17	0.2	10.1	-9.18	1.17	2.99
δS-стандартное отклонение								0.13	0.01	0.12	0.12	0.13	0.13		0.25	0.24
№ 3. 13 февраля, $t_0=20$ ч 05 мин 09.9 с; $\varphi = 44.46^\circ$, $\lambda = 34.19^\circ$; $h = 10$ км; $K_{п} = 8.7$																
ALU	P	Z	30	0.01		5.5	0.56	0.41	0.37	1.23	0.036	18.2	-18.0	0.035	2.44	
ALU	S	N+E	30		0.5	3.2	5.13	0.40	3.63	0.12	0.35	2.0	-1.9	3.1	3.08	
SEV	S	N+E	42		0.07	3.25	1.0	0.39	0.74	2.47	0.07	10.3	-9.9	0.12	2.6	
SIM	S	N+E	55		0.06	3.2	1.12	0.40	0.79	2.64	0.08	9.16	-7.6	0.15	2.64	
SUDU	P	Z	80	0.01		5.1	1.49	0.44	0.78	2.59	0.082	6.89	-6.5	0.19	2.72	
SUDU	S	N+E	80		0.15	3.0	4.07	0.42	2.37	7.89	0.24	2.53	-1.34	1.61	3.01	
S - среднее значение								1.64	0.41	1.06	1.64	0.11	6.25	-5.72	0.29	2.7
δS-стандартное отклонение								0.15	0.01	0.15	0.25	0.15	0.15		0.3	0.2

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№ 4. 15 марта, $t_0=07$ ч 30 мин 01.9 с; $\varphi = 42.95^\circ$, $\lambda = 35.78^\circ$; $h = 23$ км; $K_{\Pi} = 9.1$															
SUDU	S	N+E	225		0.13	2.95	9.77	0.43	5.41	0.18	0.56	2.17	0.53	8.81	3.26
ALU	S	N+E	222		0.22	2.85	16.3	0.44	8.13	0.27	0.87	1.3	2.76	22.1	3.41
S - среднее значение							12.6	0.44	6.63	0.22	0.7	1.68	1.64	13.95	3.33
δS-стандартное отклонение							0.11	0.005	0.09	0.09	0.1	0.11		0.2	0.1
№ 5. 24 марта, $t_0=06$ ч 54 мин 59.9 с; $\varphi = 44.71^\circ$, $\lambda = 35.15^\circ$; $h = 28$ км; $K_{\Pi} = 7.1$															
SUDU	S	N+E	23		0.09	4.5	1.18	0.30	1.94	6.48	0.14	0.4	0.56	0.38	2.65
TARU	S	N+E	218		0.075	4.8	0.65	0.28	1.3	4.35	0.09	0.73	-0.08	0.14	2.48
S - среднее значение							0.88	0.29	1.59	5.31	0.11	0.54	0.26	0.23	2.57
δS-стандартное отклонение							0.13	0.01	0.09	0.09	0.1	0.13		0.22	0.09
№ 6. 13 апреля, $t_0=03$ ч 06 мин 34.6 с; $\varphi = 44.90^\circ$, $\lambda = 31.98^\circ$; $h = 12$ км; $K_{\Pi} = 7.0$															
TARU	S	N+E	68		0.007	4.9	0.15	0.27	0.32	1.06	0.02	2.68	-2.52	0.008	2.05
№ 7. 23 мая, $t_0=06$ ч 16 мин 03.3 с; $\varphi = 44.29^\circ$, $\lambda = 33.26^\circ$; $h = 26$ км; $K_{\Pi} = 8.9$															
ALU	P	Z	101	0.009		4.7	1.95	0.5	0.7	2.34	0.08	7.72	-7.37	0.23	2.8
ALU	S	N+E	101		0.25	2.6	8.71	0.49	3.3	11.0	0.39	1.73	-0.08	4.79	3.23
TARU	P	Z	133	0.01		4.95	2.8	0.47	1.18	3.93	0.13	5.37	-4.78	0.55	2.9
TARU	S	N+E	133		0.15	2.9	8.03	0.43	3.56	0.12	0.4	1.87	-0.09	4.76	3.21
SUDU	P	Z	153	0.03		4.2	9.64	0.55	2.48	8.26	0.33	1.56	-0.32	3.98	3.26
SUDU	S	N+E	153		0.18	2.45	11.0	0.55	2.95	9.83	0.39	1.36	0.11	5.43	3.3
SIM	S	N+E	100		0.12	2.8	4.96	0.48	1.98	6.59	0.23	3.03	-2.04	1.64	3.07
S - среднее значение							5.72	0.49	2.03	3.5	0.24	2.63	-1.62	1.94	3.11
δS-стандартное отклонение							0.11	0.01	0.1	0.26	0.1	0.11		0.21	0.18
8. 02 июня, $t_0=18$ ч 16 мин 29.2 с; $\varphi = 44.02^\circ$, $\lambda = 33.23^\circ$; $h = 44$ км; $K_{\Pi} = 10.2$															
ALU	P	Z	119	0.01		4.1	8.37	0.75	0.87	1.45	0.08	41.7	-41.3	0.6	3.22
ALU	S	N+E	119		0.7	2.25	74.0	0.74	8.05	13.4	0.72	4.72	-0.7	49.7	3.88
SUDU	P	Z	170	0.03		4.0	34.2	0.77	3.3	5.51	0.31	10.2	-8.55	9.43	3.63
SUDU	S	N+E	170		0.36	2.15	64.9	0.77	6.16	10.3	0.58	5.38	-2.3	33.3	3.81
TARU	P	Z	160	0.06		4.1	51.0	0.75	5.3	8.84	0.48	6.85	-4.2	22.5	3.74
TARU	S	N+E	160		0.64	2.2	85.9	0.76	8.74	14.6	0.8	4.06	0.3	62.6	3.89
DNZ2	P	Z	150	0.06		4.2	49.2	0.73	5.6	9.17	0.49	7.09	-4.34	22.6	3.73
DNZ2	S	N+E	150		0.7	2.15	90.8	0.77	8.61	14.4	0.81	8.61	0.5	65.2	3.91
SEV	P	Z	68	0.03		4.3	12.9	0.71	1.55	2.58	0.13	27.0	-26.3	1.67	3.34
SEV	S	N+E	68		0.4	2.3	27.2	0.72	3.16	5.28	0.28	12.8	-11.2	7.17	3.56
YAL	P	Z	90	0.025		4.3	13.2	0.71	1.59	2.65	0.14	26.4	-25.6	1.75	3.35
YAL	S	N+E	90		0.18	3.3	1.51	0.5	5.17	8.61	0.31	23.2	-20.6	6.49	3.39
S - среднее значение							27.5	0.72	3.9	6.5	0.34	11.2	-9.25	10.8	3.62
δS-стандартное отклонение							0.15	0.01	0.09	0.09	0.1	0.1		0.19	0.18
№ 9. 09 августа, $t_0=18$ ч 08 мин 04.5 с; $\varphi = 44.41^\circ$, $\lambda = 33.18^\circ$; $h = 23$ км; $K_{\Pi} = 8.7$															
DNZ2	P	Z	107	0.02		4.35	4.46	0.54	1.27	4.25	0.16	2.38	-1.75	0.95	3.04
DNZ2	S	N+E	107		0.18	2.8	7.68	0.48	3.06	10.2	0.35	1.39	0.14	3.92	3.19
SIM	P	Z	95	0.015		4.6	3.01	0.51	1.02	3.38	0.12	3.54	-3.06	0.51	2.92

Продолжение таблицы 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
SIM	S	N+E	95		0.1	2.9	3.83	0.43	1.7	5.65	0.19	2.78	-19.3	1.08	2.99	
TARU	S	N+E	118		0.03	3.1	1.41	0.43	7.63	2.54	0.08	7.55	-7.1	0.18	2.7	
SEV	S	N+E	42		0.25	3.1	4.68	0.43	2.53	8.44	0.26	2.27	-1.01	1.97	3.05	
YAL	S	N+E	76		0.07	3.1	2.19	0.43	1.19	3.96	0.13	4.85	-4.26	0.43	2.83	
S - среднее значение								3.44	0.46	2.06	4.92	0.17	3.1	-2.07	0.85	2.96
δS -стандартное отклонение								0.09	0.02	0.12	0.08	0.08	0.09		0.17	0.11
№ 10. 11 сентября, $t_0=06$ ч 33 мин 11.2 с; $\varphi = 44.71^\circ$, $\lambda = 36.81^\circ$; $h = 43$ км; $K_{\Pi} = 10.2$																
ALU	S	N+E	191		0.45	2.8	72.8	0.59	15.3	25.4	1.1	4.79	2.84	92.7	3.84	
KERU	P	Z	72	0.15		4.4	33.2	0.7	4.26	7.11	0.36	10.5	-8.39	11.8	3.62	
KERU	S	N+E	72		2.5	2.65	87.4	0.63	15.5	25.9	1.18	4.0	3.76	11.3	3.9	
SIM	P	Z	214	0.013		4.6	14.9	0.67	2.19	3.65	0.18	23.4	-22.3	2.75	3.39	
SIM	S	N+E	214		0.15	2.8	15.1	0.59	3.16	5.27	0.23	23.1	-21.5	3.98	3.39	
SUDU	P	Z	145	0.03		4.5	23.8	0.68	3.26	5.44	0.27	14.7	-13.1	6.46	3.52	
SUDU	S	N+E	145		0.42	2.5	52.5	0.66	7.84	13.1	0.63	6.65	-2.73	34.3	3.75	
YAL	S	N+E	212		0.15	2.65	26.9	0.63	4.78	7.93	0.36	13.0	-10.6	10.7	3.56	
S - среднее значение								33.5	0.64	5.51	9.19	0.43	10.4	-7.65	11.57	3.62
δS -стандартное отклонение								0.1	0.01	0.11	0.11	0.11	0.1		0.17	0.18
№ 11. 24 ноября, $t_0=10$ ч 39 мин 26.1 с; $\varphi = 44.07^\circ$, $\lambda = 35.04^\circ$; $h = 8$ км; $K_{\Pi} = 9.1$																
ALU	S	N+E	85		0.3	3.0	8.47	0.42	4.93	16.4	0.5	2.6	-0.13	6.96	3.22	
YAL	S	N+E	84		0.05	3.5	1.39	0.36	1.29	4.29	0.11	15.8	-15.1	0.3	2.7	
S - среднее значение								3.43	0.39	2.52	8.39	0.23	6.4	-5.14	1.44	2.96
δS -стандартное отклонение								0.39	0.03	0.29	0.29	0.33	0.39		0.68	0.26
№ 12. 20 декабря, $t_0=17$ ч 16 мин 26.5 с; $\varphi = 44.61^\circ$, $\lambda = 34.52^\circ$; $h = 9$ км; $K_{\Pi} = 7.4$																
SUDU	P	Z	49	0.009		6.0	0.82	0.37	0.7	2.3	0.06	1.05	-0.7	0.09	2.54	
SUDU	S	N+E	49		0.1	3.5	1.65	0.36	1.52	5.08	0.13	0.52	0.24	0.42	2.75	
YAL	P	Z	29	0.003		6.5	0.16	0.34	0.18	0.59	0.015	5.24	-5.15	0.005	2.08	
YAL	S	N+E	29		0.06	3.8	0.59	0.33	0.7	2.34	0.06	1.44	-1.09	0.07	2.45	
SIM	P	Z	46	0.005		6.2	0.43	0.36	0.4	1.35	0.035	1.97	-1.77	0.03	2.35	
SIM	S	N+E	46		0.04	3.85	0.63	0.33	0.78	2.59	0.06	1.36	0.97	0.08	2.47	
SEV	S	N+E	61		0.01	4.0	0.21	0.32	0.28	0.9	0.02	4.16	-4.02	0.001	2.14	
S - среднее значение								0.49	0.34	0.53	1.75	0.04	1.73	-1.47	0.03	2.4
δS -стандартное отклонение								0.13	0.01	0.12	0.12	0.12	0.13		0.33	0.15

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

Наилучшая сходимость стационарных определений (табл. 2), как и в предыдущие годы [1, 2] получена для радиуса круговой дислокации, размеры которого в явном виде не зависят от направленности излучения энергии из очага. Степень рассеяния индивидуальных определений r_0 для большинства изученных землетрясений не превысила $\delta r_0 = 0.03$ даже для слабых толчков. Стандартные отклонения по другим параметрам для наиболее сильных землетрясений менее $\delta S < 0.3$. Наибольший разброс данных по стационарным определениям отмечен для величины энергии дислокации

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

E_U достигающий иногда более одного порядка, соответственно, стандартное отклонение δE_U для этого параметра получилось максимальным. Значения моментных магнитуд M_w определены с погрешностью в основном не выше ± 0.2 .

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 $\Delta\sigma = 6.6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (6.6 бар), а кажущихся напряжений $\eta\bar{\sigma} < 11 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (11 бар).

Разброс индивидуальных определений динамических параметров в основном связан с различной направленностью излучения сейсмической энергии из очага на станции регистрации $R_{\theta\phi}$, принятой нами при расчетах средней и одинаковой $R_{\theta\phi} = 0.4$ для всех землетрясений 2021 г., т. к. решения механизма очагов не получено. Кроме того, есть трудности корректного учета индивидуальных станционных особенностей записей сейсмических колебаний на станциях регистрации, расположенных в разных инженерно-геологических условиях и оснащенных различающейся сейсмической аппаратурой [10]. Так, динамические параметры, оцененные по записям станции SEV, в основном занижены по сравнению с другими станционными определениями. В связи с этим, для получения более надежных оценок очаговых параметров в данной работе привлекались для анализа записи максимально возможного числа сейсмических станций.

Проведем сравнение полученных в 2021 г. динамических параметров очагов землетрясений: 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 $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\lg \Delta\sigma(K_{II})$ из [11, 12].

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

где ρ — коэффициент корреляции.

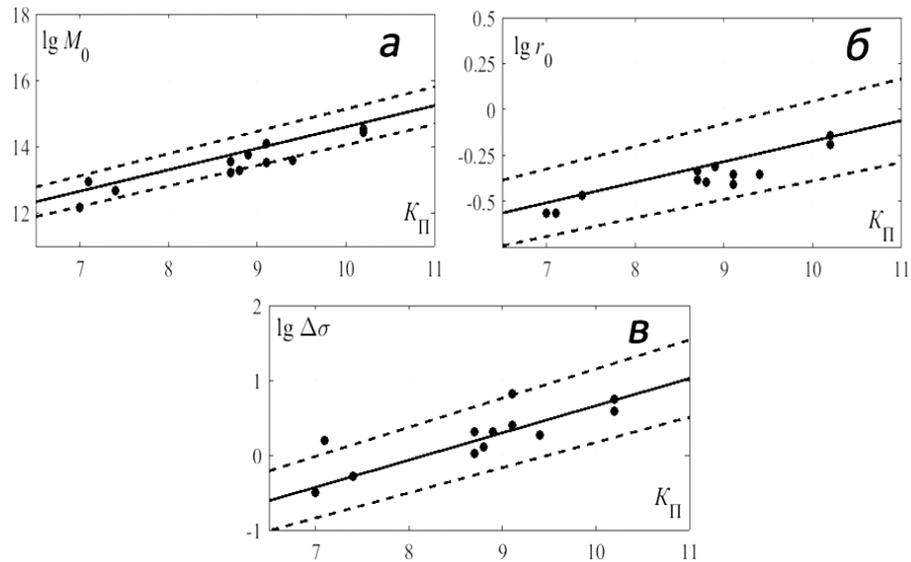


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2021 г.: **a** — сейсмического момента M_0 , **б** — радиуса круговой дислокации r_0 и **в** — сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$ из [11, 12]. Пунктиром обозначены пределы погрешностей долговременных зависимостей.

Из рис. 4 видно, что преобладающее большинство значений M_0 , r_0 и $\Delta\sigma$ для очагов землетрясений за 2021 г. укладывается в диапазон доверительного интервала долговременных зависимостей $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$, полученных за длительный интервал времени. Наибольшее отличие сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ от долговременных параметров получено для слабого землетрясения 24 марта (№ 5) с $K_{II} = 7.1$ из Судакско-Феодосийского района, очаговые параметры которого восстановлены по двум станциям: SUDU и ALU (S -волна) с хорошей внутренней сходимостью полученных станционных определений. Как показано в [4, 12], сброшенные напряжения существенно меняются как в пространстве, так и во времени при одном энергетическом уровне, так что данное отклонение можно отнести к пространственной особенности напряженно-деформированного состояния среды данной очаговой зоны.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для построения энергетических спектров объемных сейсмических волн, отобраны записи восьми землетрясений (табл. 3), произошедших в основном в центральной зоне региона (районы №1–3) вблизи побережья Крыма. Как и в предыдущие годы [1, 2] использованы сейсмограммы стационарной станции «Алушта». В основном это сравнительно слабые землетрясения с энергетическим классом $K_{II} = 5.5 \div 8.7$ с эпицентрными расстояниями от 8 до 101 км до станции

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

регистрации.

Таблица 3.

Основные параметры землетрясений Крыма за 2021 год,
для которых рассчитаны энергетические спектры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	$K_{П}$	Район
			φ° , N	λ° , E			
1	13.02	20 05 09.9	44.46	34.19	10	8.7	ЯЛТИНСКИЙ (№ 2)
2	19.04	23 53 40.4	44.57	34.49	21	6.9	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
3	02.05	01 09 56.3	44.62	34.53	24	5.5	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
4	02.05	18 13 05.7	44.64	34.51	20	6.3	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
5	05.05	16 33 08.5	44.64	34.51	21	6.4	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
6	09.08	13 56 19.0	44.66	34.70	18	7.0	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
7	09.08	18 08 04.5	44.41	33.18	23	8.7	СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ (№ 1)
8	03.12	13 53 15.4	44.74	34.35	15	7.1	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)

Примечание. Параметры землетрясений даны по данным сводной обработки в Крыму.

Основой для расчета спектров энергии q сейсмических волн являлись их амплитудные спектры. Пересчет спектральной плотности амплитудного спектра в плотность энергетического спектра осуществлялся по формуле [4,13]:

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

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

Большинство рассчитанных энергетических спектров имело характерную резонансную форму по всем компонентам записи с одним выраженным максимумом частот f_{qmax} , на которые приходится наибольшая доля плотности сейсмической энергии q_{max} (рис. 5).

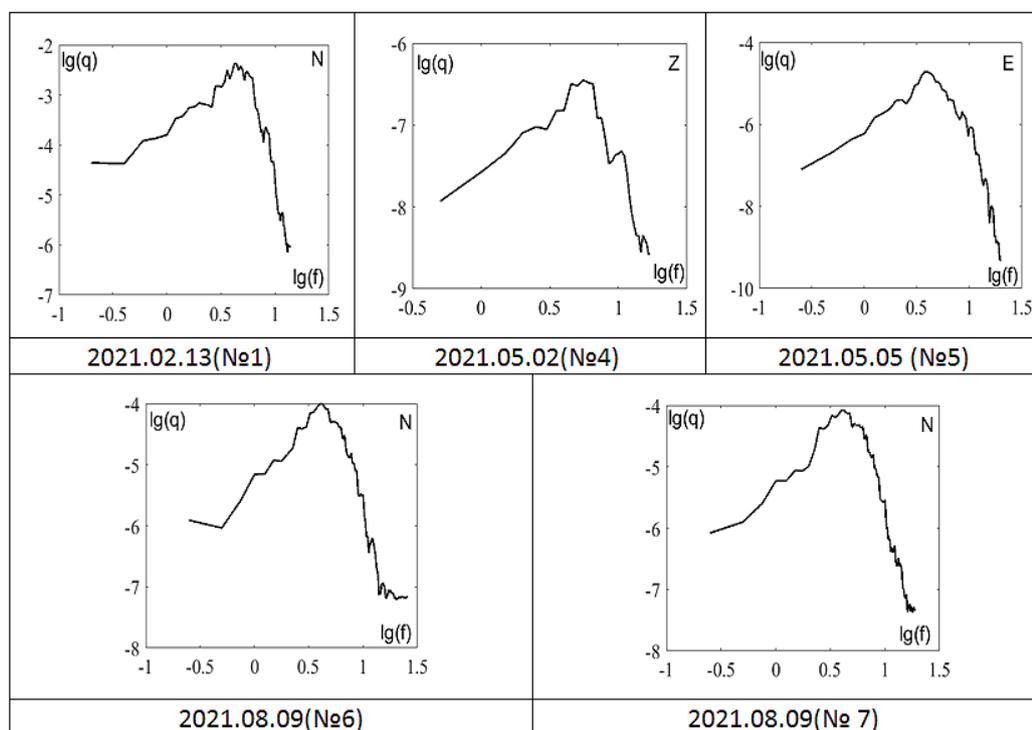


Рис.5. Примеры сглаженных энергетических спектров землетрясений Крыма 2021 г. по записям объемных сейсмических волн на станции «Алушта».

Для анализа использованы 2 главные характеристики спектров энергии: f_{qmax} , с максимальной плотностью энергии q_{max} и ширина максимума спектра δf_q на уровне 0.75 от максимального значения q_{max} в высокочастотной (f_{q1}) и низкочастотной (f_{q2}) части спектра: $\delta f_q = (f_{q1} - f_{q2})$. Результаты расчета f_{qmax} и δf_q по разным составляющим записи (Z, N, E,) представлены в таблице 4.

Таблица 4.
Спектральные характеристики энергетических спектров землетрясений 2021 г. по данным станции «Алушта»

№ земл. по табл. 3	$K_{П}$	Δ , км	f_{qmax} , Гц			δf_q , Гц		
			Z	N	E	Z	N	E
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	8.7	30	7	4.21	2.8	4.6-8.5	3.4-6.31	2.2-4.21
2	6.9	14	6	4.5	3.8	3.53-8.5	3.5-5.6	2.7-5
3	5.5	12	5.1	4.6	4	3.5-7.9	2.95-7	2.8-6.2

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	6.3	10	6.55	4.5	3.76	4-8.57	3.51-7.27	3.26-5.27
5	6.4	10	5.54	4.81	4	4-6.9	3.4-7.2	3.2-5.8
6	7.0	101	5	4.3	4	4-6	3-5.27	2.5-7
7	8.7	23	5	4	3.76	4-6.4	3.26-5.27	2.5-4.3
8	7.1	8	6	3.4		4.5-7	2.9-3.9	

В работах [14, 15] имеющиеся энергетические спектры за период 2014–2020 гг. условно были разделены на 6 групп, отличающиеся эпицентрными расстояниями: 1 — (6±2) км; 2 — (23±7) км; 3 — (46±3) км; 4 — (85±15) км; 5 — (167±13) км; 6 — (243±22) км. Для наиболее многочисленной группы 2–(23±7) км получено корреляционное уравнение связи частоты спектра f_{qmax} и энергетического уровня (K_{II}) землетрясения:

$$Lg(f_{qmax}) = - (0.077 \pm 0.007) \cdot K_{II} + (1.11 \pm 0.05), \quad \rho = 0.92 \quad (1)$$

Уравнение (1) рассчитано между парами параметров: энергия землетрясения и частота колебаний при фиксированном эпицентральном расстоянии Δ . Вместе с тем, спектральный состав колебаний сейсмических волн меняется с ростом расстояния вследствие поглощения и рассеяния высоких частот в неоднородной среде. В связи с этим нами была сделана попытка получить предварительную корреляцию по трем парам параметров между f_{qmax} , K_{II} и Δ , используя имеющиеся данные по энергетическим спектрам во всем диапазоне эпицентральных расстояний и энергетических классов [15]. В результате получены уравнения: (2) – для поперечных S-волн и (3) – для продольных P-волн:

$$Lg(f_{qmax}) = - 0.02 \cdot K_{II} - 0.03 \cdot Lg \Delta + 0.95 \quad (2)$$

$$Lg(f_{qmax}) = - 0.02 \cdot K_{II} - 0.08 \cdot Lg \Delta + 0.82, \quad (3)$$

Энергетические спектры землетрясений 2021 г. под номерами №1 и №6 с эпицентральным расстоянием 30 км и 23 км попадают во вторую из отобранных групп очагов ($\Delta = 23 \pm 7$ км). Сравнение спектральных характеристик f_{qmax} для этих землетрясений по табл. 4. и рассчитанных по формуле (1), показало их соответствие.

Для других землетрясений 2021 г., не попадающих в данный диапазон эпицентральных расстояний, сравнение значений f_{qmax} с ранее полученными данными, выполнено по формулам 2 и 3. Также можно отметить хорошее согласие результатов сравнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специализированная база по динамическим параметрам очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона дополнена данными (N=71) стационарных определений для 12 местных землетрясений 2021 года в диапазоне энергетических

классов $K_{П}=7.0\div 10.2$, произошедших в различных районах региона на эпицентральных расстояниях от 3 км (станция YAL) до 225 км (станция SUDU). Средние значения динамических параметров очагов землетрясений 2021 г. в большинстве случаев оценены по нескольким станциям и по разным типам волн, что нивелировало станционные особенности и вариации в направленности излучения сейсмических волн на станции регистрации. В результате этого получена сравнительно малая величина стандартного отклонения индивидуальных оценок очаговых параметров и их соответствие средним долговременным зависимостям от энергетического уровня землетрясений.

Статистика по частотному составу сейсмических колебаний, несущих на себе максимальную сейсмическую энергию дополнена данными для восьми землетрясений в диапазоне $K_{П}= 5.5\div 8.7$ по энергетическим спектрам записей объемных волн на станции «Алушта». Новые определения спектральных параметров сейсмических волн не противоречат имеющимся данным за предшествующий период 2014–2020 гг. и будут использованы для уточнения их корреляционных зависимостей от энергетического уровня землетрясений и его эпицентрального расстояния до станций регистрации.

Список литературы

1. 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. 66–84.
2. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э., Бондарь М. Н. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2020 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им В. И. Вернадского. География. Геология. 2021. Том 7(73), №4. С. 70–86.
3. 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.
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, № 26, pp. 4997–5009.
6. Аптекман Ж. Я., Дараган С. К., Долгополов В. В., Захарова А. И., Зобин В. М., Коган С. Я., Корчагина О. А., Москвина А. Г., Поликарпова Л. А., Чепкунас Л. С. Спектры *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2, 1985. С. 60–70.
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 *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. № 2, 1989. С. 66–79.
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. №35, pp. 2348–2350.
10. Калинин И. В., Свидлова В.А., Бондарь М. Н. Сейсмичность Крыма в 2019 году // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2020. Том 6(72). № 4. С. 7–66.
11. 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.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2021 ГОДА

12. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Изучение напряжений и деформации в очаговых зонах землетрясений Крыма по спектрам записей сейсмических волн // Современная тектонофизика. Методы и результаты, 2019. С. 193–198.
13. Ризниченко Ю. В., Сейдузова С. С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. Москва: Наука, 1984. 180 с.
14. 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.
15. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Спектральные свойства плотности энергии объемных сейсмических волн землетрясений Крыма по данным станции «Алушта» // Монография «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» / Под ред. И. А. Керимова, В. А. Широковой / М.: ИИЕТ РАН, 2022. С. 324–329.

SPECTRAL AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE FOCI OF 2021 CRIMEAN EARTHQUAKES

Pustovitenko B. G.¹, Eredzhepov E. E.², Bondar M. N.³

^{1,2,3}Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities, Simferopol, Russian Federation

³Institute of seismology and geodynamics, V.I. Vernadsky Crimean Federal University», Simferopol, Russian Federation

E-mail: bpustovitenko@mail.ru

The results of calculation and analysis of amplitude and energy spectra of volume seismic waves of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2021 are presented. For 12 earthquakes in the range of energy classes $K_{II} = 7.0-10.2$, the dynamic parameters of the sources (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \bar{u} , Eu и M_W) were reconstructed from the amplitude spectra using Brun's theoretical dislocation model (ω^{-2}). The average values of the dynamic parameters of earthquake sources in 2021 were in most cases estimated for several stations and for different types of waves. This leveled the station features and variations in the direction of seismic wave radiation at the recording station. As a result, a relatively small standard deviation of individual estimates of source parameters and their correspondence to the average long-term dependences on the energy level of earthquakes were obtained.

Statistics on the frequency composition of seismic vibrations that carry the maximum seismic energy are supplemented with data for eight earthquakes in the range of $K_{II} = 5.5-8.7$ according to the energy spectra of body wave records at the «Alushta» station. New definitions of the spectral parameters of seismic wave energy do not contradict the available data for the previous period 2014–2020.

References

1. 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).
2. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., Bondar' M. N. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2020 goda (Spectral and dynamic parameters of the centers of Crimea earthquakes in 2020). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. V. 7(73), no. 4, 2021, pp. 70–86 (in Russian).
3. Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E. Ob energeticheskoj ocenke zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (On the energy assessment of earthquakes in the Crimean-Black Sea region).

- Magnituda i energeticheskaya klassifikaciya zemletryasenij. Moscow: IFZ AN SSSR. 1974. V. 2, pp. 113–125 (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., Daragan S. K., Dolgoplov V. V., Zaharova A. I., Zobin V. M., Kogan S. Ya., Korchagina O. A., Moskvina A. G., Polikarpova L. A., Chepkunas L. S. Spektry *P*-voln v zadache opredeleniya dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Unifikaciya ishodnykh dannykh i procedury rascheta amplitudnykh 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 seismologiya*. 1985, no. 2, pp. 60–70 (in Russian).
 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 dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Perehod ot stacionnogo spektra k ochagovomu i raschet dinamicheskikh 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 seismologiya*. 1989, no. 2, pp. 66–79 (in Russian).
 8. Kostrov B. V. *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya* (The mechanics of the source of a tectonic earthquake). Moscow: 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. Kalinyuk I. V., Svidlova V. A., Bondar' M. N. Seysmichnost' Kryma v 2019 g. (Seismicity of Crimea in 2019). *Uchenyye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2020. V. 6(72), no. 4, pp. 7–66 (in Russian).
 11. Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A., Kapitanova S. A., Porechnova E. I. Prostranstvennyye osobennosti ochagovykh parametrov zemletryasenij Kryma (Spatial features of the focal parameters of Crimea earthquakes). *Seysmichnost' Severnoj Evrazii. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii*. Obninsk: GS RAN. 2008, pp. 238–242 (in Russian).
 12. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. *Izucheniye napryazhenij i deformacii v ochagovykh zonah zemletryasenij Kryma po spektram zapisej seysmicheskikh voln* (The study of stress and strain in the source zones of earthquakes in the Crimea on the spectra of seismic wave records). *Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezul'taty*. 2019, pp. 193–198 (in Russian).
 13. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. *Spektral'no-vremennaya harakteristika seysmicheskoy opasnosti* (Spectral-temporal characteristics of seismic hazard). Moscow: Nauka, 1984. 180 p. (in Russian).
 14. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. *Issledovaniye spektral'nykh svoystv zemletryaseniy Kryma po energeticheskim spektram* (Investigation of the spectral properties of earthquakes in the Crimea on energy spectra). *Sovremennyye metody obrabotki i interpretacii seysmologicheskikh dannykh. Tezisy XV Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly / Otv. red. A.A. Malovichko*. Obninsk: FITS YEGS RAN, 2021, 75 p. (in Russian).
 15. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. *Spektral'nyye svoystva plotnosti energii ob'yemnykh seysmicheskikh voln zemletryaseniya Kryma po dannym stantsii «Alushta»* (Spectral Properties of the Energy Density of Volumetric Seismic Waves of Earthquakes in the Crimea According to the «Alushta» Station Data). *Monografiya «Sovremennyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza» / Pod red. I. A. Kerimova, V. A. Shirokovoy*. Moscow: IYET RAN, 2022, pp. 324–329 (in Russian).

Поступила в редакцию 12.09.2022 г.