

УДК 550.348.435

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2022 ГОДА

Пустовитенко Б. Г.¹, Эреджепов Э. Э.¹, Бондарь М. Н.^{1,2}

¹ГАОУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», Симферополь, Российская Федерация.

²Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Российская Федерация.

E-mail: ¹bpustovitenko@mail.ru

Представлены результаты исследования спектральных, кинематических, динамических и энергетических характеристик очагов 14 землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2022 год в диапазоне энергетических классов $K_{II}=5.4-12$. Для 12 землетрясений по 89 амплитудным спектрам объемных сейсмических волн, зарегистрированных на 8 региональных цифровых станциях Крыма, восстановлены динамические параметры очагов (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \dot{u} , E_u и M_w) с использованием теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}). Для наиболее сильного землетрясения с $K_{II}=12$ получено решение механизма очага в рамках двойного диполя. Спектральные свойства сейсмических волн 9 землетрясений рассмотрены также по 24 энергетическим спектрам с использованием сейсмограмм станции «Алушта».

Ключевые слова: механизм очага, амплитудный спектр, модель Бруна, спектральная плотность, угловая частота, динамические параметры очага, энергетический спектр.

ВВЕДЕНИЕ

Для сложного и неоднородного в сеймотектоническом плане Крымско-Черноморского региона ежегодное пополнение банка данных об очаговых параметрах местных землетрясений является крайне необходимой и актуальной задачей для изучения и общего познания протекающих геодинамических процессов в глубинной среде, где зарождаются очаги землетрясений, и возможного прогноза параметров сильных сейсмических воздействий на поверхности Земли.

В 2022 году сетью станций Крыма зарегистрировано 73 землетрясения в диапазоне энергетических классов $K_{II}=3.7-12.0$, из которых только для 14 с $K_{II}\geq 5.0$ определены спектральные, динамические и энергетические характеристики очагов. Такое ограничение в выборе землетрясений для анализа связано с жесткостью критериев отбора исходных данных (сейсмограмм) для расчета спектров и сложностью, а иногда неоднозначностью интерпретации получаемых спектров в рамках выбранной теоретической модели.

Для оценки динамических параметров очагов землетрясений отобраны записи четырех представительных для всего региона сейсмических событий в диапазоне $K_{II}=9-12$ и восемь сравнительно слабых толчков с $K_{II}=6.3-8.4$, представляющих научный интерес с позиции их пространственного расположения. Три из них произошли непосредственно вблизи побережья Южного берега Крыма и одно вблизи новой сеймостанции «Опук». Для наиболее сильного землетрясения 2 июня 2021 г. получено решение механизма очага. Как и в предыдущие годы [1, 2] спектральные

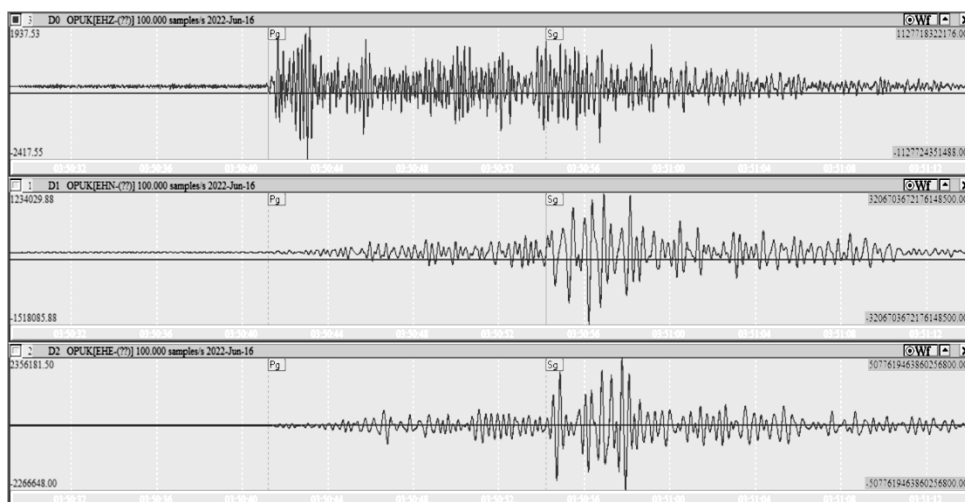
свойства 9 землетрясений рассмотрены также по энергетическим спектрам объемных сейсмических волн.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для определения динамических параметров очагов землетрясений использованы амплитудные спектры объемных волн, зарегистрированных на шести региональных сейсмических станциях Института сейсмологии и геодинамики КФУ (ИГиС КФУ): «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Керчь» (KERU) и двух автономных ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства» (ГАУ «КРЦ»): «Донузлав-2» (DNZ2), а также открытой в 2021 году новой станции «Опук» (OPUK). Частотный состав сейсмических колебаний, несущих на себе максимальную энергию исследован по энергетическим спектрам записей на сейсмической станции «Алушта».

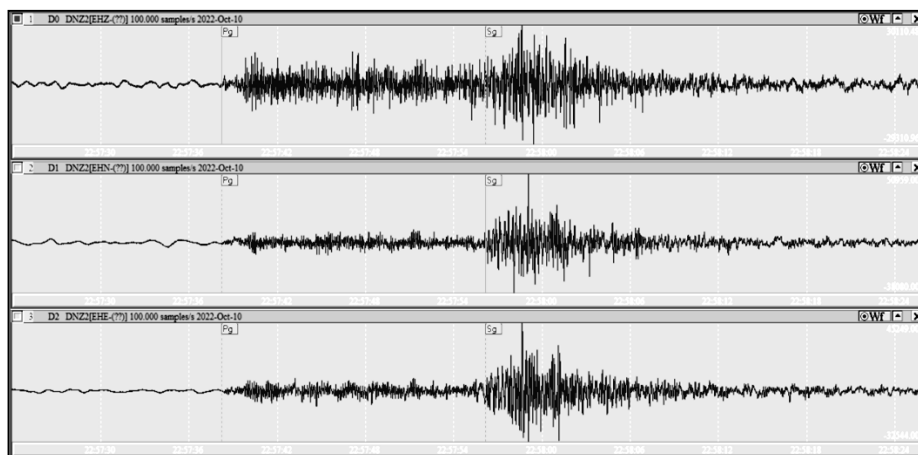
Предварительно были проанализированы все станционные сейсмограммы и отобраны только те волновые формы, которые отвечают критериям высокого качества: четкие (*i*) моменты вступления объемных волн, амплитуды полезного сигнала превышают фон помех в 2 и более раза. Примеры двух отобранных и использованных в работе сейсмограмм даны на рис. 1.

Основные параметры землетрясений 2022 г., для которых исследованы спектральные и динамические параметры очагов приведены в таблице 1, а их пространственное расположение показано на рис. 2.



a

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2022 ГОДА



б

Рис. 1. Примеры записей землетрясений 2022 г. на сейсмических станциях ГАУ «КРЦ»: а — «Опук» 16 июня $K_{П}=10.5$, $\Delta=79$ км; б — «Донузлав» 10 октября, $K_{П}=9.0$, $\Delta=146$ км

Таблица 1.

Основные параметры землетрясений Крыма за 2022 год, для которых изучены
очаговые параметры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда			$K_{П}$	Район
			φ° , N	λ° , E		Ms	M_w/h , табл. 4	ML wsg		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 [^]	17.01	03 31 08.3	44.25	34.30	24		2.4/2		7.1	ЯЛТИНСКИЙ (№ 2)
2 [^]	05.02	20 12 28.1	44.78	34.32	18				5.4	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
3 [^]	08.03	13 33 15.3	44.65	34.49	9				6.1	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
4 [^]	08.03	13 36 51.3	44.60	34.51	8		2.5/4		7.1	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
5 [^]	13.03	12 07 47.9	44.53	34.19	13		2.6/1	1.8	7.6	ЯЛТИНСКИЙ (№ 2)
6* [^]	11.04	17 38 42.7	42.25	31.35	23	3.8	4.6/7	4.6	12.0	ЧЕРНОМОРСКАЯ ВПАДИНА (№ 9)
7	20.04	02 46 55.5	44.49	34.08	14		1.9/2		6.3	ЯЛТИНСКИЙ (№ 2)
8	22.05	16 53 15.9	44.58	36.27	11		2.8/1		7.2	КЕРЧЕНСКО-АНАПСКИЙ (№ 5)

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9	03.06	23 58 02.3	44.33	34.25	16		2.2/2		6.3	ЯЛТИНСКИЙ (№ 2)
10 [^]	16.06	03 50 25.9	44.65	37.00	17		3,5/12	3.6	10.5	КЕРЧЕНСКО-АНАПСКИЙ (№ 5)
11	16.06	12 22 43.0	44.64	37.01	19		3.1/2	2.9	9.1	КЕРЧЕНСКО-АНАПСКИЙ (№ 5)
12	02.09	10 11 35.0	44.58	34.56	20		2.9/8	2.4	8.4	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)
13 [^]	10.10	22 57 13.6	44.36	34.39	28	2.4	3.0/10	2.7	9.0	ЯЛТИНСКИЙ (№ 2)
14 [^]	26.12	17 14 32.1	44.64	34.54	16		2.5/5		7.5	АЛУШТИНСКИЙ (№ 3)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 даны по данным сводной обработки в Крыму, значения M_w — из табл. 3, n — число индивидуальных определений, участвовавших в осреднении, [^], * — землетрясения, для которых рассчитаны также энергетические спектры и получено решение механизма очага, соответственно.

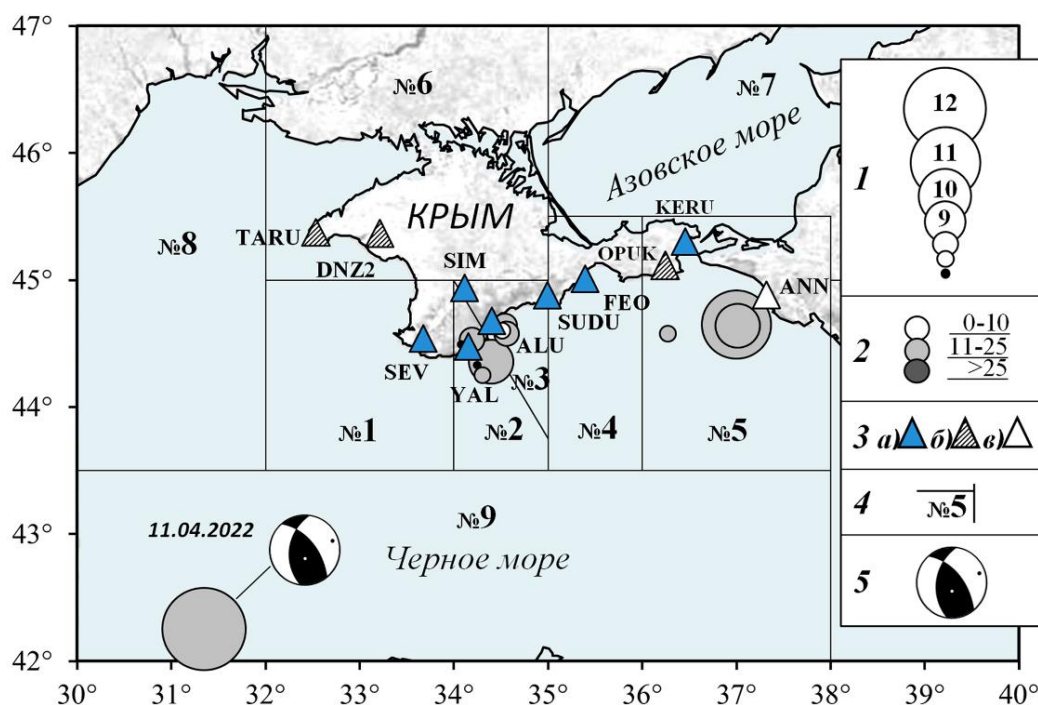


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2022 г., для которых восстановлены очаговые параметры: 1 — энергетический класс $K_{п}$ [3]; 2 — глубина очага; 3 — сейсмическая станции: а — ИГиС КФУ, б — ГАУ «КРЦ», в — Северного Кавказа; 4 — граница районов; 5 — диаграмма механизма очага.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2022 ГОДА

Все изученные землетрясения произошли в пределах земной коры региона на глубинах от 8 км до 28 км (табл. 1, рис. 2), основная часть из которых относится к центральной зоне региона (Алуштинский и Ялтинский районы), а также восточной (Керченско-Анапский район). Наиболее сильное землетрясение 11 апреля с $K_{\Gamma} = 12.0$ произошло в западной части Черноморской впадины (рис. 2).

Всего рассчитано 89 стационарных амплитудных спектров: 23 для продольных (P) и 66 — поперечных (S) волн и 25 энергетических спектров по данным станции «Алушта». Диапазон эпицентральных расстояний от очагов до станций регистрации составил $\Delta = 6 \div 416$ км с преобладанием $\Delta \leq 100$ км.

Для решения механизма очага наиболее сильного землетрясения 11 апреля с $K_{\Gamma} = 12$ использованы знаки первых вступлений объемных сейсмических волн, опубликованные в [4] по данным Международной сети станций, а также дополнительно собранные по региональным бюллетеням Турции и Северного Кавказа. В результате получен статистически представительный материал по 131 станции, окружающих очаг в широком азимутальном окружении для надежного решения механизма очага.

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Решение механизма очага получено на основе теории дислокации [5] по методике, подробно описанной в работе [6].

Методика расчета и интерпретации амплитудных и энергетических спектров не изменились по сравнению с предыдущими годами [1, 2 и др.]. Для поперечных волн (S) амплитудные 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). Использована длительность τ участка записи от вступления S - и P -волн до времени спада их амплитуд A_{\max} на уровень $1/3 A_{\max}$ [7]. Интерпретация амплитудных спектров выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [8], а энергетических — по методике [9].

Рассчитанные амплитудные спектры землетрясений 2022 года удовлетворительно аппроксимируются параметрами модели (ω^{-2}): спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ при $f \rightarrow 0$, угловой частотой f_0 (ω_0) и углом наклона $\gamma \sim$ — 2 (рис.3). Для энергетических спектров получена характерная резонансная форма с максимумом спектральной плотности в ограниченном диапазоне частот (см. рис. 6).

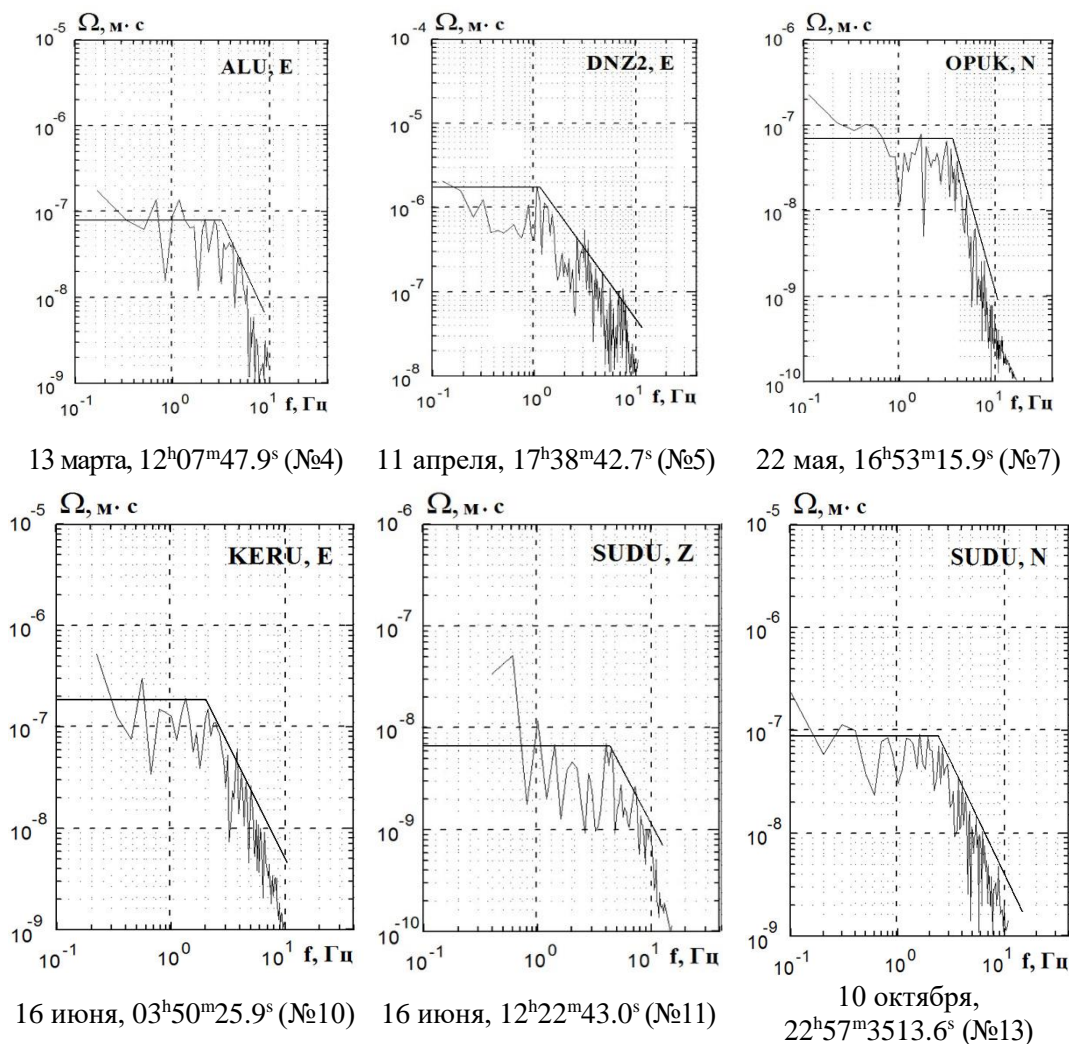


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров *P*- и *S*-волн землетрясений Крыма 2022 г. и их аппроксимация (прямые линии) в рамках модели ω^{-2} .

Пересчет спектральной плотности амплитудного спектра в плотность энергии q сейсмических волн и интерпретация энергетических спектров осуществлялись в соответствии с работами [7, 9] по формуле, приведенной в [2].

3. ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Кинематические параметры очага землетрясения 11 апреля 2022 г.: ориентация нодальных плоскостей разрыва и направления тектонических сил, под действием которых произошло землетрясение, восстановлены с использованием

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2022 ГОДА

дислокационной модели в рамках двойного диполя [5,6]. По данным решения механизма очага (табл. 2, рис. 4) землетрясение произошло под действием горизонтальных сил сжатия близширотного направления.

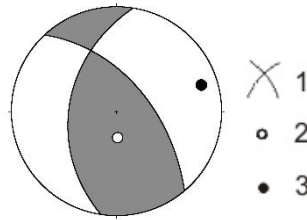


Рис. 4. Диаграммы механизма очага землетрясения 11 апреля 2022 г. (№ 5 — по таблице 1): 1 — нодальные линии; 2, 3 — оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно; зачернена область волн сжатия.

В очаге произошел взбросо-сдвиг активного крыла разрыва. При этом взбросовая составляющая подвижки преобладала над сдвиговой. Нодальная плоскость NP1 северо-восточного простирания, наклонная к северо-востоку, плоскость NP2 — близмеридианального простирания, наклонная с падением на запад.

Таблица 2.

Параметры механизма очага землетрясения 11 апреля 2022 г.

Дата г м д	t_0 , ч мин с	h , км	M_w	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
				T		N		P		$NP1$			$NP2$		
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$
2022.11.04	17 38 42.7	23	4.6	64	178	25	337	8	71	320	58	60	187	43	128

С использованием параметров механизма очага (табл. 2) определена направленность излучения из источника на станции регистрации для учета соответствующей поправки $R_{\theta\phi}$ при расчете динамических параметров очага данного сейсмического события.

Динамические параметры очага: сейсмический момент M_0 , радиус круговой дислокации r_0 , сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ϵ , кажущееся напряжение $\eta\bar{\sigma}$, величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$, средняя подвижка по разрыву \bar{U} , энергия образования дислокации в очаге E_U и моментная магнитуда M_w рассчитаны по формулам, приведенным в [1] на основе работ [7, 8, 10–12].

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 . Другие исходные данные, такие как параметры среды в окрестности очаговой зоны, условия под станциями регистрации и на

пути распространения сейсмических волн, подбирались в соответствии с местом расположения гипоцентра каждого землетрясения [7]. Для наиболее сильного землетрясения 11 апреля в расчеты введена реальная поправка $R_{\theta\phi}$ за направленность излучения на каждую станцию регистрации, для остальных при неизвестном механизме очага – принято среднее значение $R_{\theta\phi}=0.4$ [7] и одинаковое для всех станций. Вычисление средних значений параметров (S) и стандартных отклонений (δS) выполнено, как и прежде, по станционным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [7]. Средние значения радиационного трения $\Delta\sigma$, вычислялись по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\bar{\sigma}$ без вычисления δS , поскольку станционные значения получились знакопеременными. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Для половины землетрясений динамические параметры получены по группе независимых станционных определений ($N \geq 4$), для четырех – по записям одной станции, но с использованием разных типов волн (Табл. 3). Только для двух относительно слабых сейсмических толчков (№ 4 и № 7), с энергетическим классом $K_{II} = 7.1-7.2$, динамические параметры рассчитаны по спектрам записей только S -волн на одной из ближайших к очагу станций «Алушта» и «Опук», расположенных, соответственно, на эпицентральных расстояниях $\Delta = 24$ км и $\Delta = 59$ км.

Таблица 3.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2022 год

Станция	Волна	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, М·с	$\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, М·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{\eta} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\bar{\sigma} \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^8$, Дж	M_w^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№ 1. 17 января, $t_0=03$ ч 31 мин 08.3 с; $\phi = 44.25^\circ$, $\lambda = 34.30^\circ$; $h = 24$ км; $K_{II} = 7.1$															
ALU	P	Z	49	0.002		6.5	0.22	0.35	0.22	0.75	0.02	2.13	-2.02	0.08	2.17
ALU	S	N+E	49		0.09	4.1	1.14	0.33	1.42	4.74	0.11	0.42	0.29	0.27	2.64
S - среднее значение							0.5	0.34	0.56	1.88	0.05	0.94	-0.66	0.15	2.4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
δS - стандартное отклонение							0.36	0.01	0.4	0.4	0.37	0.35		0.26	0.24
№ 3. 08 марта, $t_0=13$ ч 36 мин 51.3 с; $\phi = 44.60^\circ$, $\lambda = 34.51^\circ$; $h = 8$ км; $K_{II} = 7.1$															
ALU	P	Z	12	0.006		6.8	0.21	0.31	0.32	1.08	0.02	2.23	-2.07	0.011	2.16
ALU	S	N+E	12		0.35	4	1.39	0.3	2.3	7.67	0.16	0.34	0.8	0.53	2.7
SUDU	P	Z	50	0.004		6.5	0.43	0.32	0.57	1.9	0.04	1.1	-0.8	0.04	2.36
SUDU	S	N+E	50		0.06	3.4	1.05	0.35	1.07	3.57	0.09	0.45	0.08	0.19	2.62
S - среднее значение							0.6	0.32	0.82	2.74	0.06	0.78	-0.37	0.08	2.45

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2022 ГОДА

Продолжение таблицы 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
№ 4. 13 марта, $t_0=12$ ч 07 мин 47.9 с; $\varphi = 44.53^\circ$, $\lambda = 34.19^\circ$; $h = 13$ км; $K_{\Pi} = 7.6$																
ALU	S	N+E	24		0.1	4.1	1.08	0.31	1.6	5.34	0.12	1.24	-0.44	0.29	2.63	
№ 5. 11 апреля, $t_0=17$ ч 38 мин 42.7 с; $\varphi = 42.25^\circ$, $\lambda = 31.35^\circ$; $h = 23$ км; $K_{\Pi} = 12.0$																
YAL	S	N+E	337		0.8	1.25	428	1.07	15.2	50	3.94	12.5	-4.89	1080	4.36	
ALU	P	Z	366	0.1		2.3	598	1.01	25.2	84.1	6.19	8.93	3.69	2510	4.45	
ALU	S	N+E	366		4.2	1.2	979	1.12	30.7	102	8.32	5.45	9.91	5010	4.6	
SIM	S	N+E	374		3.0	1.18	987	1.14	29.4	98.1	8.11	5.41	9.31	4840	4.6	
DNZ2	S	N+E	379		2.5	1.15	1040	1.17	28.8	96	8.14	5.12	6.28	5010	4.61	
SUDU	P	Z	416	0.5		2.2	1060	1.06	39.3	131	10.1	5.02	14.6	6960	4.62	
SUDU	S	N+E	416		3.5	1.2	1100	1.12	34.4	115	9.32	4.86	12.3	6290	4.63	
S - среднее значение								842	1.1	28	93.1	7.44	6.34	7.66	3928	4.55
δS - стандартное отклонение								0.06	0.01	0.05	0.05	0.05	0.06		0.1	0.09
№ 6. 20 апреля, $t_0=02$ ч 46 мин 55.5 с; $\varphi = 44.49^\circ$, $\lambda = 34.08^\circ$; $h = 14$ км; $K_{\Pi} = 6.3$																
YAL	P	Z	6	0.01		9	0.05	0.26	0.13	0.45	0.008	2.25	-2.18	0.001	1.75	
YAL	S	N+E	6		0.022	5.2	0.16	0.26	0.4	1.34	0.025	0.76	-0.56	0.01	2.07	
S - среднее значение								0.09	0.26	0.23	0.78	0.014	1.3	-1.19	0.003	1.91
δS - стандартное отклонение								0.25	0	0.24	0.24	0.25	0.24		0.5	0.16
№ 7. 22 мая, $t_0=16$ ч 53 мин 15.9 с; $\varphi = 44.58^\circ$, $\lambda = 36.27^\circ$; $h = 11$ км; $K_{\Pi} = 7.2$																
OPUK	S	N+E	59		0.1	3.8	1.65	0.31	2.34	7.81	0.18	0.41	0.76	0.65	2.75	
№ 9. 3 июня, $t_0=23$ ч 58 мин 02.3 с; $\varphi = 44.33^\circ$, $\lambda = 34.25^\circ$; $h = 16$ км; $K_{\Pi} = 6.3$																
YAL	P	Z	19	0.003		8.0	0.22	0.29	0.38	1.27	0.03	0.56	-0.36	0.014	2.16	
YAL	S	N+E	19		0.03	5.0	0.36	0.27	0.81	2.72	0.05	0.33	0.07	0.05	2.31	
S - среднее значение								0.28	0.28	0.55	1.86	0.04	0.43	-0.16	0.026	2.24
δS - стандартное отклонение								0.1	0.01	0.16	0.16	0.11	0.11		0.28	0.08
№ 10. 16 июня, $t_0=03$ ч 50 мин 25.9 с; $\varphi = 44.65^\circ$, $\lambda = 37.00^\circ$; $h = 17$ км; $K_{\Pi} = 10.5$																
OPUK	S	N+E	78		2.0	2.15	47.6	0.62	8.58	28.6	1.3	7.08	-2.79	68	3.72	
KERU	P	Z	84	0.17		3.9	30.2	0.6	6.22	20.7	0.9	11.1	-8.04	31.3	3.59	
KERU	S	N+E	84		0.65	2.3	22.1	0.58	4.87	16.2	0.69	15.3	-12.8	17.9	3.5	
SUDU	P	Z	159	0.065		3.8	26.8	0.61	5.11	17.0	0.76	12.5	-10	22.9	3.56	
SUDU	S	N+E	159		0.6	2.25	47.3	0.6	9.8	32.6	1.4	7.11	-2.2	77.2	3.72	
ALU	P	Z	205	0.01		3.8	5.32	0.61	1.01	3.38	0.15	63.2	-62.7	0.9	3.09	
ALU	S	N+E	205		0.6	2.3	48.8	0.58	10.8	36	1.53	6.9	-1.5	87.8	3.73	
YAL	S	N+E	225		0.3	2.3	33.5	0.58	7.39	24.6	1.04	10.1	-6.36	41.2	3.62	
SIM	P	Z	229	0.04		3.5	37.9	0.67	5.64	18.8	0.91	8.9	-6.06	35.6	3.66	
SIM	S	N+E	229		0.1	2.35	18.1	0.57	4.27	14.2	0.6	18.6	-16.5	12.9	3.44	
SEV	P	Z	262	0.008		3.9	10.8	0.6	2.23	7.44	0.32	31	-29.9	4.03	3.29	
SEV	S	N+E	262		0.1	2.4	20.7	0.56	5.2	17.3	0.7	16.2	-13.6	18	3.48	
S - среднее значение								24.78	0.6	5.1	16.9	0.74	13.57	-11	20.1	3.53
δS - стандартное отклонение								0.08	0.006	0.08	0.08	0.08	0.08		0.16	0.16

Продолжение таблицы 3.

№ 11. 16 июня, $t_0=12$ ч 22 мин 43.0 с; $\varphi = 44.64^\circ$, $\lambda = 37.01^\circ$; $h = 19$ км; $K_{II} = 9.1$															
SUDU	P	Z	162	0.07		4.2	4.69	0.55	1.2	4.02	0.16	4.53	-3.93	0.94	3.05
SUDU	S	N+E	162		0.09	2.7	7.2	0.5	2.57	8.57	0.31	2.95	-1.66	3.09	3.17
S - среднее значение						5.8	0.52	1.76	5.9	0.22	3.65	-2.77	1.7	3.11	
δS - стандартное отклонение						0.09	0.02	0.16	0.16	0.14	0.09		0.26	0.06	
№ 12. 02 сентября, $t_0=10$ ч 11 мин 35.0 с; $\varphi = 44.58^\circ$, $\lambda = 34.56^\circ$; $h = 20$ км; $K_{II} = 8.4$															
YAL	P	Z	34	0.012		5.3	1.64	0.44	0.85	2.82	0.09	3.49	-3.06	0.23	2.75
YAL	S	N+E	34		0.12	3.3	2.69	0.41	1.75	5.84	0.17	2.13	-1.25	0.79	2.89
SUDU	P	Z	49	0.013		5.4	2.85	0.43	1.56	5.19	0.16	2.01	-1.23	0.74	2.91
SUDU	S	N+E	49		0.15	3.2	4.16	0.42	2.48	8.25	0.25	1.37	-0.13	1.72	3.02
SIM	P	Z	54	0.03		5.2	5.08	0.45	2.48	8.25	0.27	1.13	0.11	2.1	3.07
SIM	S	N+E	54		0.15	3.1	4.21	0.43	2.3	7.65	0.24	1.35	-0.2	1.62	3.02
SEV	P	Z	70	0.003		5.5	0.88	0.42	0.5	1.68	0.05	6.53	-6.28	0.07	2.56
SEV	S	N+E	70		0.045	3.35	1.79	0.40	1.22	4.07	0.12	3.2	-2.58	0.37	2.77
S - среднее значение						2.54	0.42	1.45	4.85	0.15	2.25	-1.53	0.61	2.9	
δS - стандартное отклонение						0.09	0.01	0.09	0.09	0.09	0.09		0.18	0.09	
№ 13. 10 октября, $t_0=22$ ч 57 мин 13.6 с; $\varphi = 44.36^\circ$, $\lambda = 34.39^\circ$; $h = 28$ км; $K_{II} = 9.0$															
YAL	P	Z	23	0.04		5.2	5.01	0.45	2.44	8.15	0.26	4.24	-3.02	2.04	3.07
YAL	S	N+E	23		0.1	3.3	2.39	0.41	1.56	5.21	0.15	8.87	-8.09	0.62	2.86
ALU	P	Z	36	0.01		5.0	1.56	0.47	0.68	2.25	0.08	13.6	-13.3	0.17	2.73
ALU	S	N+E	36		0.6	3.0	10.7	0.45	5.25	17.5	0.6	1.98	0.6	9.37	3.29
SEV	P	Z	60	0.006		5.1	1.37	0.46	0.63	2.1	0.07	15.5	-15.2	0.14	2.69
SEV	S	N+E	60		0.075	3.25	3.26	0.41	2.03	6.78	0.2	6.5	-5.49	1.11	2.95
SUDU	P	Z	76	0.06		4.3	9.98	0.54	2.75	9.17	0.36	2.13	-0.75	4.58	3.27
SUDU	S	N+E	76		0.15	2.9	4.77	0.46	2.11	7.03	0.24	4.46	-3.4	1.68	3.06
DNZ2	P	Z	146	0.004		5.2	2.03	0.45	0.99	3.31	0.11	10.4	-9.94	0.34	2.81
DNZ2	S	N+E	146		0.09	3.2	8.75	0.42	5.21	17.4	0.53	2.43	0.17	7.59	3.23
S - среднее значение						3.87	0.45	1.87	6.23	0.2	5.48	-4.55	1.2	3.0	
δS - стандартное отклонение						0.1	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1		0.2	0.17	
№ 14. 26 декабря, $t_0=17$ ч 14 мин 32.1 с; $\varphi = 44.64^\circ$, $\lambda = 34.54^\circ$; $h = 16$ км; $K_{II} = 7.5$															
ALU	P	Z	11	0.025		6.0	0.86	0.34	0.73	2.42	0.07	1.11	-0.75	0.1	2.56
ALU	S	N+E	11		0.2	4.0	1.25	0.32	1.72	5.73	0.13	0.76	0.01	0.36	2.67
YAL	S	N+E	35		0.03	4.1	0.55	0.31	0.82	2.72	0.06	1.72	-1.32	0.07	2.42
Продолжение таблицы 3.															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SIM	S	N+E	48		0.015	4.2	0.42	0.3	0.67	2.24	0.05	2.25	-1.91	0.05	2.35
SEV	S	N+E	69		0.01	4.3	0.39	0.29	0.67	2.23	0.05	2.43	-2.09	0.04	2.33
S - среднее значение						0.63	0.3	0.86	2.85	0.07	1.51	-1.08	0.09	2.46	
δS - стандартное отклонение						0.09	0.01	0.08	0.08	0.08	0.1		0.17	0.12	
Примечание: $\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс – спектральная плотность по полному вектору колебаний поперечной волны (N+E). Номера землетрясений соответствуют табл. 1.															

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2022 ГОДА

Наибольшие значения динамических параметров (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, \bar{u} , E_u и M_w) получены для землетрясения 11 апреля с $K_{II} = 12.0$, произошедшего в западной части Черного моря (район 9), а наименьшие — для 2 слабых толчков 20 апреля и 3 июня с $K_{II} = 6.3$ (№ 6 и № 9). В целом, с ростом энергетического уровня землетрясений количественные значения динамических параметров очагов увеличивались в пределах разброса измеряемых величин. Радиационное трение $\Delta\sigma_r$ для исследованных землетрясений в основном имело отрицательное значение, что в соответствии с [11] указывает на сложное скольжение разрыва в очаге за счет неравномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах. Во всем диапазоне энергий средняя величина сброшенных напряжений не превысила $\Delta\sigma = 28 \cdot 10^5$ Па (28 бар), а кажущихся напряжений $\eta\sigma < 13.6 \cdot 10^5$ Па (13 бар).

Как и в предыдущие годы [1, 2] наилучшая сходимость станционных определений (табл. 3), получена для радиуса круговой дислокации преимущественно при стандартном отклонении $\delta r_0 \leq 0.01$. Наибольший разброс данных по станционным определениям отмечен для величины энергии дислокации E_u , достигающий иногда более одного порядка. Значения моментных магнитуд M_w для большинства землетрясений определены с погрешностью не выше ± 0.1 .

Наименьшие различия всех индивидуальных станционных определений динамических параметров очагов и, соответственно, малые величины δS получены для землетрясения 11 апреля, для которого очаговые параметры восстановлены по группе независимых определений ($N=7$) и с учетом направленности излучения сейсмической энергии из источника на станции регистрации ($R_{\theta\phi}$), рассчитанной из решения механизма очага. В то же время, даже в этом случае невозможно добиться полной сходимости результатов, т. к. есть трудности корректного учета индивидуальных станционных особенностей записей сейсмических колебаний на станциях регистрации, расположенных в разных инженерно-геологических условиях и оснащенных различающейся сейсмической аппаратурой [13]. В связи с этим, чтобы нивелировать станционные различия и получить более надежные оценки очаговых параметров в данной работе привлекались для анализа записи максимально возможного числа сейсмических станций.

В целом, полученные средние значения основных очаговых параметров: M_0 , r_0 и $\Delta\sigma$ землетрясений за 2022 год соответствуют долговременным $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ [14, 15], попадая в диапазон доверительного интервала (рис. 5).

Исключение составляет только завышенное значение сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ для относительно слабого землетрясения 22 мая (№ 7) с $K_{II} = 7.2$ из Керченско-Анапского района, очаговые параметры которого восстановлены по записи поперечных S -волн на одной новой станции ОПУК.

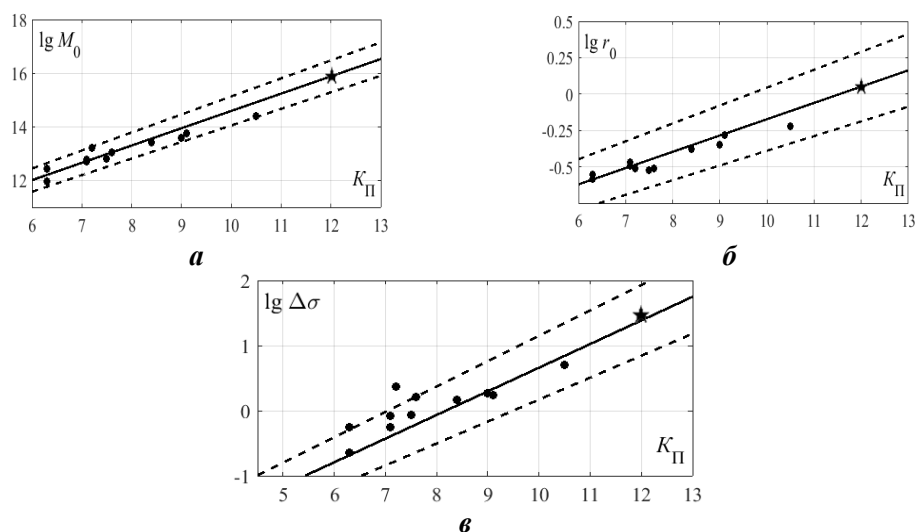


Рис. 5. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2022 г.: **a** — сейсмического момента M_0 , **б** — радиуса круговой дислокации r_0 и **в** — сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$ из [14, 15]. Пунктир — пределы погрешностей долговременных зависимостей, звездочка – значения для землетрясения с учетом направленности излучения из очага.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Большинство энергетических спектров землетрясений 2022 года имело характерную резонансную форму с одним выраженным максимумом частот f_{qmax} , на которые приходится наибольшая доля плотности сейсмической энергии q_{max} (рис. 6).

Полученные главные характеристики спектров энергии: частота f_{qmax} , с максимальной плотностью энергии q_{max} и логарифмическая ширина максимума спектра δf_q на уровне 0.75 от максимального значения q_{max} в высокочастотной (f_{q1}) и низкочастотной (f_{q2}) части спектра $\delta f_q = (f_1 - f_2)$, приведены в табл. 4.

Результаты расчета f_{qmax} и δf_q даны по разным типам волн и составляющим записи: продольные волны по вертикальной составляющей Z, поперечные – по горизонтальным север-юг (N) и восток-запад (E).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2022 ГОДА

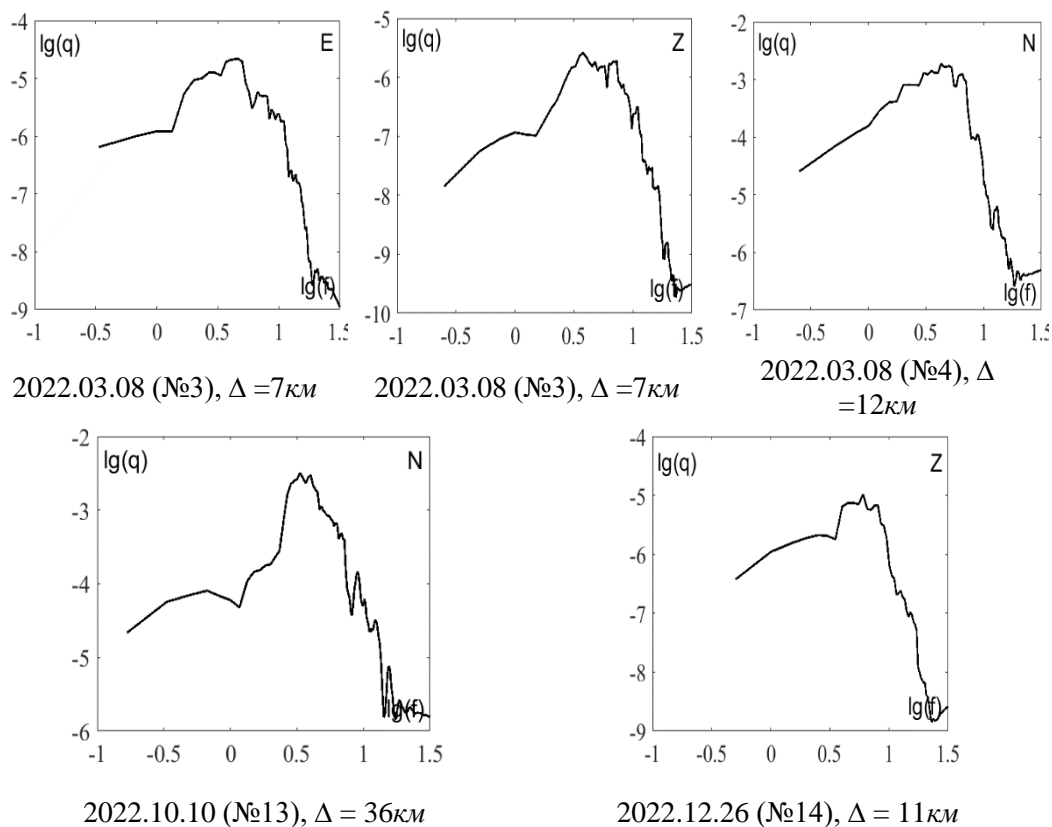


Рис. 6. Примеры сглаженных энергетических спектров землетрясений Крыма 2022 г. по записям объемных сейсмических волн на станции «Алушта». Номера землетрясений даны по табл. 1.

Таблица 4.
Основные характеристики энергетических спектров землетрясений 2022 г.
по данным станции «Алушта»

№	Дата, д м	$K_{П}$	Δ , км	$f_{qmax}, Гц$			$\delta f_q (f_1 - f_2), Гц$		
				Z	N	E	Z	N	E
1	17.01	7.1	49	-	3.34	2.17	-	1.9	1.65
2	02.05	5.4	13	5.54	-	-	2	-	-
3	08.03	6.1	7	3.76	6	4.69	2.1	2	1.5
4	08.03	7.1	12	5.1	4.26	4	2.1	2.2	2.3
5	13.03	7.6	24	5.54	3.67	4	1.5	2.1	2.14
6	11.04	12.0	336	3.29	2.7	1.58	1.6	4.4	3
10	16.06	10.5	207	5.6	5.1	5	2.5	2	1.9
13	10.10	9.0	36	6	3.3	2.5	1.87	1.7	1.75
14	26.12	8.0	11	6	4.4	4.4	2	2	1.7

В работе [16] имеющиеся энергетические спектры за период 2014–2021 гг. условно были разделены на 7 групп, отличающиеся эпицентрными расстояниями: 1 — (7±3) км; 2 — (23±7) км; 3 — (46±3) км; 4 — (85±15) км; 5 — (167±13) км; 6 — (243±22) км; 7 — (374±39) км. В пределах каждой группы были получены средние значения параметров f_{qmax} и δf_q . По результатам настоящей работы с дополнением статистики по 9 землетрясениям, средние значения энергетических параметров и диапазоны эпицентральных расстояний уточнены и представлены в табл. 5.

Таблица 5.

Спектральные характеристики энергетических спектров землетрясений 2014–2022 г. по данным станции «Алушта»

Группа	K_{Π}	Δ , км	f_{qmax} , Гц		
			Z	N	E
1	5.4-8	9±2	5.8±1.7	4.4±0.8	4.1±0.8
2	5.2-9.8	23±2	5.5±1	4.4±0.3	3.8±0.9
3	7.2-11.2	45±4	5.4±0.3	3.3±0.3	2.56±0.3
4	7.7-10.1	87±14	5.1±0.6	4±0.7	3.8±0.8
5	8.7-10.8	167±13	5.4±0.9	3.2±0.8	2.5±1.1
6	8.5-11.6	240±16	4.7±0.9	3.1±0.7	2.5±0.9
7	10.9-13.1	361±34	2.9±0.5	2.6±0.1	1.93±0.4

Здесь мы приводим только характеристики f_{qmax} с максимальной плотностью энергии q_{max} , поскольку для них ранее в работе [16] получена корреляционная связь частоты спектра f_{qmax} поперечных S-волн с энергетическим уровнем (K_{Π}) землетрясения для фиксированного диапазона эпицентральных расстояний (23±7) км:

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

В этот диапазон эпицентральных расстояний попадает энергетический спектр землетрясения 13.03.2022 г. (№ 5 по табл. 1) с эпицентральным расстоянием 24 км, дополнивший статистику по второй группе очагов ($\Delta = 23 \pm 2$ км по табл. 5). Сравнение полученных спектральных характеристик f_{qmax} (N- и E-компоненты) для этого землетрясения (табл. 4) и рассчитанных по формуле (1), а также среднего значения по 2-ой группе (табл. 5) показало их соответствие.

Статистика группы с эпицентральными расстояниями (46±3) км, дополнена данными по спектрам землетрясений 01.17 (№ 1) и 10.10 (№ 13). Максимальные значения f_{qmax} по N- и E-компонентам спектров этих сейсмических событий попадают в диапазон средних значений 3-ей группы (45±4 км по табл. 5). В то же время Z-компонента выше диапазона средних значений, что, вероятно, связано с небольшой статистикой событий по данной группе. Спектры четырех землетрясений дополнили статистику по первой группе с несколько расширенным диапазоном эпицентральных расстояний и уточненными средними значениями по сравнению с [16]. Данные по остальным энергетическим спектрам землетрясений 2022 года, также попадают в диапазоны средних значений f_{qmax} для соответствующих групп.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2022 ГОДА

Отмеченные незначительные выбросы по группам, возможно, связаны с малым показателем статистических данных, требующих пополнения и обновления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектральные и динамические параметры очагов 14 землетрясений Крымско-Черноморского региона 2022 года в диапазоне энергетических классов $K_{II}=6.3\div 12.0$ изучены как по амплитудным, так и энергетическим спектрам продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных группой региональных сейсмических станций Крыма. Средние значения динамических параметров очагов землетрясений 2022 г. в большинстве случаев оценены по нескольким станциям и по разным типам волн, что обеспечило удовлетворительную сходимость станционных определений при малом значении стандартных отклонений (δS) и их соответствие долговременным зависимостям от энергетического уровня землетрясений.

Кинематические параметры очага восстановлены для одного наиболее сильного землетрясения, произошедшего в западной части Черного моря 11 апреля 2022 г. По данным решения механизма очага, землетрясение произошло под действием горизонтальных сил сжатия, ориентированных близшироотно. В очаге произошел взбросо-сдвиг активного крыла разрыва с преобладанием взбросовой подвижки. Такой тип подвижки не противоречит обстановке сейсмогенеза в западной части Крымско-Черноморского региона [17].

С учетом энергетических спектров за период 2014–2021 гг. и новых определений за 2022 гг., откорректированы 7 групп землетрясений по диапазонам эпицентральных расстояний до станции «Алушта» и уточнены средние значения частот f_{qmax} с максимальной плотностью энергии q_{max} для каждой выделенной группы. Новые данные, полученные по спектральным параметрам землетрясений 2022 года, не противоречат диапазонам средних значений f_{qmax} по своим группам.

Исследования необходимо продолжить для получения статистически представительных данных в широком энергетическом и пространственно-временном диапазоне по спектральным и очаговым параметрам землетрясений для использования выявленных особенностей и закономерностей в решении задач научного и научно-прикладного характера.

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 2021 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2022. Том 8(74), №4. С. 80–96.
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. European-Mediterranean Seismological Center [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.emsc-csem.org/Earthquake/seismologist.php> (дата обращения: 01.03.2023).

5. Введенская А. В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
6. Балакина Л. А., Введенская А. В., Голубева Н. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 198 с.
7. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
8. 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.
9. Ризниченко Ю. В., Сейдузова С. С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. М.: Наука, 1984. 180 с.
10. Аптекман Ж. Я., Белавина Ю. Ф., Захарова А. И., Зобин В. М., Коган С. Я., Корчагина О. А., Москвина А. Г., Поликарпова Л. А., Чепкунас Л. С. Спектры *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // *Вулканология и сейсмология*. 1989. № 2. С. 66–79.
11. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
12. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale // *J. Geophys. Res.* 1979, V. 84, nn. 35, pp. 2348–2350.
13. Свидлова В. А., Бондарь М. Н., Бойко В. А. Сейсмичность Крыма в 2021 году // *Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология*. 2022. Том 8(74), №4. С. 7–79.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Вольфман Ю. М., Пустовитенко Б. Г., Колесникова Е. Я., Останин А. М. Обстановки сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // *Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В. И. Вернадского. География. Геология*. 2018. Т. 2(68), № 4. С. 206–250.

SPECTRAL AND FOCAL PARAMETERS OF THE 2022 CRIMEA EARTHQUAKES

Pustovitenko B. G.¹, Eredzhepov E. E.^{1,2}, Bondar M. N.^{1,2}

¹State Autonomous Institution “Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities”, », Simferopol, Russian Federation

²Institute of seismology and geodynamics V. I. Vernadsky Crimean Federal University», Simferopol, Russian Federation

E-mail: bpustovitenko@mail.ru

The results of a study of the spectral, kinematic, dynamic and energy characteristics of the sources of 14 earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2022 in the range of energy classes $K_{II} = 5.4–12$ are presented. For 12 earthquakes, the dynamic parameters of the

sources (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \bar{u} , Eu и Mw) were reconstructed from the amplitude spectra of body seismic waves using Brun's theoretical dislocation model (ω^{-2}).

For the strongest earthquake with $K_{II}=12$, a solution to the focal mechanism was obtained. It was established that a reverse-slip fault occurred in the source under the influence of compression forces. The spectral properties of seismic waves from 9 earthquakes were also examined using energy spectra using seismograms from the «Alushta» station.

Keywords: source mechanism, amplitude spectrum, Brun model, spectral density, angular frequency, dynamic parameters of the source, energy spectrum.

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. 2020, V. 6(72), no. 4, pp. 67–85 (in Russian).
2. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., Bondar' M. N. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2021 goda (Spectral and dynamic parameters of the centers of Crimea earthquakes in 2021). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2022, V. 8(74), no. 4, pp. 80–96 (in Russian).
3. Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E. Ob energeticheskoy ocenke zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (On the energy assessment of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). Magnituda i energeticheskaya klassifikaciya zemletryasenij. M.: IFZ AN SSSR. 1974, V. 2, pp. 113–125 (in Russian).
4. European-Mediterranean Seismological Center. [Elektronnyj resurs]. URL: <http://www.emsc-csem.org/Earthquake/seismologist.php> (data obrashcheniya: 01.03.2023).
5. Vvedenskaya A. V. Issledovaniya napryazhenij i razryvov v ochagah zemletryasenij pri pomoshchi teorii dislokacij (Study of stresses and ruptures in earthquake sources using the theory of dislocation). M.: Nauka, 1969. 260 p. (in Russian).
6. Balakina L. A., Vvedenskaya A. V., Golubeva N. V., Misharina L. A., Shirokova E. I. Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij. (Field of elastic stresses of the Earth and the mechanism of earthquake foci). Moscow: Nauka Publ. 198 p. (in Russian).
7. 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).
8. 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.
9. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. Spektral'no-vremennaya harakteristika sejsmicheskoy opasnosti (Spectral-temporal characteristics of seismic hazard). M.: Nauka, 1984. 180 p. (in Russian).
10. 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. Spektiry P -voln v zadache opredeleniya dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Perekhod 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 sejsmologiya. 1989, no. 2, pp. 66–79 (in Russian).
11. Kostrov B. V. Mehanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya (The mechanics of the source of a tectonic earthquake). M.: Nauka, 1975. 179 p. (in Russian).
12. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 1979, V. 84. no. 35, pp. 2348–2350.
13. Svidlova V. A., Bondar' M. N., Boiko V. A. Seysmichnost' Kryma v 2021 g. (Seismicity of Crimea in 2021). Uchenyye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2022, V. 8(74), no. 4, pp. 7–79 (in Russian).
14. 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).
15. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Izucheniye napryazhenij i deformacii v ochagovyh 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).
 16. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Spektral'nye svoystva plotnosti energii ob'emnyh seysmicheskikh voln zemletryasenij Kryma po dannym stancii «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*. Moskow: IYET RAN, 2022, pp. 324–329 (in Russian).
 17. Vol'fman Yu. M., Pustovitenko B. G., Kolesnikova E. Ya. Obstanovki sejsmogeneza Krymsko-Chernomorskogo regiona (po dannym reshenij mehanizmov ochagov zemletryasenij) (Environments of seismogenesis in the Crimean-Black Sea region (according to the solutions of earthquake source mechanisms)). *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2018, V. 4(70), no. 4, pp. 206–250 (in Russian).

Поступила в редакцию 24.10.2023 г.