

II. СПЕКТРЫ и ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.348.435

СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА в 2020 году

Б.Г. Пустовитенко¹, Э.Э. Эреджепов¹, М.Н. Бондарь^{1,2}

¹ГИАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», bpustovitenko@mail.ru

²Институт сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, epicrimea@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты расчета и анализа спектральных и очаговых параметров 11 землетрясений Крымско-Черноморского региона 2020 г. в диапазоне энергетических классов $K_{II}=5.2\div 11.3$. Динамические параметры очагов восстановлены по 70 амплитудным спектрам записей продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных восемью цифровыми региональными сейсмическими станциями. Для двух наиболее сильных землетрясений 2020 г.: 15 марта и 12 апреля – получены решения механизма очагов. Тип подвижки в очагах обоих землетрясений – взброс. Дополнительно спектральные свойства очагов десяти слабых землетрясений, произошедших вблизи Южного берега Крыма, рассмотрены по энергетическим спектрам записей на станции «Алушта». Дается анализ полученных результатов.

Ключевые слова: механизм очага, амплитудный спектр, модель Бруна, спектральная плотность, угловая частота, сейсмический момент, радиус дислокации, сброшенное и кажущееся напряжения, подвижка по разрыву, радиационное трение, энергетический спектр.

Для цитирования: Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2020 году // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – С. 231–241. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.21> EDN: KOLHOO

Введение. Задачей данной статьи является комплексное представление и анализ очаговых параметров (кинематических, динамических и энергетических) землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2020 год. Для исследования спектральных свойств землетрясений и восстановления динамических параметров очагов отобрано пять представительных сейсмических событий в диапазоне энергетических классов $K_{II}=9.3\div 11.3$ и шесть сравнительно слабых с $K_{II}=5.2\div 7.9$, но представляющих особый интерес, т.к. одни произошли в слабоизученном районе на Тарханкутском полуострове, а другие – непосредственно вблизи Южного берега Крыма. Для двух наиболее сильных землетрясений с $K_{II}\geq 10$ по волновым формам продольных волн на ближайших и удаленных станциях мира, окружающих очаги в широком азимутальном створе, получены их кинематические характеристики из решения механизмов очагов. Кроме того, для оценки частотного состава колебаний, несущих максимальную сейсмическую энергию, по записям станции «Алушта» исследованы спектры энергии сейсмических волн слабых землетрясений с $K_{II}=5.2\div 7.1$, произошедших в Алуштинской очаговой зоне.

Исходные данные. Для расчета амплитудных спектров Фурье и определения на их основе динамических параметров очагов использованы записи землетрясений 2020 г., отвечающие критериям высокого качества. Наибольшее количество изученных землетрясений (по четыре события) произошло в Алуштинской и Керченско-Анапской зонах очагов (районы № 3 и № 5), два – в Северо-Западной (район № 8) и одно – в Степном Крыму на Тарханкутском полуострове (табл. 1, рис. 1).

По записям объемных волн на восьми региональных сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Тарханкут» (TARU), «Донузлав» (DNZ2) и «Керчь» (KERU), рассчитано и обработано 70 амплитудных спектров: 14 для продольных (P) и 56 – для поперечных (S) волн. Для решения механизма очагов двух землетрясений (в табл. 1 отмечены *) использованы знаки первых вступлений продольных волн на региональных станциях Крыма и международной сети, опубликованные в [1], а также дополнительно определенные по собранным первичным записям на станциях, окружающих очаг в более широком азимутальном створе.

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2020 г., для которых определены динамические параметры очагов

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда			K_{II}	Район
			φ°, N	λ°, E		M_s	M_w/n , (табл. 3)	M_{LWSG}		
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	4.03/11	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	3.73/9	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 [2], значения M_w/n – из табл. 3, где n – число определений, участвовавших в усреднении; * – землетрясения, для которых получены решения механизма очагов.

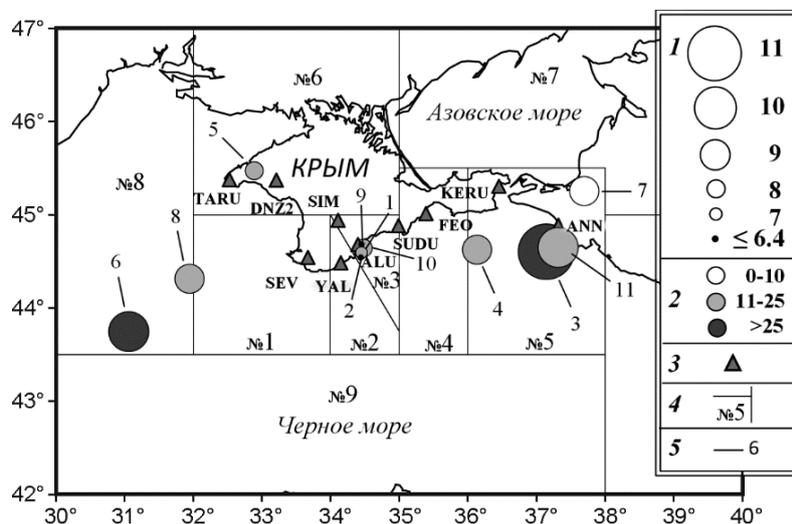


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2020 г., для которых восстановлены динамические параметры очагов

1 – энергетический класс K_{II} [3]; 2 – глубина очага; 3 – сейсмическая станции; 4 – граница района; 5 – номер землетрясения в табл. 1.

Методика расчета, обработки и интерпретации амплитудных спектров подробно описана в работе [4] и не изменилась по сравнению с таковой в предыдущие годы [5, 6 и др.]. Для поперечных волн (S) спектры рассчитывались по двум горизонтальным составляющим ($N-S$ и $E-W$), спектральная плотность вычислялась как полный вектор колебаний, а для продольных волн (P) – по вертикальной компоненте (Z). Относительная длительность τ 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}) [7]. Преобладающее большинство рассчитанных в 2020 г. спектров объемных волн удовлетворительно аппроксимируются в рамках теоретической модели Бруна. В тех немногочисленных случаях, когда форма амплитудного спектра отклонялась от данной модели (ω^{-2}), они были отбракованы и не использованы для расчета динамических параметров очагов. На рис. 2 приведены примеры амплитудных спектров записей S -волн землетрясений на новых станциях «Тарханкут» (TARU) и «Донузлав» (DNZ2).

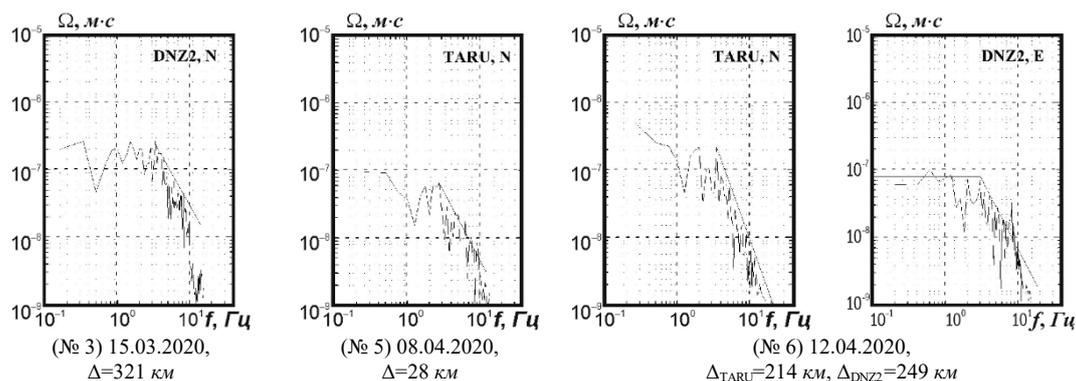


Рис. 2. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2020 г. и их аппроксимация (прямые линии) в рамках теоретической модели Бруна

Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1.

Решения механизмов очагов выполнены по стандартной методике [8] по достаточно представительной выборке исходных данных ($N=77÷84$) [9]. Параметры нодальных плоскостей и осей главных напряжений даны в табл. 2, а визуализация очагов в виде диаграмм – на рис. 3.

Таблица 2. Параметры механизмов очагов землетрясений за 2020 г. [9]

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
2020.03.15	05 36 01.1	42	4.0	51	125	15	235	35	335	232	81	75	113	18	150
2020.04.12	02 31 06.6	35	3.7	75	54	15	234	0	144	69	47	111	220	47	69

Тип подвижки в очаге землетрясения 15 марта 2020 г. (№ 3), произошедшего в Керченско-Анапском районе, – взброс по крутой плоскости NP1 юго-западного простирания и пологий сдвиг-надвиг по NP2 – юго-восточного простирания (табл. 2, рис. 3). Нодальные плоскости ориентированы диагонально.

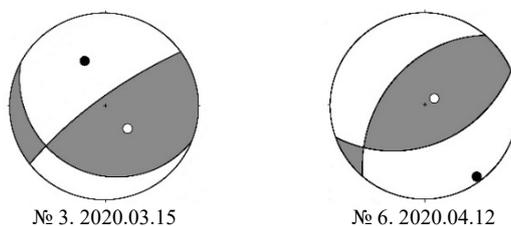


Рис. 3. Диаграммы механизма очагов землетрясений № 3 и 6 по таблице 1 (в проекции нижней полусферы)

Землетрясение 12 апреля 2020 г. (№ 6) произошло в западной части региона в переходной зоне кора-мантия под действием горизонтальных сжимающих усилий. Обе нодальные плоскости – наклонные с близдиагональным простиранием (табл. 2, рис. 3). Взбросовый тип механизма очага характерен и для других землетрясений этого района [6, 10].

По параметрам механизмов очагов землетрясений (табл. 2) определена направленность излучения из очага на станции регистрации для учета при расчете динамических параметров очагов.

Динамические параметры очага. Для восстановления динамических параметров очага в рамках дислокационной модели Бруна [7] 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 .

Все формулы для расчета динамических параметров очагов: сейсмического момента M_0 , радиуса круговой дислокации r_0 , сброшенного напряжения $\Delta\sigma$, величины деформации сдвига ε , кажущегося напряжения $\eta\sigma$, величины радиационного трения $\Delta\sigma_r$, средней подвижки по разрыву \bar{U} (или величины дислокации), энергии образования дислокации в очаге E_U и моментной магнитуды M_w – приведены в [5] по работам [4, 11–13].

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

Для большинства землетрясений динамические параметры получены по группе независимых стационарных определений (табл. 3). Для сравнительно сильного представительного землетрясения № 8 с $K_{II}=9.3$, произошедшего в северо-западной части Крыма (район № 8), пригодными для построения спектров оказались записи только S -волн на одной, ближайшей к очагу, станции «Севастополь». Для трех слабых сейсмических толчков (№№ 1, 2 и 9) с энергетическим классом $K_{II}=5.2\div 7.1$ 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 стационарным определениям с учетом логнормального закона распределения величин с соответствующим стандартным отклонением [4], кроме радиационного трения $\Delta\sigma_r$, которое определено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ по формуле из [12]. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

В итоговой табл. 3 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 $\Sigma\Omega_0$.

Таблица 3. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2020 г.

Станция	Волна	Со- ставля-	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	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{y} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^8$, Дж/м	M_w
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Землетрясение 12 марта, $t_0=06^h15^m16.0^s$ (№ 1 в табл. 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
Землетрясение 12 марта, $t_0=13^h21^m40.5^s$ (№ 2 в табл. 1)															
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	
δS – стандартное отклонение						0.17	0.07	0.36	0.35	0.29	0.15	–	0.54	0.1	
Землетрясение 15 марта, $t_0=05^h36^m01.1^s$ (№ 3 в табл. 1)															
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	–	4.2	102	0.73	11.4	19.0	1.01	26.3	-20.6	97	3.94
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	81.5	0.60	16.9	16.9	1.22	28.1	-24.4	115	3.88
S – среднее значение						137.5	0.69	18.3	29.1	1.53	19.2	-10.1	209.6	4.03	
δS – стандартное отклонение						0.04	0.02	0.06	0.06	0.04	0.03	–	0.08	0.06	
Землетрясение 1 апреля, $t_0=16^h11^m40.8^s$ (№ 4 в табл. 1)															
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	
δS – стандартное отклонение						0.24	0.03	0.31	0.32	0.3	0.24	–	0.56	0.2	
Землетрясение 8 апреля, $t_0=12^h12^m42.7^s$ (№ 5 в табл. 1)															
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	
δS – стандартное отклонение						0.05	0.013	0.07	0.08	0.07	0.05	–	0.12	0.05	

Станция	Волна	Со- ставля-	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс	$\Sigma \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta \sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{y} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta \cdot 10^5$, Па	$\Delta \sigma_r \cdot 10^5$, 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
Землетрясение 12 апреля, $t_0=02^h31^m06.6^s$ (№ 6 в табл. 1)															
SUDU	P	Z	337	0.05	–	3.0	65.7	0.82	5.22	17.4	1.04	3.63	-1.02	57.2	3.82
SUDU	S	N+E	337	–	0.65	2.0	74.1	0.71	9.15	30.5	1.57	3.22	1.36	113	3.85
YAL	S	N+E	260	–	0.16	2.2	37.2	0.64	6.11	20.4	0.95	6.41	-3.35	37.9	3.65
SIM	P	Z	277	0.01	–	3.2	28.2	0.77	2.72	9.1	0.51	8.46	-7.1	12.8	3.57
SIM	S	N+E	277	–	0.8	2.0	68.8	0.71	8.5	28.3	1.46	3.46	0.79	97.4	3.83
SEV	S	N+E	226	–	0.2	2.1	33.8	0.67	4.82	16.1	0.79	7.6	-4.65	27.7	3.62
DNZ2	S	N+E	249	–	0.15	2.8	34.7	0.51	11.8	39.2	1.44	6.86	-0.95	68.0	3.63
TARU	S	N+E	214	–	0.25	2.7	50.2	0.52	15.2	50.8	1.94	4.75	2.87	127	3.74
ALU	S	N+E	285	–	0.42	2.1	72.1	0.67	10.3	34.4	1.69	3.3	1.85	124	3.84
S – среднее значение							48.5	0.66	7.32	24.4	1.2	4.95	-1.3	59.3	3.73
δS – стандартное отклонение							0.06	0.02	0.08	0.08	0.06	0.06	–	0.11	0.1
Землетрясение 1 июня, $t_0=13^h25^m13.8^s$ (№ 7 в табл. 1)															
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
δS – стандартное отклонение							0.1	0.002	0.1	0.1	0.1	0.11	–	0.22	0.09
Землетрясение 28 августа, $t_0=14^h20^m51.0^s$ (№ 8 в табл. 1)															
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
Землетрясение 24 октября, $t_0=08^h40^m26.5^s$ (№ 9 в табл. 1)															
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
Землетрясение 27 октября, $t_0=02^h08^m45.3^s$ (№ 10 в табл. 1)															
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
δS – стандартное отклонение							0.14	0.004	0.14	0.14	0.14	0.14	–	0.28	0.16
Землетрясение 12 декабря, $t_0=14^h54^m24.9^s$ (№ 11 в табл. 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
δS – стандартное отклонение							0.1	0.01	0.07	0.07	0.07	0.08	–	0.15	0.09

Примечание. $\Sigma \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс – спектральная плотность по полному вектору колебаний поперечной волны.

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, достигающий иногда более одного порядка, отмечен для величины энергии дислокации E_U . Соответственно, отклонение δE_U было максимальным. Значения моментных магнитуд M_w определены преимущественно с погрешностью не выше ± 0.1 . Наименьший разброс всех станционных определений отмечен для наиболее сильных землетрясений 15 марта и 12 апреля 2020 г., для которых по решению механизма очага при расчете динамических параметров учтена реальная направленность излучения из очага на каждую станцию.

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 $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\lg \Delta \sigma(K_{II})$ из [14, 15]:

$$\lg M_0 = 0.645(\pm 0.027) \cdot K_{II} + 8.142(\pm 0.271), \rho = 0.99,$$

$$\lg r_0 = 0.112(\pm 0.011) \cdot K_{II} - 1.293(\pm 0.107), \rho = 0.93,$$

$$\lg \Delta\sigma = 0.363(\pm 0.026) \cdot K_{II} - 2.97(\pm 0.23), \rho = 0.8,$$

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 $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$, полученных за длительный интервал времени аналоговой регистрации сейсмических колебаний (рис. 4 а, б). Величины сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ для большинства землетрясений 2020 г. (рис. 4 в) также не выходят за пределы доверительного интервала регрессии $\Delta\sigma(K_{II})$, построенной для периода цифровой регистрации 2007–2017 гг. [15]. Несколько выше долговременной зависимости $\Delta\sigma(K_{II})$ лежат точки $\Delta\sigma$ для двух наиболее слабых толчков с $K_{II} \leq 6.5$, произошедших вблизи Южного берега Крыма. Ранее было показано, что сброшенные напряжения существенно варьируют как в пространстве, так и во времени при одном энергетическом уровне землетрясения [15].

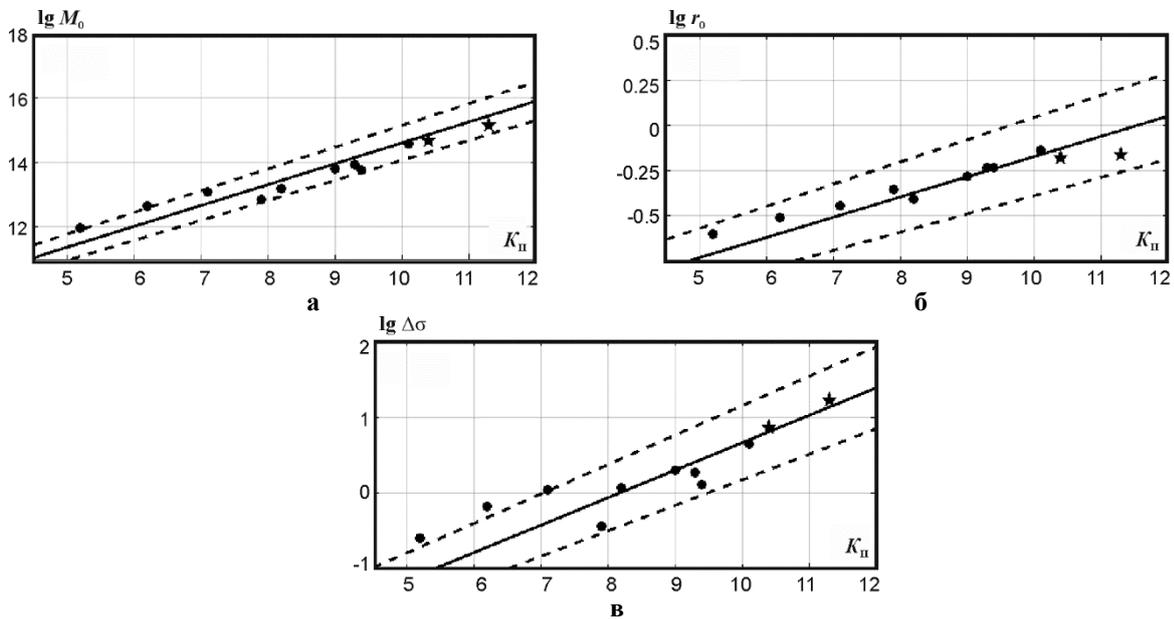


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2020 г.

а – сейсмического момента M_0 , б – радиуса круговой дислокации r_0 и в – сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ – с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ [14] и $\Delta\sigma(K_{II})$ [15]. Пунктиром обозначен доверительный интервал зависимостей, звездочкой – значения параметров с учетом механизма очага.

Наибольшие отличия r_0 от долговременных параметров получены для самого слабого землетрясения 12 марта (№ 2) с $K_{II} = 5.2$, параметры которого восстановлены только по одной станции ALU. При этом не исключены также ошибки при выборе скоростных моделей среды, т.к. для слабых очагов менее надежно определяется глубина гипоцентра и, соответственно, скоростные характеристики в окрестности очаговой зоны, используемые в расчетах r_0 .

Энергетические спектры землетрясений. Спектральные свойства очагов землетрясений 2020 г. изучены не только по амплитудным, но и по энергетическим спектрам с использованием сейсмограмм станции «Алушта», как и в предыдущие годы [4, 16].

Методика и алгоритм расчета, а также интерпретации энергетических спектров описаны в работах [4, 17].

Для построения спектров было отобрано десять землетрясений в диапазоне энергетических классов $K_{II} = 5.2 \div 7.1$, произошедших в Алуштинской очаговой зоне (район № 3) на эпицентральных расстояниях $\Delta = 4 \div 27$ км от сейсмической станции «Алушта» (табл. 4). Для более точного определения диапазона частот, на который приходится максимум плотности сейсмической энергии q_{max} , энергетические спектры сглаживались скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот, как рекомендовано в работе [17].

Примеры энергетических спектров даны на рис. 5.

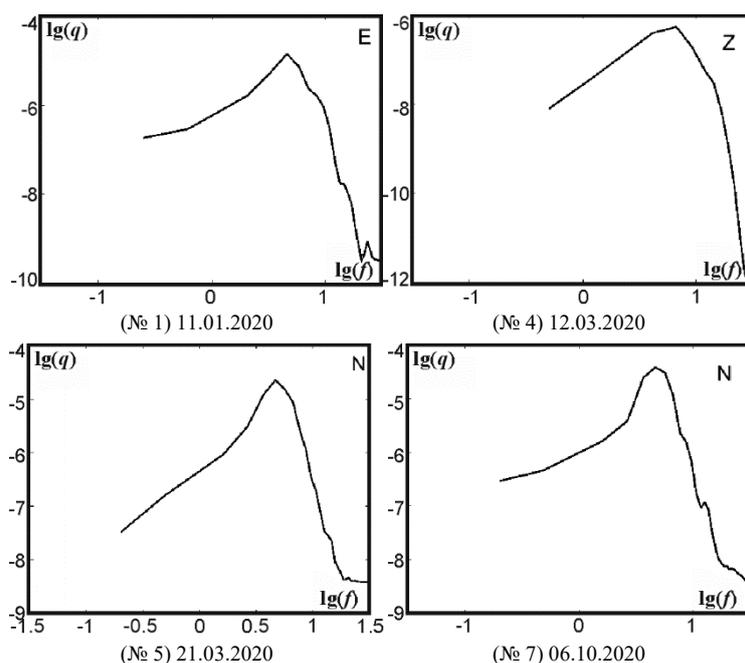


Рис. 5. Примеры энергетических спектров землетрясений 2020 г. по разным составляющим записи на станции «Алушта». Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в таблице 4

Для всех сглаженных энергетических спектров по трем компонентам записи (рис. 5) характерна резонансная форма с выраженным максимумом плотности энергии q_{max} на частоте $f_{q_{max}}$. Интерес для дальнейших исследований представляет также логарифмическая ширина спектра δf_q , т.е. ограниченная область частот f_q на уровне 0.75 от максимального значения q_{max} , определяемая по формуле:

$$\delta f_q = (f_{q1} - f_{q2}),$$

где f_{q1} – значение частоты в высокочастотной части спектра, а f_{q2} – в низкочастотной.

Для изученных землетрясений 2020 г. диапазоны значений $f_{q_{max}}$ и δf_q получились различными для разного энергетического уровня (K_{II}) и эпицентрального расстояния Δ (табл. 4).

Таблица 4. Параметры энергетических спектров по данным станции «Алушта»

№	Дата	t_0 ч мин	K_{II}	Δ , км	$f_{q_{max}}, Гц$			$\delta f_q (f_1 - f_2), Гц$		
					Z	N	E	Z	N	E
1	11.01.2020	14 56	5.3	11	8.3	4.6	4.6	3.64	3.18	2.16
2	12.03.2020	06 15	7.1	11	5.86	4.7	3.68	2.52	2.22	2.54
3	12.03.2020	13 21	5.2	16	6.7	4.6	5.76	2.49	2.84	2.96
4	12.03.2020	22 18	5.4	17	6.7	4.44	–	2.79	2.44	–
5	21.03.2020	19 29	5.8	20	2.49	4.7	4.44	3.59	2.18	3.55
6	16.08.2020	05 46	5.9	4	8.2	5.86	4.44	1.6	3.38	2.49
7	06.10.2020	19 00	6.1	26	2.5	4.7	4.4	7.55	1.69	2.22
8	24.10.2020	08 40	6.2	4	8.25	4.1	2.72	1.86	2.23	2.47
9	08.11.2020	13 49	5.4	4	2.49	4.44	4.1	4.88	2.87	4.23
10	29.12.2020	21 33	5.5	5	6.68	4.45	3.33	2.12	2.04	2.34

Ранее [18, 19] имеющаяся статистика по энергетическим спектрам землетрясений была разделена на несколько групп, отличающихся эпицентрными расстояниями до станции «Алушта». Наиболее многочисленной оказалась достаточно компактная группа с $\Delta=23\pm 3$ км, которая пополнилась еще четырьмя землетрясениями за 2020 г. с $\Delta=16\div 27$ км (табл. 4). Для этих очагов максимумы $f_{q_{max}}$ приходятся на диапазон частот для N и E-компонент, попадающих в интервал значений $f_{q_{max}}=(4.7\pm 0.3)$ Гц для ранее выделенной группы [17, 19]. Уточненные значения параметров энергетических спектров группы очагов с $\Delta=23\pm 3$ км приведены в таблице 5.

Остальные шесть слабых сейсмических событий ($K_{II}=5.4\div 6.3$), произошедших в непосредственной близости от сейсмостанции «Алушта» ($\Delta=4\div 11$ км), не попали в ранее выделенные группы. В связи с этим, с учетом единичных значений за 2018 и 2019 гг. [16], дополнительно создана новая группа (первая) с $\Delta=7\pm 3$ км (табл. 5). Значения максимальных частот энергетических спектров f_{qmax} 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 спектрального параметра (f_{qmax}) энергетических спектров для шести групп очагов землетрясений, сформированная по состоянию на 2020 г., представлена в табл. 5.

Таблица 5. Средние значения параметра энергетических спектров f_{qmax} по данным станции «Алушта» за период 2014–2020 гг. для разных диапазонов эпицентральных расстояний

Группа	K_{II}	Δ , км	f_{qmax} , Гц		
			Z	N	E
1	5.4–6.3	7±3	6.6±1.6	4.2±0.7	4.4±0.5
2	5.2–9.8	23±3	5.5±1.1	4.4±0.3	3.6±0.9
3	7.2–11.2	46±3	5.4±0.3	3.3±0.3	5.9±0.5
4	7.7–10.1	85±15	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	243±22	4.7±0.9	3.1±0.7	2.5±0.9

Несмотря на вариации индивидуальных энергетических спектров рассмотренных групп очагов и разных уровней K_{II} (табл. 5), качественно можно отметить ожидаемую (естественную) тенденцию к преобладанию высокочастотных спектров для слабых толчков и близких эпицентральных расстояний.

Предварительно получена корреляционная связь уменьшения значений f_{qmax} с ростом расстояний Δ для энергетических спектров P-волн (3) и S-волн (4) [19]:

$$\lg f_{qmax} = (0.875 \pm 0.012) - (0.085 \pm 0.006) \cdot \lg \Delta, \rho = 0.99, \quad (3)$$

$$\lg f_{qmax} = (0.701 \pm 0.01) - (0.108 \pm 0.06) \cdot \lg \Delta, \rho = 0.99. \quad (4)$$

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). Для количественной оценки зависимости f_{qmax} одновременно от энергетического уровня и эпицентрального расстояния необходимо накопление статистически значимого материала.

Заключение. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2020 г. изучены как по амплитудным, так и по энергетическим спектрам. Специализированная база данных по динамическим параметрам очагов дополнена 44 станционными определениями для 11 сейсмических событий в диапазоне энергетических классов $K_{II}=5.2\div 11.3$, 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 их соответствие долговременным зависимостям от энергетического уровня землетрясений.

Кинематические параметры очагов восстановлены для двух наиболее сильных землетрясений, произошедших в западном и восточном районах региона 15 марта и 12 апреля 2020 г. соответственно. Для них по данным решения механизмов очагов определены тип подвижки в очаге, ориентация разрыва и напряжения, под действием которых произошло землетрясение.

Статистика по частотному составу сейсмических колебаний, несущих максимальную сейсмическую энергию, дополнена данными для десяти относительно слабых землетрясений по записям станции «Алушта» для уточнения системы энергетических спектров, полученной ранее [4, 18]. В результате выделена новая группа спектров для эпицентральных расстояний $\Delta=7\pm 3$ км и дополнена статистика по второй группе с $\Delta=23\pm 3$ км.

С учетом энергетических спектров за период 2014–2019 гг. и новых определений за 2020 г., выделено шесть групп землетрясений по диапазонам эпицентральных расстояний до станции «Алушта». Предварительно получена корреляционная зависимость значений f_{qmax} энергетических спектров P- и S-волн от эпицентрального расстояния Δ . Исследования будут продолжены

с целью получения статистически значимых данных, достаточных для расчета корреляционных соотношений f_{qmax} (K_p , Δ) и δf_q (K_p , Δ) – основы для построения региональных систем энергетических спектров и прогноза спектральных параметров сильных сейсмических воздействий.

Л и т е р а т у р а

1. International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
2. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2020 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 27 (2020). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-27.html>
3. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – Т. 2. С. 113–125.
4. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
5. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021. – Вып. 24 (2015 г.). – С. 226–235. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.12>
6. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 г.). – С. 242–252. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.22> EDN: DMTVLR
7. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research, 1970. – V. 75, N 26. – P. 4997–5009.
8. Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. – Москва: Наука, 1972. – 198 с.
9. Пустовитенко Б.Г. (отв. сост.), Бондарь М.Н. Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2020 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-27.html>
10. Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я. Новые результаты тектонофизического анализа фокальных механизмов землетрясений Крымско-Черноморского региона // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8 (74), № 4. – С. 162–206.
11. 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. – 1989. – № 2. – С. 66–79.
12. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
13. Hanks T.C., Kanamori H.A. Moment magnitude scale // Journal of Geophysical Research. – 1979. – V. 84, N B5. – P. 2348–2350.
14. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Поречнова Е.И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 238–242.
15. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Изучение напряжений и деформаций в очаговых зонах землетрясения Крыма по спектрам записей сейсмических волн // Современная тектонофизика. Методы и результаты. – 2019. – С. 193–198.
16. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 г.). – С. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.03> EDN: MPZWQA
17. Ризниченко Ю.В., Сейдузова С.С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. – Москва: Наука, 1984. – 180 с.
18. 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. – Т. 4 (70), № 4. – С. 191–206.
19. 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 FOCAL PARAMETERS
of CRIMEAN-BLACK SEA REGION EARTHQUAKES in 2020

B.G. Pustovitenko¹, E.E. Eredzhepov¹, M.N. Bondar^{1,2}

¹*State Autonomous Institution of the Republic of Crimea "Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities", Simferopol, Republic of Crimea, Russia, bpustovitenko@mail.ru*

²*Institute of seismology and geodynamics of the Federal State Autonomous educational institution "Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky", Simferopol, Republic of Crimea, Russia, epicrimea@mail.ru*

Abstract. The results of calculation and analysis of spectral and focal parameters of 11 earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2020 within the range of energy classes $K_{\pi}=5.2-11.3$ are presented. The dynamic parameters of the sources were reconstructed from 70 amplitude spectra of *P*- and *S*- seismic wave records recorded by eight digital regional seismic stations. For the two strongest earthquakes of 2020: March 15 and April 12, the focal mechanism solutions were obtained. The type of slip in the sources of both earthquakes is a reverse fault. In addition, the spectral properties of the sources of 10 weak earthquakes that occurred near the southern coast of Crimea were considered from the energy spectra of records at the Alushta station. An analysis of the results obtained is given.

Keywords: focal mechanism, amplitude spectrum, Brun's model, spectral density, angular frequency, seismic moment, dislocation radius, shed and apparent stresses, displacement along a discontinuity, radiative friction, energy spectrum.

For citation: Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar, M.N. (2024). [Spectral and focal parameters of Crimean-Black Sea region earthquakes in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in North Eurasia], 27(2020), 231–241. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.21> EDN: KOLHOO

References

1. International Seismological Centre. (2024). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
2. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2024). [Catalog of the earthquakes of the Crimean-Black Sea region in 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-27.html> (In Russ.).
3. Pustovitenko, B.G., & Kul'chitskii, V.E. (1974). [On the energy assessment of earthquakes in the Crimean-Black Sea region]. In *Magnituda i energeticheskaiia klassifikatsiia zemletriasenii, T. 2* [Magnitude and Energy Classification of Earthquakes, V. 2] (pp. 113–125). Moscow, Russia: IFZ AN SSSR Publ. (In Russ.).
4. Pustovitenko, B.G., & Panteleeva, T.A. (1990). *Spektral'nye i ochagovye parametry zemletrjasenij Kryma* [Crimea earthquakes Spectral and focal parameters]. Kiev, Ukraine: Naukova Dumka Publ., 251 p. (In Russ.).
5. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2021). [Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 226–235. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.12>
6. Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar', M.N. (2022). [Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 242–252. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.22> EDN: DMTVLR
7. Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997–5009.
8. Balakina, L.A., Vvedenskaia, A.V., Golubeva, N.V., Misharina, L.A., & Shirokova, E.I. (1972). *Pole uprugikh napriazhenii Zemli i mekhanizm ochagov zemletriasenii* [The field of elastic stresses of the Earth and the mechanism of earthquake sources]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 198 p. (In Russ.).
9. Pustovitenko, B.G., & Bondar', M.N. (2024). [Catalog of focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2020]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-27.html> (In Russ.).
10. Vol'fman, Iu.M., Pustovitenko, B.G., & Kolesnikova, E.Ia. (2022). [New results of tectonophysical analysis of focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo Geografiia. Geologiiia* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University Geography. Geology], 8(74), 4, 162–206. (In Russ.).

11. 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. (1989). [*P*-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake foci. Transition from station spectrum to focal and calculation of dynamic parameters of the sources]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 66–79. (In Russ.).
12. Kostrov, B.V. (1975). *Mehanika ochaga tektonicheskogo zemletrjasenija* [Tectonic earthquake source mechanics]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 179 p. (In Russ.).
13. Hanks, T.C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350.
14. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., Kapitanova, S.A., & Porechnova, E.I. (2008). [Spatial features of focal parameters of earthquakes in the Crimea]. *Seismichnost' Severnoj Evrazii* [Seismicity of Northern Eurasia]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 238–242. (In Russ.).
15. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2019). [Study of Stresses and Strains in the Source Zones of the Crimean Earthquakes Using the Spectra of Seismic Wave Records]. *Sovremennaja tektonofizika. Metody i rezul'taty* [Modern tectonophysics. Methods and results]. Moscow, Russia: IFZ RAS Publ., 193–198. (In Russ.).
16. Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar, M.N. (2023). [Focal parameters of the Crimean-Black Sea region earthquakes in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 246–256. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.21> EDN: JIZXYC (In Russ.).
17. Riznichenko, Yu.V., & Sejduzova, S.S. (1984). *Spektral'no-vremennaja harakteristika seismicheskoy opasnosti* [Spectral-temporal characteristic of seismic hazard]. Moscow, Nauka Publ., 180 p. (In Russ.).
18. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2018). [Consolidated energy spectra of earthquakes in the Crimea according to the records of the seismic station "Alushta"]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo Geografiia. Geologiya* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University Geography. Geology], 4(70), 4, 191–206. (In Russ.).
19. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2021). [Investigation of the spectral properties of the Crimean earthquake by energy spectra]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XV International Seismological Workshop]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 75 p. (In Russ.).