

## **II. СПЕКТРЫ и ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

УДК 550.348.435

### **СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА в 2021 году**

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

<sup>1</sup>ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», г. Симферополь, Россия, [bpustovitenko@mail.ru](mailto:bpustovitenko@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского, г. Симферополь, Россия, [epicrimea@mail.ru](mailto:epicrimea@mail.ru)

**Аннотация.** Приведены результаты расчета амплитудных и энергетических спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2021 г. Для 12 землетрясений в диапазоне энергетических классов  $K_{\Pi}=7.0-10.2$  по амплитудным спектрам восстановлены динамические параметры очагов ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\sigma$ ,  $\Delta\sigma_r$ ,  $\bar{u}$ ,  $E_U$  и  $Mw$ ) с использованием теоретической дислокационной модели Бруна ( $\omega^2$ ). Для наиболее сильного землетрясения, произошедшего 2 июня 2021 г. в Севастопольском районе, получено решение механизма очага. Спектральные свойства очагов восьми слабых землетрясений рассмотрены также 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 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – С. 228–237. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.21> EDN: RJCEN

**Введение.** Количественная оценка спектральных и очаговых параметров землетрясений является неотъемлемой частью интегральной характеристики протекающих в очаге процессов и их влияния на результаты сейсмических воздействий на поверхности Земли. В этой связи для сложного и неоднородного в сейсмотектоническом плане Крымско-Черноморского региона ежегодное пополнение банка данных об очаговых параметрах относительно слабых землетрясений является крайне необходимой и актуальной задачей для возможного прогноза параметров сильных движений грунта. В 2021 г. сетью станций Крыма зарегистрировано 96 землетрясений Крымско-Черноморского региона в диапазоне энергетических классов  $K_{\Pi}=4.6-10.2$  [1], из которых только для 12 с  $K_{\Pi} \geq 7.0$  определены спектральные и динамические характеристики очагов. Такое ограничение связано, прежде всего, с жесткостью критериев отбора исходных данных для расчета спектров и сложностью, а иногда неоднозначностью интерпретации получаемых спектров в рамках выбранной теоретической модели. Для исследования отобраны записи девяти наиболее значимых представительных землетрясений в диапазоне  $K_{\Pi}=8.7-10.2$  и трех сравнительно слабых с  $K_{\Pi}=7.0-7.4$ , но представляющих особый интерес, т. к. одно из них произошло в слабоизученном Северо-Западном районе региона и два – вблизи побережья Южного берега Крыма (Алуштинский и Судакско-Феодосийский районы). Для наиболее сильного землетрясения 2 июня 2021 г. получено решение механизма очага. Как и в предыдущие годы [2, 3], спектральные свойства восьми слабых землетрясений рассмотрены также по энергетическим спектрам объемных сейсмических волн, зарегистрированных на ближайшей к очагам сейсмической станции «Алушта».

**Исходные данные.** Для определения динамических параметров очагов землетрясений использованы амплитудные спектры Фурье записей волновых форм продольных и поперечных сейсмических волн, отвечающих критериям высокого качества: четкие (i) моменты вступления объемных волн, амплитуды полезного сигнала превышают фон помех в два раза и более. Основные параметры 12 землетрясений 2021 г., для которых исследованы спектральные и динамические параметры очагов, приведены в табл. 1 по данным сводной обработки в Крыму [1].

Пространственное распределение эпицентров изученных землетрясений показано на рис. 1. Большинство землетрясений произошло в верхней части земной коры вблизи побережья Крыма на глубинах от 8 до 28 км, и только два из них, 2 июня и 11 сентября, – в переходной зоне кора-мантия (табл. 1).

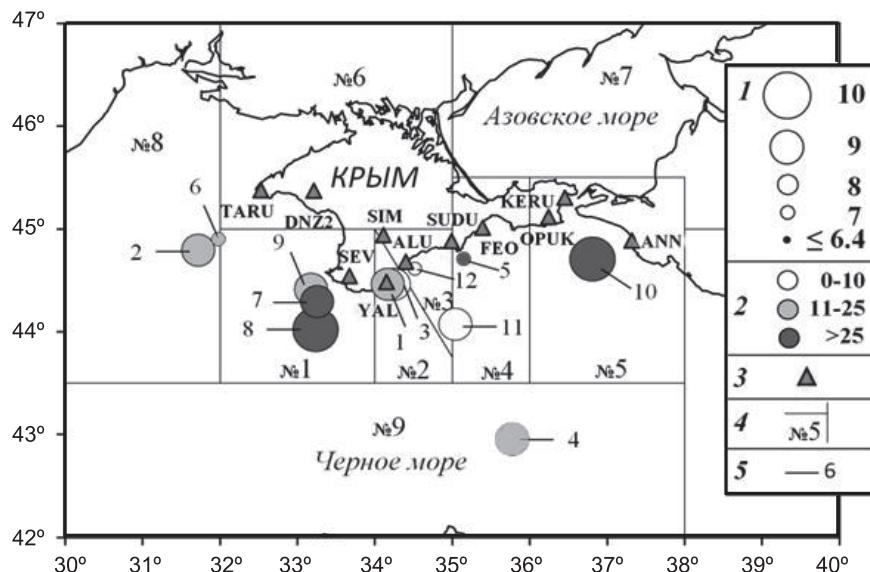
По записям объемных волн на восьми сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Тарханкут» (TARU),

«Донузлав-2» (DNZ2) и «Керчь» (KERU) – рассчитано 116 амплитудных спектров, из них 26 – продольных волн ( $P$ ) и 90 – поперечных ( $S$ ). Диапазон эпицентральных расстояний от очагов до станций регистрации составил от  $\Delta=3$  км до 225 км, с преобладанием  $\Delta \leq 100$  км.

**Таблица 1.** Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2021 г., для которых определены очаговые параметры

№	Дата, дд.мм	$t_0$ , ч:мин:с	Эпицентр		$h$ , км	Магнитуда			$K_p$	Район
			$\varphi^\circ$ , N	$\lambda^\circ$ , E		$Mc$	$Mw/n$ , табл. 3	$ML$ wsg		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	11.01	20:23:53.0	44.46	34.17	12	2.4	2.8/9	2.9	8.8	Ялтинский (№ 2)
2	30.01	00:52:32.8	44.79	31.72	24		3.0/8	3.0	9.4	Северо-Западный (№ 8)
3	13.02	20:05:09.9	44.46	34.19	10	2.4	2.7/6	2.6	8.7	Ялтинский (№ 2)
4	15.03	07:30:01.9	42.95	35.78	23		3.3/2	2.9	9.1	Черноморская Впадина (№ 9)
5	24.03	06:54:59.9	44.71	35.15	28		2.6/2		7.1	Судакско-Феодосийский (№ 4)
6	13.04	03:06:34.6	44.90	31.98	12		2.0/1		7.0	Северо-Западный (№ 8)
7	23.05	06:16:03.3	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	3.7/12	3.5	10.2	Севастопольский (№ 1)
9	09.08	18:08:04.5	44.41	33.18	23	2.6	3.0/7	2.8	8.7	Севастопольский (№ 1)
10	11.09	06:33:11.2	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 [1], значения  $Mw/n$  – из табл. 3, где  $n$  – число определений, участвовавших в осреднении; \* – землетрясение, для которого получено решение механизма очага.

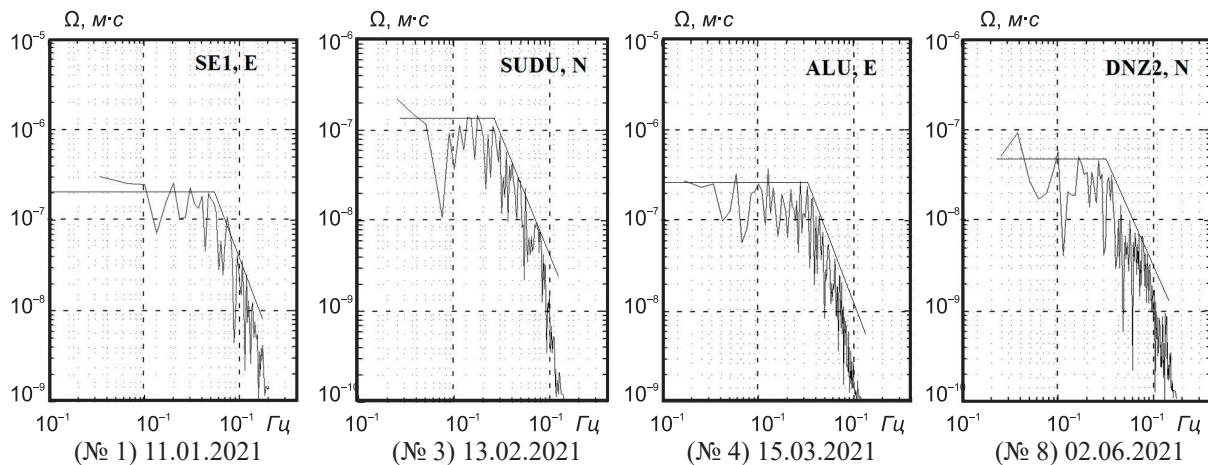


**Рис. 1.** Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2021 г., для которых восстановлены очаговые параметры

1 – энергетический класс  $K_p$  [4]; 2 – глубина очага; 3 – сейсмическая станция; 4 – номер и граница района; 5 – номер землетрясения по табл. 1.

**Методика расчета, обработки и интерпретации амплитудных спектров** не изменилась по сравнению с предыдущими годами [2, 3 и др.]. Для поперечных волн ( $S$ ) спектры рассчитывались по двум горизонтальным составляющим ( $N-S$ ) и ( $E-W$ ), а продольных волн ( $P$ ) – по вертикальной компоненте ( $Z$ ). Спектральная плотность  $S$ -волн вычислялась как полный вектор колебаний ( $N+E$ ).

Интерпретация амплитудных спектров выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна ( $\omega^2$ ) [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 высокочастотного склона  $\gamma \sim -2$ , что соответствует модели ( $\omega^2$ ). Примеры амплитудных спектров  $P$ - и  $S$ -волн и их аппроксимация в рамках теоретической модели Бруна приведены на рис. 2.



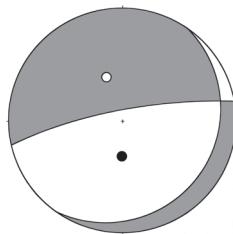
**Рис. 2.** Примеры амплитудных спектров  $P$ - и  $S$ -волн землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2021 г. по записям региональных сейсмостанций и их аппроксимация (прямые линии) в рамках теоретической модели Бруна. Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1

**Решение механизма очага** 2 июня 2021 г. выполнено по стандартной методике [6] с использованием данных о знаках первых вступлений объемных сейсмических волн на станциях Крыма и Международной сети [7]. Для пополнения статистических данных по знакам  $P$ -волн из районов азимутальных «брешей» дополнительно к [7] были использованы сейсмограммы станций Турции и Кавказа. В результате удалось получить достаточно представительную выборку исходных данных ( $N=106$ ) [8] в широком азимутальном створе для надежного решения фокального механизма (табл. 2, рис. 3). Для расчета углов выхода использована модель среды для глубины очага 44 км.

**Таблица 2.** Параметры механизма очага землетрясения 2 июня 2021 г. [8]

Дата, г.д.м.	$t_0$ , ч:мин:с	$h$ , км	$M_w$	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
				$T$		$N$		$P$		$NP1$			$NP2$		
				$PL$	$AZM$	$PL$	$AZM$	$PL$	$AZM$	$STK$	$DP$	$SLIP$	$STK$	$DP$	$SLIP$
2021.06.02	18:16:29.2	44	3.7	36	341	9	78	53	179	259	81	-81	34	12	-134

Тип подвижки в очаге землетрясения 2 июня 2021 г. (№ 8), произошедшего в Севастопольском районе, – крутой сброс по  $NP1$  юго-западного простириания и сдвигово-сброс с преобладанием сбросовой составляющей по  $NP2$  северо-восточного простириания (табл. 2, рис. 3).



**Рис. 3.** Диаграмма механизма очага землетрясения 2 июня 2021 г. в проекции нижней полусфера (№ 8 по табл. 1)

По параметрам механизма очага землетрясения (табл. 2) определена направленность излучения из очага на станции регистрации для учета при расчете динамических параметров очага данного землетрясения.

**Динамические параметры очага** (сейсмический момент  $M_0$ , радиус круговой дислокации  $r_0$ , сброшенное напряжение  $\Delta\sigma$ , величина деформации сдвига  $\epsilon$ , кажущееся напряжение  $\eta\bar{\sigma}$ , величина радиационного трения  $\Delta\sigma_r$ , средняя подвижка по разрыву, энергия образования дислокации в очаге  $E_U$  и моментная магнитуда  $M_w$ ) восстановлены по параметрам амплитудных спектров с использованием формул, приведенных в [9] на основе работ [10–13].

Для расчетов использованы две главные характеристики амплитудных спектров (рис. 2): спектральная плотность  $\Omega_0$ , пропорциональная скалярному сейсмическому моменту  $M_0$ , и угловая частота  $f_0$ , прямо связанный с размером радиуса круговой дислокации  $r_0$ . Количественные параметры модели среды в очажевой зоне каждого землетрясения подбирались в зависимости от глубины его гипоцентра.

Для большинства землетрясений динамические параметры получены по группе независимых станционных определений (табл. 3). Только для одного слабого толчка (№ 6) с энергетическим классом  $K_{\Pi}=7.0$ , произошедшего в северо-западной части Крыма (район № 8), динамические параметры рассчитаны по записям  $S$ -волн на одной ближайшей к очагу станции «Тарханкут» (TARU), расположенной на эпицентральном расстоянии  $\Delta=68$  км.

Вычисление средних значений параметров ( $S$ ) и стандартных отклонений ( $\delta S$ ) выполнено по станционным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [13]. Средние значения радиационного трения  $\Delta\sigma_r$  определены по среднегеометрическим для данного очага напряжениям  $\Delta\sigma$  и  $\eta\bar{\sigma}$ . Итоговое значение моментной магнитуды  $Mw$  определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Таблица 3. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2021 г.

Станция	Волна	Составляющая	$\Delta, \text{км}$	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}, \text{м}\cdot\text{с}$	$\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}, \text{м}\cdot\text{с}$	$f_0, \text{Гц}$	$M_0 \cdot 10^{13}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$r_0, \text{км}$	$\Delta\sigma \cdot 10^5, \text{Па}$	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{\sigma} \cdot 10^{-2}, \text{м}$	$\eta\sigma \cdot 10^5, \text{Па}$	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5, \text{Па}$	$E_u \cdot 10^8, \text{Дж}$	$Mw$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Землетрясение 11 января,  $t_0=20^{\text{h}}23^{\text{m}}53.0^{\text{s}}$  (№ 1 в табл. 1)

YAL	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	Z	81	0.015		5.0	2.24	0.45	1.1	3.66	0.12	4.76	-4.21	0.41	2.84
SUDU	<i>S</i>	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
<i>S</i> – среднее значение					<b>1.85</b>	<b>0.4</b>	<b>1.29</b>	<b>4.31</b>	<b>0.12</b>	<b>5.77</b>	<b>-5.13</b>	<b>0.39</b>	<b>2.78</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.1	0.01	0.12	0.12	0.11	0.1			0.22	0.19	

Землетрясение 30 января,  $t_0=00^{\text{h}}52^{\text{m}}32.8^{\text{s}}$  (№ 2 в табл. 1)

TARU	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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
<i>S</i> – среднее значение					<b>3.8</b>	<b>0.44</b>	<b>1.85</b>	<b>6.17</b>	<b>0.2</b>	<b>10.1</b>	<b>-9.18</b>	<b>1.17</b>	<b>2.99</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.13	0.01	0.12	0.12	0.13	0.13			0.25	0.24	

Землетрясение 13 февраля,  $t_0=20^{\text{h}}05^{\text{m}}09.9^{\text{s}}$  (№ 3 в табл. 1)

ALU	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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	<i>S</i>	N+E	55		0.06	3.2	1.12	0.4	0.79	2.64	0.08	9.16	-7.6	0.15	2.64
SUDU	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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
<i>S</i> – среднее значение					<b>1.64</b>	<b>0.41</b>	<b>1.06</b>	<b>1.64</b>	<b>0.11</b>	<b>6.25</b>	<b>-5.72</b>	<b>0.29</b>	<b>2.7</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.15	0.01	0.15	0.25	0.15	0.15			0.3	0.2	

Землетрясение 15 марта,  $t_0=07^{\text{h}}30^{\text{m}}01.9^{\text{s}}$  (№ 4 в табл. 1)

SUDU	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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
<i>S</i> – среднее значение					<b>12.6</b>	<b>0.44</b>	<b>6.63</b>	<b>0.22</b>	<b>0.7</b>	<b>1.68</b>	<b>1.64</b>	<b>13.95</b>	<b>3.33</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.11	0.005	0.09	0.09	0.1	0.11			0.2	0.1	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Землетрясение 24 марта, <math>t_0=06^h54^m59.9^s</math> (№ 5 в табл. 1)</b>															
SUDU	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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
<i>S</i> – среднее значение					<b>0.88</b>	<b>0.29</b>	<b>1.59</b>	<b>5.31</b>	<b>0.11</b>	<b>0.54</b>	<b>0.26</b>	<b>0.23</b>	<b>2.57</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.13	0.01	0.09	0.09	0.1	0.13			0.22	0.09	
<b>Землетрясение 13 апреля, <math>t_0=03^h06^m34.6^s</math> (№ 6 в табл. 1)</b>															
TARU	<i>S</i>	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
<b>Землетрясение 23 мая, <math>t_0=06^h16^m03.3^s</math> (№ 7 в табл. 1)</b>															
ALU	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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
<i>S</i> – среднее значение					<b>5.72</b>	<b>0.49</b>	<b>2.03</b>	<b>3.5</b>	<b>0.24</b>	<b>2.63</b>	<b>-1.62</b>	<b>1.94</b>	<b>3.11</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.11	0.01	0.1	0.26	0.1	0.11			0.21	0.18	
<b>Землетрясение 02 июня, <math>t_0=18^h16^m29.2^s</math> (№ 8 в табл. 1)</b>															
ALU	<i>P</i>	Z	119	0.01		4.35	29.8	0.71	3.69	6.16	0.32	11.7	-9.9	9.2	3.59
ALU	<i>S</i>	N+E	119		0.7	2.25	53.8	0.74	5.86	9.76	0.52	6.49	-3.6	26.3	3.76
SUDU	<i>P</i>	Z	170	0.03		4.0	54.5	0.77	5.26	8.77	0.49	6.41	-3.78	23.9	3.76
SUDU	<i>S</i>	N+E	170		0.36	2.15	49.7	0.77	4.71	7.85	0.44	7.03	-4.68	19.5	3.73
TARU	<i>P</i>	Z	160	0.06		4.1	45.3	0.75	4.71	7.85	0.43	7.71	-5.35	17.8	3.71
TARU	<i>S</i>	N+E	160		0.64	2.2	52.0	0.76	5.38	8.96	0.49	6.6	-3.92	23.7	3.75
DNZ2	<i>P</i>	Z	150	0.06		4.2	43.8	0.73	4.89	8.15	0.43	7.98	-5.53	17.8	3.70
DNZ2	<i>S</i>	N+E	150		0.7	2.15	54.2	0.77	5.14	8.57	0.48	6.44	-3.87	23.2	3.76
SEV	<i>P</i>	Z	68	0.035		4.3	33.5	0.71	4.02	6.7	0.35	10.4	-8.42	11.2	3.62
SEV	<i>S</i>	N+E	68		0.4	2.3	36.3	0.72	4.22	7.03	0.37	9.62	-7.51	12.8	3.64
YAL	<i>P</i>	Z	90	0.025		4.3	37.8	0.71	4.54	7.56	0.39	9.23	-6.96	14.3	3.65
YAL	<i>S</i>	N+E	90		0.18	3.1	20.1	0.54	5.71	9.52	0.37	17.4	-14.5	9.56	3.47
<i>S</i> – среднее значение					<b>41</b>	<b>0.72</b>	<b>4.8</b>	<b>8</b>	<b>0.42</b>	<b>8.5</b>	<b>-6.1</b>	<b>16.4</b>	<b>3.68</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04			0.05	0.04	
<b>Землетрясение 09 августа, <math>t_0=18^h08^m04.5^s</math> (№ 9 в табл. 1)</b>															
DNZ2	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	Z	95	0.015		4.6	3.01	0.51	1.02	3.38	0.12	3.54	-3.06	0.51	2.92
SIM	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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
<i>S</i> – среднее значение					<b>3.44</b>	<b>0.46</b>	<b>2.06</b>	<b>4.92</b>	<b>0.17</b>	<b>3.1</b>	<b>-2.07</b>	<b>0.85</b>	<b>2.96</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.09	0.02	0.12	0.08	0.08	0.09			0.17	0.11	
<b>Землетрясение 11 сентября, <math>t_0=06^h33^m11.2^s</math> (№ 10 в табл. 1)</b>															
ALU	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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
<i>S</i> – среднее значение					<b>33.5</b>	<b>0.64</b>	<b>5.51</b>	<b>9.19</b>	<b>0.43</b>	<b>10.4</b>	<b>-7.65</b>	<b>11.57</b>	<b>3.62</b>		
$\delta S$ – стандартное отклонение					0.1	0.01	0.11	0.11	0.11	0.1			0.17	0.18	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----

Землетрясение 24 ноября,  $t_0=10^h39^m26.1^s$  (№ 11 в табл. 1)

ALU	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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
					<i>S</i> – среднее значение		<b>3.43</b>	<b>0.39</b>	<b>2.52</b>	<b>8.39</b>	<b>0.23</b>	<b>6.4</b>	<b>-5.14</b>	<b>1.44</b>	<b>2.96</b>
					$\delta S$ – стандартное отклонение		0.39	0.03	0.29	0.29	0.33	0.39		0.68	0.26

Землетрясение 20 декабря,  $t_0=17^h16^m26.5^s$  (№ 12 в табл. 1)

SUDU	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>P</i>	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	<i>S</i>	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	<i>S</i>	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
					<i>S</i> – среднее значение		<b>0.49</b>	<b>0.34</b>	<b>0.53</b>	<b>1.75</b>	<b>0.04</b>	<b>1.73</b>	<b>-1.47</b>	<b>0.03</b>	<b>2.4</b>
					$\delta S$ – стандартное отклонение		0.13	0.01	0.12	0.12	0.12	0.13		0.33	0.15

Примечание.  $\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}$ ,  $m \cdot c$  – спектральная плотность по полному вектору колебаний поперечной волны (N+E).

Как и в предыдущие годы [2, 3], хорошая сходимость станционных определений (табл. 3) получена для радиуса круговой дислокации со стандартным отклонением  $\delta r_0 \leq 0.03$ . Разброс других станционных определений динамических параметров в основном связан с различной направленностью излучения сейсмической энергии из очага на станции регистрации  $R_{\theta\phi}$ , принимаемой при расчетах средней и одинаковой  $R_{\theta\phi}=0.4$  при отсутствии решения механизма очагов. Есть также трудности корректного учета индивидуальных станционных особенностей записей сейсмических колебаний на станциях регистрации, расположенных в разных инженерно-геологических условиях и оснащенных различающейся сейсмической аппаратурой [14]. 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. Примером достижения высокой точности оценок всех очаговых параметров являются результаты расчета для землетрясения 2 июня (№ 8), стандартное отклонение  $\delta S$  для которого по всем параметрам не превысило величину 0.05, поскольку использовано 12 независимых станционных определений и учтена реальная направленность излучения из очага на станции регистрации.

Радиационное трение  $\Delta\sigma_r$  для большинства исследованных землетрясений имело отрицательное значение, что может быть связано с неравномерным распределением прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах [11]. Во всем диапазоне энергий средняя величина сброшенных напряжений не превысила  $\Delta\sigma=6.6 \cdot 10^5$  Па (6.6 бар), а кажущихся напряжений  $\eta\bar{\sigma}<11 \cdot 10^5$  Па (11 бар).

Сравнение полученных в 2021 г. значений сейсмического момента  $M_0$ , радиуса круговой дислокации  $r_0$  и сброшенного напряжения  $\Delta\sigma$  со средними их долговременными величинами (рис. 4) показало, что преобладающее большинство значений  $M_0$ ,  $r_0$  и  $\Delta\sigma$  для очагов землетрясений за 2021 г. укладывается в диапазон доверительного интервала долговременных зависимостей  $M_0(K_{\Pi})$ ,  $r_0(K_{\Pi})$  и  $\Delta\sigma(K_{\Pi})$ , а параметры для очага 2 июня полностью соответствуют таковым, полученным за длительный интервал времени. Для сравнения использованы зависимости  $M_0(K_{\Pi})$ ,  $r_0(K_{\Pi})$  и  $\Delta\sigma(K_{\Pi})$  из [15, 16], уравнения которых приведены в [2].

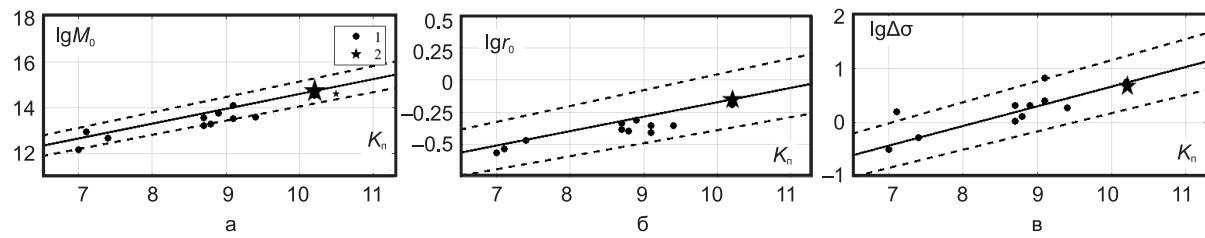


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений за 2021 г. (а – сейсмического момента  $M_0$ , б – радиуса круговой дислокации  $r_0$  и в – сброшенного напряжения  $\Delta\sigma$ ) с долговременными зависимостями:  $M_0(K_{\Pi})$ ,  $r_0(K_{\Pi})$  и  $\Delta\sigma(K_{\Pi})$  из [15, 16]

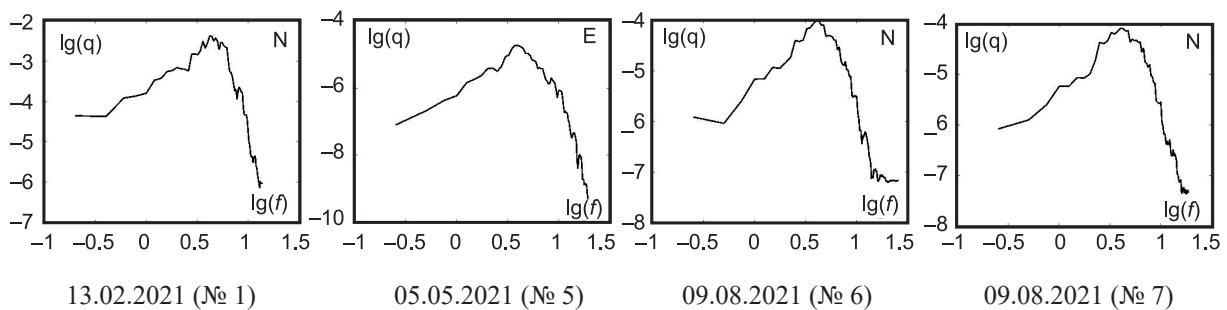
1 – экспериментальные значения за 2021 г; 2 – значения для землетрясения с известным механизмом очага; пунктиром обозначены пределы погрешностей уравнений  $M_0(K_{\Pi})$ ,  $r_0(K_{\Pi})$  и  $\Delta\sigma(K_{\Pi})$ .

Наибольшее отличие сброшенных напряжений  $\Delta\sigma$  от долговременных параметров получено для слабого землетрясения 24 марта (№ 5) с  $K_{\Pi}=7.1$ , хотя его очаговые параметры восстановлены по станциям SUDU и ALU (S-волна) с хорошей внутренней сходимостью станционных определений. Как показано в [13, 16], 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 локальной очаговой зоны.

**Энергетические спектры.** Для построения энергетических спектров объемных сейсмических волн отобраны записи восьми землетрясений, произошедших в земной коре центральной зоны региона на глубинах от 10 км до 24 км вблизи побережья Крыма. Как и в предыдущие годы [2, 3], использованы цифровые сейсмограммы стационарной станции «Алушта». В основном это сравнительно слабые землетрясения с энергетическими классами  $K_{\Pi}=5.5\div8.7$  и эпицентральными расстояниями до станции регистрации от 8 до 101 км (табл. 4).

Основой для расчета спектров энергии  $q(f)$  сейсмических волн являлись их амплитудные спектры. Пересчет спектральной плотности амплитудного спектра в плотность энергетического спектра осуществлялся согласно работам [13, 17].

Большинство рассчитанных энергетических спектров имело характерную резонансную форму по всем компонентам записи с выраженным максимумом плотности сейсмической энергии  $q_{max}$  на частоте  $f_{qmax}$  (рис. 5).



**Рис. 5.** Примеры сглаженных энергетических спектров землетрясений Крыма 2021 г. по записям объемных сейсмических волн на станции «Алушта». Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 4

Для анализа использованы две главные характеристики спектров энергии:  $f_{qmax}$ , с максимальной плотностью энергии  $q_{max}$ , и логарифмическая ширина максимума спектра  $\lg(\delta f q)$  на уровне 0.75 от максимального значения  $q_{max}$  в низкочастотной ( $f_{q1}$ ) и высокочастотной ( $f_{q2}$ ) частях спектра:

$$\lg(\delta f q) = \lg(f_{q2}) - \lg(f_{q1})$$

Результаты расчета  $f_{qmax}$  и  $\delta f q$  по разным составляющим записи (Z, N, E) представлены в табл. 4.

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

№	Дата, д.м.г.	$t_0$ , ч.мин:с	$K_{\Pi}$	$h$ , км	$\Delta$ , км	$f_{qmax}$ , Гц			$\delta f q$ , Гц		
						Z	N	E	Z	N	E
1	13.02.2021	20:05:09.9	8.7	10	30	7	4.21	2.8	1.84	1.9	1.91
2	19.04.2021	23:53:40.4	6.9	21	14	6	4.5	3.8	2.4	1.6	1.85
3	02.05.2021	01:09:56.3	5.5	24	12	5.1	4.6	4	2.25	2.37	2.21
4	02.05.2021	18:13:05.7	6.3	20	10	6.55	4.5	3.76	2.14	2.07	1.61
5	05.05.2021	16:33:08.5	6.4	21	10	5.54	4.81	4	1.73	2.11	1.81
6	09.08.2021	13:56:19.0	7.0	18	101	5	4.3	4	2	1.76	2.8
7	09.08.2021	18:08:04.5	8.7	23	23	5	4	3.76	1.6	1.62	1.72
8	03.12.2021	13:53:15.4	7.1	15	8	6	3.4		1.56	1.9	

Примечание. Основные параметры землетрясений приведены в [1].

В работах [18, 19] имеющиеся энергетические спектры за период 2014–2020 гг. условно были разделены на 6 групп, отличающихся эпицентральными расстояниями: 1 –  $(6\pm 2)$  км; 2 –  $(23\pm 7)$  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  $f_{qmax}$  поперечных  $S$ -волн и энергетического уровня ( $K_{\Pi}$ ) землетрясения [19]:

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

Уравнение (1) рассчитано между парами параметров: энергия землетрясения и частота колебаний при фиксированном эпицентральном расстоянии  $\Delta$ . Вместе с тем, спектральный состав колебаний сейсмических волн меняется также 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  $f_{qmax}$ ,  $K_{\Pi}$  и  $\Delta$ , используя имеющиеся данные по энергетическим спектрам во всем диапазоне эпицентральных расстояний и энергетических классов. В результате получены уравнения: (2) – для поперечных  $S$ -волн и (3) – для продольных  $P$ -волн:

$$\lg(f_{qmax}) = -0.02 \cdot K_{\Pi} - 0.03 \cdot \lg \Delta + 0.95, \quad (2)$$

$$\lg(f_{qmax}) = -0.02 \cdot K_{\Pi} - 0.08 \cdot \lg \Delta + 0.82. \quad (3)$$

Энергетические спектры землетрясений 2021 г. под номерами № 1 и 7 с эпицентральными расстояниями 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 сходимость в пределах погрешностей.

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 удовлетворительное согласие результатов сравнения.

**Заключение.** Специализированная база по спектральным и очаговым параметрам землетрясений Крымско-Черноморского региона дополнена данными ( $N=71$ ) станционных определений для 12 местных землетрясений 2021 г. в диапазоне энергетических классов  $K_{\Pi} = 7.0 \div 10.2$ , произошедших в различных сейсмоактивных 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. Для землетрясения 2 июня 2021 г. с  $Mw=3.7$  получено решение фокального механизма, согласно которому в очаге произошла сбросовая подвижка под действием близгоризонтальных сил растяжения.

Статистика по частотному составу сейсмических колебаний с максимальной сейсмической энергией дополнена данными для восьми землетрясений в диапазоне  $K_{\Pi} = 5.5 \div 8.7$  по энергетическим спектрам записей объемных волн на станции «Алушта». Новые определения спектральных параметров энергии сейсмических волн не противоречат имеющимся данным за предшествующий период 2014–2020 гг. и будут в дальнейшем использованы для уточнения корреляционных зависимостей  $f_{qmax}$  и  $\delta f_q$  от энергетического уровня землетрясений и эпицентрального расстояния до станций регистрации.

## Л и т е р а т у р а

1. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>
2. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – 2023. – С. 246–256. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.21> EDN: JIZXYC
3. 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
4. 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.
5. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal Geophysical Research. – 1970. – V. 75, N 26. – P. 4997–5009.

6. 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.
7. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
8. Пустовитенко Б.Г., Бондарь М.Н. Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2021 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2025. – Вып. 28 (2021). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html>
9. 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>
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 станционного 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 // Journal Geophysical. Research. – 1979. – V. 84, N 35. – P. 2348–2350.
13. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
14. 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. – Т. 8(74), № 4. – С. 7–79.
15. 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.
16. 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.
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 2021***

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

<sup>1</sup>*State Autonomous Institution «Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities», Simferopol, Republic of Crimea, Russia, bpustovitenko@mail.ru*

<sup>2</sup>*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 the amplitude and energy spectra of  $P$ - and  $S$ -waves of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2021 are presented. For 12 earthquakes in the range of energy classes  $K_n=7.0-10.2$ , the dynamic parameters of the sources ( $M_0$ ,  $r_0$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\eta\sigma$ ,  $\Delta\sigma_r$ ,  $\tilde{u}$ ,  $E_U$  and  $Mw$ ) were reconstructed from the amplitude spectra using Brune's theoretical dislocation model ( $\omega^{-2}$ ). The average values of the dynamic parameters of earthquake sources in 2021 are in most cases estimated at several stations and for different types of waves. This leveled out 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 focal parameters was obtained and their correspondence to the average long-term dependencies on the energy level of earthquakes. For the strongest earthquake on June 2, 2021 with  $Mw=3.7$ , a solution to the focal mechanism was obtained. The earthquake occurred under the influence of near-horizontal tensile forces with normal fault movement at the source. Statistics on the frequency composition of seismic vibrations, with maximum seismic energy, are supplemented with data for eight earthquakes in the range  $K_n=5.5-8.7$ , according to the energy spectra of body wave recordings at the Alushta station. New definitions of spectral parameters of seismic wave energy do not contradict the available data for the previous period 2014–2020.

**Keywords:** focal mechanism, amplitude spectrum, Brune's model, spectral density, angular frequency, seismic moment, dislocation radius, stress drop, apparent stress, displacement along a discontinuity, radiative friction, energy spectrum.

**For citation:** Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar, M.N. (2025). [Spectral and focal parameters of Crimean-Black Sea region earthquakes in 2021]. *Zemletriaseniiia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021), 228–237. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2025.28.21> EDN: RJCUE

## References

1. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2025). [Catalog of the earthquakes of the Crimean-Black Sea region in 2021]. *Zemletriaseniiia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html> (In Russ.).
2. Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar', M.N. (2023). [Earthquake focus parameters in the Crimean-Black Sea region in 2018–2019]. *Zemletriaseniiia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019), 246–256. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2023.26.21 EDN: JIZXYC
3. Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar', M.N. (2024). [Spectral and focal parameters of Crimean-Black Sea earthquakes in 2020]. *Zemletriaseniiia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 27(2020), 231–241. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.21> EDN: KOLHOO
4. 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.).
5. Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997–5009.
6. Balakina, L.A., Vvedenskaia, A.V., Golubeva, N.V., Misharina, L.A., & Shirokova, E.I. (1972). *Pole uprugikh napriazhenii Zemli i mehanizm ochagov zemletriasenii* [The field of elastic stresses of the Earth and the mechanism of earthquake sources]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 198 p. (In Russ.).
7. International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
8. Pustovitenko, B.G., & Bondar', M.N. (2025). [Catalog of focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2021]. *Zemletriaseniiia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 28(2021). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-28.html> (In Russ.).
9. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2021). [Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2015]. *Zemletriaseniiia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 24(2015), 226–235. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.12>
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. (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]. *Vulkanologija i seismologija* [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 66–79. (In Russ.).
11. Kostrov, B.V. (1975). *Mehanika ochaga tektonicheskogo zemletrjasenija* [Tectonic earthquake source mechanics]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 179 p. (In Russ.).
12. Hanks, T.C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350.
13. 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.).
14. Svidlova, V.A., Bondar', M.N., & Boiko, V.A. (2022). [Seismicity in Crimea in 2021]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografija. Geologija* [Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology], 8(74), 4, 7–79. (In Russ.).
15. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., Kapitanova, S.A., & Porechnova, E.I. (2008). [Spatial features of focal parameters of earthquakes in the Crimea]. *Sejsmichnost' Severnoj Evrazii* [Seismicity of Northern Eurasia]. Odninsk, Russia: GS RAS Publ., 238–242. (In Russ.).
16. 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.).
17. Riznichenko, Yu.V., & Sejduzova, S.S. (1984). *Spektral'no-vremennaja harakteristika sejsmicheskoj opasnosti* [Spectral-temporal characteristic of seismic hazard]. Moscow, Russia: 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. Geografija. Geologija* [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]. Odninsk, Russia: GS RAS Publ., 75 p. (In Russ.).