

II. СПЕКТРЫ и ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА в 2018–2019 гг.

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

¹ГАОУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», г. Симферополь, Республика Крым, Россия, brustovitenko@mail.ru

²Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, epicrimea@mail.ru

Аннотация. Приведены спектральные и динамические параметры очагов (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \bar{y} , E_u и M_w) 24 землетрясений Крыма за период 2018–2019 гг. в диапазоне энергетических классов $K_{II}=5.8–11$. Использовано 157 стационарных амплитудных спектров объемных сейсмических волн, зарегистрированных на семи региональных сейсмических станциях. Определение динамических параметров очагов выполнено с использованием теоретической дислокационной модели Бруна. Для пяти наиболее сильных землетрясений 2018 г. (31 января, 24 апреля, 9 сентября, 13 сентября и 15 октября) и двух 2019 г. (8 мая и 4 декабря) с $K_{II}=10.5–11$ получены решения механизма очагов. Тип подвижки в очаге землетрясения 31 января 2018 г. – сбросо-сдвиг, 9 и 13 сентября 2018 г. – сброс, а в очагах землетрясений 24 апреля и 15 октября 2018 г., а также 8 мая и 4 декабря 2019 г. – взброс. Спектральный состав сейсмических колебаний дополнительно изучен по энергетическим спектрам 15 землетрясений с использованием записей на станции «Алушта».

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. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 246–256. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.21> EDN: JIZXYC

Введение. Крымско-Черноморский регион в 2018–2019 гг. характеризовался умеренной сейсмической активностью, проявившейся во всех районах региона. Из 185 зарегистрированных землетрясений в диапазоне $K_{II}=3.8–11.0$ [1], только 11 % относятся к представительным для всего региона с $K_{II}\geq 8.5$ (K_{II} – энергетический класс по шкале Б.Г. Пустовитенко [2]). Для большинства из них восстановлены динамические параметры очагов по записям региональных цифровых сейсмостанций. Кроме того, для семи 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 решения механизмов очагов. Продолжены начатые в 2014 г. [3] исследования энергетических спектров по записям сейсмической станции «Алушта» с целью пополнения имеющейся базы данных для построения системы энергетических спектров. Задачей данной статьи явилось комплексное представление очаговых параметров (кинематических, динамических и энергетических) землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2018–2019 гг. с подробным описанием их общих свойств и особенностей.

Исходные данные. Для расчета спектров и определения на их основе динамических параметров очагов выбрано 12 наиболее сильных землетрясений с $K_{II}>9.0$ и 12 относительно слабых толчков, произошедших вблизи Южного берега Крыма, а также в менее изученных Судакско-Феодосийском и Севастопольском районах (рис. 1, табл. 1.).

Амплитудные спектры получены по 41 записи продольных (P) и 116 поперечных (S) волн на семи сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Тарханкут» (TARU), а также новой станции «Донузлав-2» (DNZ2), открытой 26 июля 2018 г. в северо-западной части Крыма вблизи бывшего скважинного пункта «Донузлав» [4]. Для решения механизма очагов семи землетрясений (в табл. 1 отмечены *) использованы знаки первых вступлений продольных волн на региональных станциях Крыма и международной сети, опубликованные в [5], а также дополнительно определенные по собранным первичным записям на станциях, окружающих очаг в более широком азимутальном створе.

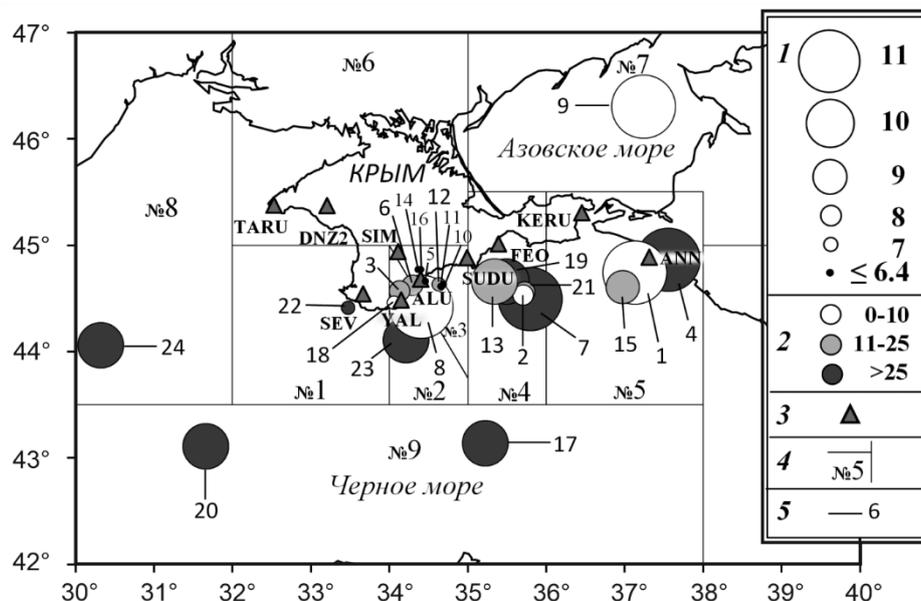


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2018–2019 гг., для которых восстановлены очаговые параметры: 1 – энергетический класс K_{II} [2]; 2 – глубина очага; 3 – сейсмическая станции; 4 – граница и номер района; 5 – номер землетрясения по табл. 1

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2018–2018 гг., для которых определены очаговые параметры

№	Дата, г м д	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда			K_{II}	Район
			φ° , N	λ° , E		M_c	M_w/n , табл. 4	ML_{WSG}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1*	2018.01.31	04 28 55.6	44.74	37.13	10	3.5	3.96/8	3.8	11.0	Керченско-Анапский (№ 5)
2	2018.02.15	22 29 15.6	44.53	35.71	5	–	2.72/3	–	7.7	Судакско-Феодосийский (№ 4)
3	2018.04.19	21 23 03.5	44.57	34.13	14	–	2.95/4	–	8.3	Ялтинский (№ 2)
4*	2018.04.24	20 47 42.0	44.86	37.56	33	3.7	3.95/7	3.9	10.7	Керченско-Анапский (№ 5)
5	2018.05.11	04 57 0.10	44.66	34.46	10	–	2.4/1	–	6.3	Алуштинский (№ 3)
6	2018.07.18	20 34 03.1	44.62	34.30	13	–	2.84/5	–	8.4	Ялтинский (№ 2)
7*	2018.09.09	07 47 04.1	44.49	35.80	35	3.2	3.86/6	4.0	10.8	Судакско-Феодосийский (№ 4)
8*	2018.09.13	05 45 23.0	44.42	34.41	29	2.8	3.72/4	3.5	10.5	Ялтинский (№ 2)
9*	2018.10.15	10 42 07.6	46.30	37.24	6	–	4.13/8	4.0	11.0	Азово-Кубанский (№ 7)
10	2019.01.03	18 29 16.0	44.63	34.69	16	–	2.5/2	–	6.4	Алуштинский (№ 3)
11	2019.01.05	14 50 52.0	44.61	34.66	15	–	1.96/2	–	5.8	Алуштинский (№ 3)
12	2019.01.11	19 00 14.3	44.63	34.63	13	–	2.51/1	–	6.5	Алуштинский (№ 3)
13	2019.01.12	23 21 54.0	44.66	35.34	25	–	3.23/6	3.2	9.9	Судакско-Феодосийский (№ 4)
14	2019.01.26	02 59 55.8	44.77	34.37	19	–	1.98/2	–	6.0	Алуштинский (№ 3)
15	2019.01.29	19 40 00.9	44.60	36.98	11	–	2.93/2	2.8	9.0	Керченско-Анапский (№ 5)
16	2019.02.13	12 37 49.9	44.77	34.40	20	–	2.42/1	–	6.2	Алуштинский (№ 3)
17	2019.02.19	10 43 52.0	43.14	35.22	44	2.8	3.48/3	3.0	9.7	Черноморская впадина (№ 9)
18	2019.03.07	06 27 02.7	44.46	34.06	7	–	2.13/3	–	7.1	Ялтинский (№ 2)
19	2019.04.06	08 01 11.3	44.66	35.49	35	3.1	3.3/7	–	9.9	Судакско-Феодосийский (№ 4)
20*	2019.05.08	19 51 29.5	43.01	31.44	46	3.4	3.71/6	3.6	10.0	Черноморская впадина (№ 9)
21	2019.05.23	20 48 56.3	44.56	35.73	24	–	2.77/4	–	7.7	Судакско-Феодосийский (№ 4)
22	2019.08.04	15 25 49.3	44.41	33.48	28	–	2.15/1	–	7.1	Севастопольский (№ 1)
23	2019.09.23	08 56 56.8	44.11	34.21	35	2.5	3.15/8	2.6	9.5	Ялтинский (№ 2)
24*	2019.12.04	09 43 28.9	43.98	30.42	43	3.4	3.79/6	3.7	10.0	Северо-Западный (№ 8)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 даны по [1], значения M_w/n – из табл. 3, где M_w – моментная магнитуда, n – число определений, участвовавших в усреднении; ML_{WSG} – локальная магнитуда, рассчитанная в программе WSG; * – землетрясения, для которых получены решения механизма очагов.

Решения механизмов очагов выполнены по стандартной методике [6]. Все решения можно отнести к надежным, т.к. получены по достаточно представительной выборке исходных данных ($N=32-100$) [7]. Параметры нодальных плоскостей и осей главных напряжений даны в табл. 2, а визуализация очагов в виде стереограмм – на рис. 2.

Таблица 2. Параметры механизмов очагов землетрясений за 2018–2019 гг. [7]

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
2018.01.31	04 28 55.6	10	4.0	23	15	31	270	50	135	261	75	-122	148	35	-28
2018.04.24	20 47 42.0	33	4.0	81	319	9	139	0	229	131	46	78	328	46	102
2018.09.09	07 47 04.1	35	3.9	9	228	9	319	78	93	146	54	-79	308	37	-105
2018.09.13	05 45 23.0	29	3.7	0	166	19	256	71	76	94	48	-65	238	48	-116
2018.10.15	10 42 07.6	6	4.1	80	264	11	84	0	354	274	46	105	74	46	71
2018.10.15*	10 42 07.0	17	4.1	0	1	66	91	24	270	48	73	-162	313	73	-18
2019.05.08	19 51 29.5	46	3.7	76	320	11	180	9	88	8	55	105	165	37	72
2019.12.04	09 43 28.9	43	3.8	81	139	9	319	0	49	311	46	78	148	46	102

Примечание: * – решение из [5].

Тип подвижки в очаге ощутимого землетрясения **31 января 2018 г. (№ 1)**, произошедшего в Керченско-Анапском районе, – сбросо-сдвиг (рис. 2). Одна из нодальных плоскостей имела близширотное простирание ($STK1=261^\circ$), другая – диагональное ($STK2=148^\circ$). Сбросо-сдвиговый тип подвижки в очагах землетрясений для этого района не является доминирующим [8].

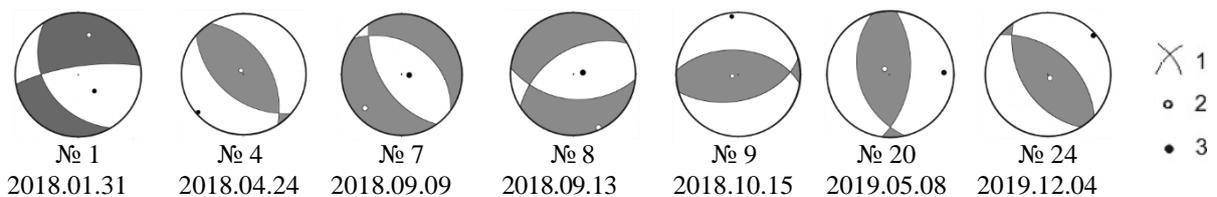


Рис. 2. Стереограммы механизмов очагов землетрясений № 1, 4, 7, 8, 9, 20, 24 из табл. 1 (в проекции нижней полусферы)

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно.

Землетрясение 24 апреля 2018 г. (№ 4) также Керченско-Анапского района произошло под действием горизонтальных сил сжатия. Обе нодальные плоскости наклонные (табл. 2). Тип подвижки в очаге – взброс, что характерно для восточной части Крыма [8].

При **землетрясении 9 сентября 2018 г. (№ 7)** с эпицентром в Судакско-Феодосийской зоне возникла сбросовая подвижка. Обе нодальные плоскости имели близдиагональное простирание (рис. 2, табл. 2). Тип подвижки и параметры механизма очага близки к таковым для ощутимого землетрясения, произошедшего в этой зоне 16.08.1990 г. [9].

В очаге ощутимого на Южном берегу Крыма **землетрясения 13 сентября 2018 г. (№ 8)** произошел сброс под действием горизонтальных сил растяжения, как и при разрушительном землетрясении 11.09.1927 г. [10] и ощутимом 02.03.2014 г. [3].

Землетрясение 15 октября 2018 г. (№ 9) с эпицентром в Азовском море возникло под действием горизонтальных сил сжатия ($PL=0^\circ$) меридионального направления ($AZM=354^\circ$). Тип подвижки – взброс. Близширотное простирание нодальных плоскостей возможно связано с разрывом вдоль широтного Погранично-Ейского линейaments [11]. Для этого землетрясения имеется также решение фокального механизма по методу тензора момента центра (агентство MED RCMT) [5], которое отличается от полученного нами по знакам первых вступлений P-волн как по типу подвижки, так и по ориентации нодальных плоскостей разрыва. По данным MED RCMT (табл. 2), в очаге произошла сдвиговая подвижка по плоскости северо-западной или северо-восточной ориентации. Сравнивая эти два решения, можно предположить, что первое движение в очаге началось со взброса, а в конце процесса разрушения среды произошло перераспределение напряжений, которое спровоцировало сдвиговую подвижку. Используя данные о координатах

центра [5] и гипоцентра землетрясения (табл. 1) можно также предположить, что процесс вспарывания разрыва в очаговой зоне развивался от начального гипоцентра сверху вниз (с глубины $h=6$ км на глубину $h=17$ км) в северо-западном направлении в азимуте 300° .

Землетрясения 8 мая (№ 20) и 4 декабря (№ 24) 2019 г. характеризуются взбросовым типом подвижки в очагах. Они произошли в западной части региона в переходной зоне кора–мантия под действием горизонтальных сжимающих усилий. Взбросовый тип механизма очага отмечен ранее и для других землетрясений этих районов [12, 13].

По параметрам механизмов очагов землетрясений (табл. 2) определена направленность излучения из очага на станции регистрации [14] и введена соответствующая поправка в расчет сейсмического момента.

Методы расчета, обработки и интерпретации амплитудных спектров не изменились по сравнению с используемыми в предыдущие годы [3, 15 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 (P) – по вертикальной (Z).

Интерпретация амплитудных спектров выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [16]. Примеры амплитудных спектров и их аппроксимация в соответствии с выбранной моделью (ω^{-2}) приведены на рис. 3.

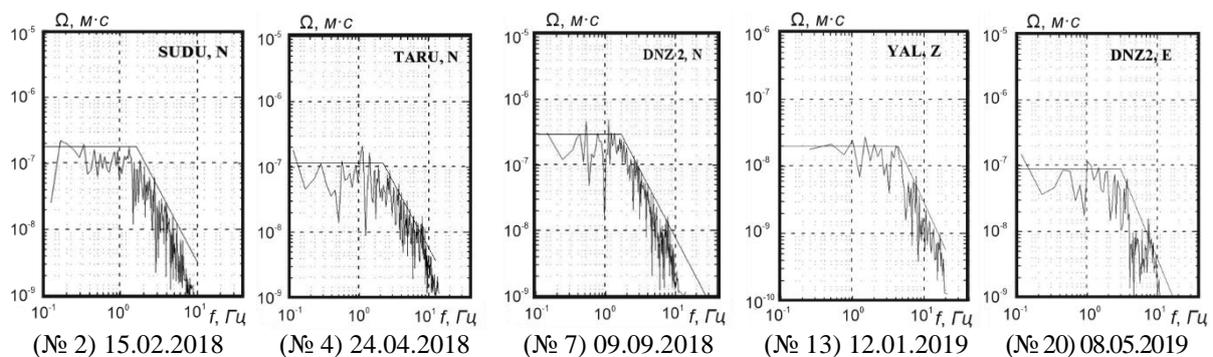


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров P - и S - волн землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2018–2019 гг. по записям региональных сейсмостанций и их аппроксимация в рамках теоретической модели Бруна (номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1)

Динамические параметры очагов: сейсмический момент M_0 , радиус круговой дислокации r_0 , сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ϵ , кажущееся напряжение $\eta\sigma$, величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$, средняя подвижка по разрыву \bar{u} (или величина дислокации), энергия образования дислокации в очаге E_U и моментная магнитуда M_w рассчитаны по формулам из работ [16–21], которые приведены в [15].

Поскольку для землетрясений 2018–2019 гг. получено большое количество станционных значений динамических параметров очагов ($N=100$), то в отличие от предыдущих лет [3, 15 и др.] в итоговой таблице 3 (графы 4–12) представлены только их средние значения (в табл. 3 выделены жирным шрифтом) по группе индивидуальных определений и стандартные отклонения δS . Станционные значения, в том числе откорректированные с учетом направленности излучения, приведены в [14, 22, 23].

Вычисление средних геометрических значений параметров и стандартных отклонений δS (табл. 3, графы 4–11) выполнено, как и прежде, по индивидуальным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [17]. Среднее значение M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью (табл. 3, графа 12). Станционные значения $\Delta\sigma_r$ получились знакопеременными, потому их средние значения вычислены по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ по формуле из [20] без вычисления δS (табл. 3, графа 10). Для четырех слабых землетрясений (№№ 5, 12, 16, 22) оценки динамических параметров получены только по единичным записям на ближайшей к эпицентру станции, соответственно, без оценки δS (в табл. 3 также выделены жирным шрифтом).

Таблица 3. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2018–2019 гг.

№ по табл. 1	Дата	Число определений N	$M_0 \cdot 10^{13}$, $H \cdot M$	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\dot{\gamma} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, 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
1	31.01.2018	8	108	0.85	7.88	26	1.57	8.1	-4.2	137	3.96
	δS		0.07	0.01	0.06	0.06	0.06	0.07		0.12	0.06
2	15.02.2018	3	1.51	0.53	0.46	1.51	0.05	1.04	-0.81	0.11	2.72
	δS		0.21	0.04	0.13	0.13	0.16	0.22		0.33	0.17
3	19.04.2018	4	3.29	0.57	0.79	2.66	0.11	1.45	-1.06	0.44	2.95
	δS		0.22	0.06	0.15	0.15	0.16	0.22		0.33	0.19
4	24.04.2018	7	105	0.74	11.3	37.6	2	12.8	-7.2	197	3.95
	δS		0.1	0.02	0.06	0.06	0.07	0.1		0.16	0.10
5	11.05.2018 (ALU)	1	0.5	0.38	0.39	1.29	0.036	0.2	-0.02	0.033	2.4
6	18.07.2018	5	2.22	0.50	0.76	2.54	0.09	2.4	-2.02	0.29	2.84
	δS		0.09	0.03	0.09	0.09	0.08	0.09		0.15	0.11
7	09.09.2018	6	79.5	0.84	5.74	19.1	1.2	6.9	-4	75.9	3.86
	δS		0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05		0.1	0.06
8	13.09.2018	4	46.7	0.75	4.72	15.7	0.87	7.21	-4.85	36.7	3.72
	δS		0.06	0.03	0.09	0.09	0.06	0.06		0.11	0.05
9	15.10.2018	8	190	1.16	5.4	18.1	1.52	4.2	-1.5	173	4.13
	δS		0.09	0.004	0.08	0.08	0.08	0.09		0.17	0.13
10	03.01.2019	2	0.73	0.34	0.85	2.8	0.06	0.17	0.26	0.11	2.5
	δS		0.04	0.04	0.15	0.15	0.1	0.04		0.18	0.03
11	05.01.2019	2	0.1	0.32	0.14	0.49	0.01	0.38	-0.31	0.01	1.96
	δS		0.3	0.05	0.45	0.44	0.37	0.26		0.22	0.18
12	11.01.2019 (ALU)	1	0.72	0.32	0.99	3.3	0.08	0.22	0.28	0.12	2.51
13	12.01.2019	6	8.65	0.56	2.21	7.37	0.3	16.4	-15.3	3.2	3.23
	δS		0.13	0.015	0.1	0.1	0.1	0.13		0.22	0.15
14	26.01.2019	2	0.12	0.31	0.17	0.56	0.01	0.51	-0.43	0.01	1.98
	δS		0.48	0.01	0.52	0.52	0.51	0.48		0.49	0.32
15	29.01.2019	2	3.1	0.48	1.18	4	0.14	5.8	-5.2	0.61	2.93
	δS		0.017	0.01	0.06	0.06	0.03	0.02		0.07	0.02
16	13.02.2019 (ALU)	1	0.54	0.4	0.38	1.27	0.036	0.16	0.04	0.034	2.42
17	19.02.2019	3	20.5	0.58	4.6	7.7	0.33	5.87	-3.57	7.85	3.48
	δS		0.24	0.02	0.28	0.28	0.26	0.24		0.51	0.2
18	07.03.2019	3	0.19	0.31	0.28	0.94	0.02	2.46	-2.32	0.01	2.13
	δS		0.07	0.01	0.08	0.08	0.07	0.07		0.15	0.05
19	06.04.2019	7	10.26	0.63	1.82	6.1	0.27	13.9	-13	3.11	3.3
	δS		0.09	0.02	0.07	0.07	0.07	0.09		0.15	0.09
20	08.05.2019	6	45.6	0.68	6.2	10.6	0.52	4.37	-1.27	24.5	3.71
	δS		0.06	0.004	0.05	0.05	0.05	0.03		0.11	0.07
21	23.05.2019	4	1.76	0.43	0.96	3.2	0.1	0.76	-0.28	0.28	2.77
	δS		0.14	0.01	0.13	0.13	0.13	0.14		0.27	0.14
22	04.08.2019 (SEV)	1	0.21	0.34	0.24	0.81	0.02	2.28	-2.15	0.008	2.15
23	23.09.2019	8	8.81	0.57	1.59	5.28	0.22	6.42	-5.63	1.75	3.15
	δS		0.13	0.01	0.13	0.13	0.13	0.14		0.26	0.23
24	04.12.2019	6	59.8	0.7	7.44	24.3	1.27	2.0	1.72	73.0	3.79
	δS		0.05	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05		0.11	0.07

Для большинства землетрясений 2018–2019 гг. средние очаговые параметров проведено по данным трех и более станционных определений, что обеспечило в основном малую величину стандартного отклонения δS (табл. 3). Наилучшая сходимость станционных определений,

как и в предыдущие годы [3, 15], получена для радиуса круговой дислокации r_0 с $\delta r_0 \leq 0.06$ даже для слабых толчков. Стандартные отклонения по другим параметрам для наиболее сильных землетрясений – $\delta S < 0.3$. Значения моментных магнитуд M_w определены с погрешностью не выше ± 0.2 . Исключение составляет только M_w с погрешностью ± 0.32 для землетрясения 26 января (№ 14), определенное по спектрам записей поперечных и относительно слабых колебаний продольной волны на станции «Алушта». Во всем диапазоне энергий величина сброшенных напряжений не превысила $\Delta\sigma = 11 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (11 бар), а кажущихся напряжений – $\bar{\eta}\sigma = 14 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (16 бар).

Наибольшие значения всех динамических параметров получены для землетрясения 15 октября (№ 9) с $K_{\Pi} = 11$, произошедшего в Азово-Кубанском районе на глубине $h = 6 \text{ км}$. Следует отметить, что все параметры другого сильного землетрясения (№ 1, 31 января) такого же энергетического уровня ($K_{\Pi} = 11$) оказались несколько ниже, чем для № 9, что, вероятно, связано с особенностями скоростных моделей на трассах от очага до станций регистрации. Для землетрясений (№№ 1, 4, 7–9, 20, 24), для которых по решениям механизма очагов в расчеты внесена поправка за направленность излучения, отмечена наилучшая сходимость станционных значений всех динамических параметров очагов.

Сравнение динамических параметров очагов за 2018–2019 гг. со средними их долговременными величинами, в отличие от предыдущих лет [3, 15], проведено не только для сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 , но и для сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ (рис. 4). Для сравнения использованы зависимости $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ и $\lg \Delta\sigma(K_{\Pi})$ из [24, 25]:

$$\lg M_0 = 0.645(\pm 0.027) \cdot K_{\Pi} + 15.142(\pm 0.271), \rho = 0.99,$$

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

$$\lg \Delta\sigma = 0.363(\pm 0.026) \cdot K_{\Pi} - 2.96(\pm 0.23), \rho = 0.8,$$

где ρ – коэффициент корреляции.

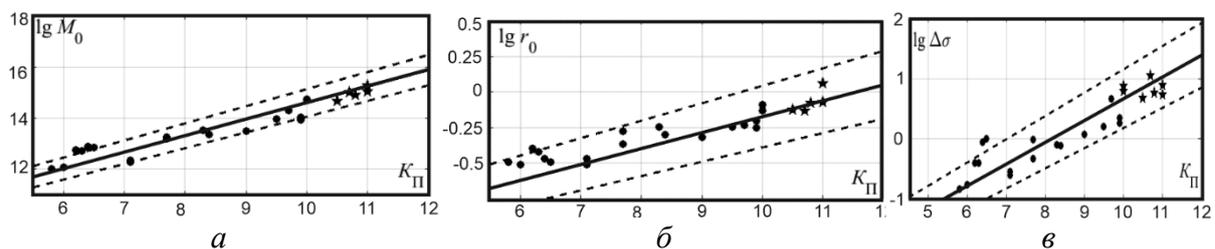


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2018–2019 гг. (а – сейсмического момента M_0 , б – радиуса круговой дислокации r_0 , в – сброшенного напряжения) с зависимостями $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ [24] и $\Delta\sigma(K_{\Pi})$ [25]

Звездочкой отмечены землетрясения с известным механизмом очага, пунктиром – пределы погрешностей зависимостей $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ и $\Delta\sigma(K_{\Pi})$.

Как видно из рисунка 4 а, б, средние значения M_0 и r_0 большинства землетрясений 2018–2019 гг. находятся в пределах погрешностей долговременных зависимостей $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$. При этом, если значения r_0 для наиболее сильных сейсмических событий ($K_{\Pi} > 10$) 2018–2019 гг. равномерно распределены относительно регрессии $r_0(K_{\Pi})$, то для слабых толчков они выше средней $r_0(K_{\Pi})$.

Наибольшие отличия M_0 и r_0 от долговременных параметров получены для самого слабого землетрясения 5 мая (№ 5) с $K_{\Pi} = 6.3$, параметры которого восстановлены только по одной станции регистрации. Кроме того, для слабых очагов менее надежно определяется глубина очага и, соответственно, могут быть ошибки при выборе скоростных моделей среды.

Величины сброшенных напряжений $\Delta\sigma$ для большинства землетрясений 2018–2019 гг. также не выходят за пределы доверительного интервала регрессии $\Delta\sigma(K_{\Pi})$, построенной для периода цифровой регистрации 2007–2017 гг. [25]. Несколько выше долговременной зависимости $\Delta\sigma(K_{\Pi})$ лежат точки $\Delta\sigma$, оцененные по единичным определениям для двух наиболее слабых толчков, № 10 и № 12 с $K_{\Pi} \leq 6.5$ (рис. 4 в).

Энергетические спектры землетрясений. Спектральные свойства очагов землетрясений 2018–2019 гг. дополнительно изучены по сглаженным энергетическим спектрам [17, 26]. Рассмотрены энергетические спектры только по данным записей станции «Алушта», поскольку ранее по этой станции получены их некоторые общие свойства и особенности [27]. Методика и алгоритм расчета и интерпретации энергетических спектров описаны в работах [17, 26].

Для энергетических спектров 2018–2019 гг. характерна резонансная форма с одним максимумом плотности энергии q_{max} в ограниченной области частот $f_{q_{max}}$ (рис. 5), как и для других землетрясений Крыма, включая аналоговый период наблюдений [17].

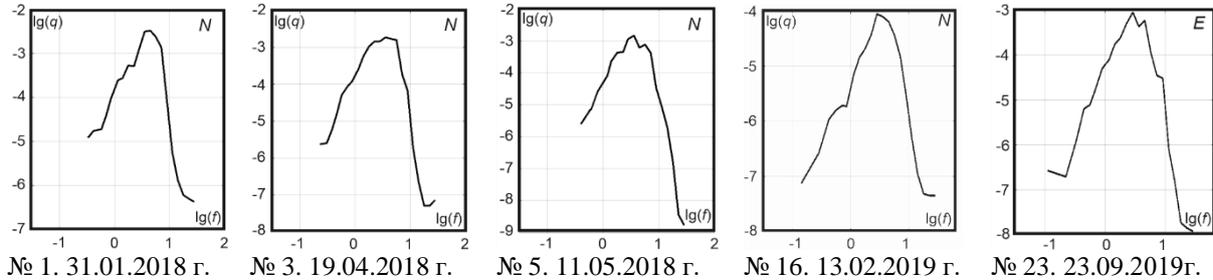


Рис. 5. Примеры энергетических спектров землетрясений Крыма 2018–2019 гг. по записям станции «Алушта». Номера и даты землетрясений даны по табл. 1

Значения $f_{q_{max}}$ и диапазон ширины максимума спектра δf_q на уровне 0.75 от максимального значения q_{max} в высокочастотной (f_{q_1}) и низкочастотной (f_{q_2}) части спектра ($\delta f_q = (f_{q_1} - f_{q_2})$) получились различными для разного энергетического уровня землетрясений и эпицентрального расстояния (табл. 4).

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

№ (по табл. 1), дата	$K_{П}$	Δ , км	$f_{q_{max}}$, Гц			δf_q , Гц		
			Z	N	E	Z	N	E
№ 1. 31.01.2018	11.0	215	5.7	4.5	3.6	4.5–7.2	2.9–7.2	3–5.4
№ 3. 19.04.2018	8.3	25	–	3.6	2.9	–	1.8–5.9	2–3.7
№ 4. 24.04.2018	10.7	250	5.6	3.6	3.6	3–7.1	2.6–5.6	2.9–4.8
№ 5. 11.05.2018	6.3	5	7.1	3.6	–	3.5–9.1	2.5–4.5	–
№ 9. 09.09.2018	11.0	285	1.8	1.4	1.8	1.5–3.5	0.9–3.6	0.76–2.1
№ 10. 03.01.2019	6.4	23	5.8	4.51	4.53	4.5–7	3.6–5.7	2.7–5.6
№ 11. 05.01.2019	5.8	22	7.1	4.52	3.5	6.1–8.8	3.4–5.7	2.8–5.7
№ 12. 11.01.2019	6.5	19	5.8	4.52	3.52	4.4–6.8	3.5–5.65	2.8–4.8
№ 13. 12.01.2019	10.1	74	4.5	–	–	3.5–5.3	–	–
№ 14. 26.01.2019	6.0	10	5.8	3.6	3.6	4.7–9.1	2.4–4.2	2.8–4.9
№ 16. 13.02.2019	6.2	9	–	–	4.5	–	–	2.8–5.7
№ 17. 19.02.2019	9.6	167	7.2	4.55	4.54	4.5–8.1	2.9–5.7	2.3–5.7
№ 20. 08.05.2019	10.0	281	–	2.86	2.85	–	1.8–5.6	1.8–4.5
№ 21. 23.05.2019	7.7	106	5.7	3.6	–	3.1–6.6	2.45–6	–
№ 23. 23.09.2019	9.5	65	4.5	4.54	2.9	3.7–7.3	2.8–6.2	1.8–5.2

Ранее в [27] энергетические спектры по данным станции «Алушта» за период 2014–2015 гг. были условно разделены на четыре группы в соответствии с эпицентрными расстояниями Δ : 1 – (26 ± 2) км; 2 – (46 ± 3) км; 3 – (165 ± 14) км; 4 – (235 ± 12) км. Сравним полученные в данной работе результаты с прежними определениями.

Максимум $f_{q_{max}}$ на диапазонах частот 3.6 Гц и 2.9 Гц для землетрясения 19 апреля 2018 г. (№ 3 по табл. 4) с $\Delta = 25$ км находится в пределах погрешностей $f_{q_{max}} = (3.33 \pm 0.33)$ Гц для первой группы очагов ($\Delta = 26 \pm 2$) км [27]. Землетрясение № 17 попадает в третью группу ($\Delta = 165 \pm 14$) км, но его спектр более высокочастотный ($f_{q_{max}} = 4.5$ Гц по S-волне), что почти в полтора раза больше диапазона частот для данной группы: $f_{q_{max}} = (2.37 \pm 0.41)$ Гц [27]. Возможно, это связано с индивидуальными особенностями очагового излучения землетрясения № 17, произошедшего в переходной зоне кора – мантия на глубине 44 км.

Другие землетрясения не вошли в диапазоны ранее выделенных групп. Особо следует отметить землетрясение № 5, произошедшее в непосредственной близости к сейсмической станции «Алушта» ($\Delta = 5$ км). Частота максимальных значений $f_{q_{max}}$ для данного землетрясения смещена в область

высоких частот и составляет: 3.6–5.7 Гц для горизонтальных (N и E) составляющих и 7.1 Гц – для вертикальной Z-компоненты, что связано с пониженным затуханием высоких частот на малых эпицентральных расстояниях и низким энергетическим уровнем землетрясения ($K_{II}=6.3$).

Заключение. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма за 2018–2019 гг. изучены как по амплитудным, так и по энергетическим спектрам. Средние значения динамических параметров очагов землетрясений в большинстве случаев оценены по нескольким станциям и по разным типам волн, что обеспечило в основном малую величину показателя степени рассеяния индивидуальных оценок δS и соответствие долговременным зависимостям $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$.

Для пяти землетрясений 2018 г.: 31 января, 24 апреля (Керченско-Анапский район), 9 сентября (Судакский район), 13 сентября (Ялтинский район) и 15 октября (район Азовского моря) с $K_{II}=10.5$ –11 и двух 2019 г.: 8 мая (Черноморская впадина) и 4 декабря (северо-западный район) с $K_{II}=10$ получены решения механизма очагов. Тип подвижки в очаге землетрясения 31 января 2018 г. – сбросо-сдвиг, 9 и 13 сентября 2018 г. – сброс, а в очагах землетрясений 24 апреля и 15 октября 2018 г., а также 8 мая и 4 декабря 2019 г. – взброс. Для этих землетрясений получена наилучшая согласованность всех станционных определений с наименьшей величиной δS за счет внесения в расчеты динамических параметров очагов реальной поправки за направленность излучения на каждую станцию регистрации.

Статистика по частотному составу сейсмических колебаний, несущих максимальную сейсмическую энергию, дополнена данными для 15 землетрясений по записям станции «Алушта». На качественном уровне отмечен сдвиг максимума энергетического спектра (f_{qmax}) в сторону более высоких частот для слабых толчков и близких эпицентральных расстояний. Для установления надежных количественных зависимостей значений параметров f_{qmax} и δf_q от энергетического уровня землетрясений и эпицентрального расстояния имеющихся данных пока недостаточно.

Л и т е р а т у р а

1. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыччина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-26.html>
2. 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.
3. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 250–262. – DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-62-54.2020.23.25>
4. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Сухорученко С.К., Клянчин А.И. Организация и первые результаты сейсмических наблюдений в северо-западной части территории Крыма // Ученые записки Крымского Федерального Университета им В.И. Вернадского. География. Геология. – 2020. – Т. 6 (72), № 4. – С. 141–165.
5. International Seismological Centre. (2023). On-line Bulletin. <https://doi.org/10.31905/D808B830>
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. Пустовитенко Б.Г. (отв. сост.), Бондарь М.Н. Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2018–2019 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.gsras.ru/zse/app-26.html>
8. 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.
9. Пустовитенко Б.Г. Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона последних 20 лет // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. – Изд. ИГ НАНУ, 2002. – С. 59–64.
10. Пустовитенко Б.Г. Динамические параметры очагов разрушительных крымских землетрясений 1927 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2001 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2003. – С. 124–130.
11. Євдошук М.І., Галко Т.М., Седлєрова О.В., Волкова О.В., Якубенко Г.М. Перспективи нафтогазоносності українського сектора Азовського моря за комплексною оцінкою даних аерокосмічних досліджень // Нафтогазова галузь України. – 2013. – № 1. – С. 3–8.

12. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Скляр А.М., Князева В.С. Змеиное землетрясение 5 мая 2008 г. с $K_{II}=12.7$, $M_c=5.1$, $M_w=4.8$, $I_0^P=5-6$ (северо-западная часть шельфа Черного моря, Украина) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 г. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 313–325.
13. 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 гг.). – С. 242–252. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.22>. EDN: DMTVLR
14. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Скорректированные очаговые параметры землетрясений Крыма 2018–2019 гг. // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2021. – Т. 7 (73), № 4. – С. 164–175.
15. 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>
16. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research, 1970. – V. 75, N 26. – P. 4997–5009.
17. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
18. 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.
19. Аптекман Ж.Я., Дараган С.К., Долгополов В.В., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры P -волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. – 1985. – № 2. – С. 60–70.
20. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
21. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // Journal of Geophysical Research. – 1979. – V. 84, N B5. – P. 2348–2350.
22. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2018 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2019. – Т. 5 (71), № 4. – С. 77–96.
23. 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 – Т. 6 (72), № 4. – С. 66–84.
24. 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.
25. 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.
26. Ризниченко Ю.В., Сейдузова С.С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. – Москва: Наука, 1984. – 180 с.
27. 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.

EARTHQUAKE FOCAL PARAMETERS in the CRIMEAN-BLACK SEA REGION in 2018–2019

B.G. Pustovitenko¹, E.E. Eredzhepov^{1,2}, 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, 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, Russia, epicrimea@mail.ru*

Abstract. The results of calculation and analysis of spectral and dynamic parameters of the sources (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ϵ , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \bar{u} , Eu и M_w) of 24 Crimean earthquakes for 2018–2019 in the range of energy classes $K_{II}=5.8-11$ are presented. 157 station amplitude spectra of P - and S - seismic waves recorded at seven regional digital seismic stations were used for calculations. The determination of dynamic parameters of the sources was carried out using the Brune theoretical dislocation model. The average values of the dynamic parameters of earthquake sources for

2018–2019 were in most cases estimated for several stations and for different types of waves, which ensured a small value of the degree of scattering of individual estimates. For the studied 2018–2019 earthquakes, the average values of the seismic moment M_0 , the radius of the circular dislocation r_0 , and the stress drop $\Delta\sigma$ were within the confidence intervals of the long-term dependencies $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ and $\Delta\sigma(K_{\Pi})$. For five strongest earthquakes of 2018 (January 31, April 24, September 9, September 13, and October 15 with $K_{\Pi}=10.5-11$) and two earthquakes of 2019 (May 8 and December 4), focal mechanism solutions were obtained within the framework of the double dipole model. Type of movement in the source of January 31, 2018 earthquake is a strike-slip with a normal fault component, of September 9 and September 13, 2018 – a normal fault, of April 24 and October 15, 2018, as well as May 8 and December 4, 2019 – a reverse fault. The spectral composition of seismic oscillations was additionally studied from the energy spectra of 15 earthquakes using records at the Alushta station located at distances 5–285 km from source zones. At the qualitative level, a shift of the spectrum maximum (f_{qmax}) towards higher frequencies for weak shocks and close epicentral distances.

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. (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

References

1. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2022). [Catalog of the earthquakes of the Crimean-Black Sea region in 2018–2019]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-26.html> (In Russ.).
2. 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.).
3. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2020). [Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2015]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 250–262. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-62-54.2020.23.25>. (In Russ.).
4. Pustovitenko, B.G., Kul'chitskii, V.E., Sukhoruchenko, S.K., & Klianchin, A.I. (2020). [Organization and first results of seismic observations in the northwestern part of the territory of Crimea]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im V.I. Vernadskogo Geografiia. Geologiia* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University Geography. Geology], 6(72), 4, 141–165. (In Russ.).
5. International Seismological Centre. (2023). On-line Bulletin. Retrieved from <https://doi.org/10.31905/D808B830>
6. 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.).
7. Pustovitenko, B.G., & Bondar', M.N. (2022). [Catalog of focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2018]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 26(2018–2019). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.gsras.ru/zse/app-26.html> (In Russ.).
8. Vol'fman, Yu.M., Pustovitenko, B.G., Kolesnikova, E.Ya., & Ostanin, A.M. (2018). [Conditions of seismogenesis of the Crimean-Black Sea region (according to the decisions of earthquake focal mechanisms)]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im V.I. Vernadskogo Geografiia. Geologiia* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University Geography. Geology], 2(68), 4, 206–250. (In Russ.).
9. Pustovitenko, B.G. (2000). [Focal mechanisms of perceptible earthquakes of the Crimean Black Sea region during the last 20 years]. *Seismologicheskij bjulleten' Ukrainy za 2000 god* [Seismological Bulletin of Ukraine for 2000], 59–64. (In Russ.).
10. Pustovitenko, B.G. (2003). [Dynamic parameters of the sources of the destructive Crimean earthquakes of 1927]. *Seismologicheskij bjulleten' Ukrainy za 2001 god* [Seismological Bulletin of Ukraine for 2001], 124–130. (In Russ.).
11. Evdoshhuk, M.I., Galko, T.M., Sedlerova, O.V., Volkova, O.V., & Jakubenko, G.M. (2013). [Prospects for the oil and gas potential of the Ukrainian sector of the Sea of Azov for a comprehensive assessment of these aerospace achievements]. *Naftogazova galuz' Ukraini* [Oil and gas industry of Ukraine], 1, 3–8. (In Ukrainian).
12. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., Skliar, A.M., & Kniazeva, V.S. (2014). [Serpentine earthquake on May 5, 2008 with $K_{\Pi}=12.7$, $M_s=5.1$, $M_w=4.8$, $I_0^p=5-6$ (northwestern part of the Black Sea shelf, Ukraine)]. In *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii v 2008 godu* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2008] (pp. 313–325).

- Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
13. 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
 14. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2021). [Adjusted focal parameters of earthquakes in Crimea in 2018–2019]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im V.I. Vernadskogo Geografiia. Geologiya* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University Geography. Geology], 7(73), 4, 164–175. (In Russ.).
 15. 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. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-62-54.2021.24.12>. (In Russ.).
 16. Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997–5009.
 17. 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.).
 18. 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.).
 19. Aptekman, Zh.Ya., Daragan, S.K., Dolgoplov, V.V., Zaharova, A.I., Zobin, V.M., Kogan, S.Ya., Korchagina, O.A., Moskvina, A.G., Polikarpova, L.A., & Chepkunas, L.S. (1985). [P-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake foci. Harmonization of raw data and the procedure of calculating the amplitude spectra]. *Vulkanologiya i seismologiya* [Journal of Volcanology and seismology], 2, 60–70. (In Russ.).
 20. Kostrov, B.V. (1975). *Mehanika ochaga tektonicheskogo zemletrjasenija* [Tectonic earthquake source mechanics]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 179 p.
 21. Hanks, T.C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350.
 22. Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar', M.N. (2019). [Spectral and dynamic parameters of earthquake sources in Crimea in 2018]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo Geografiia. Geologiya* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University Geography. Geology], 5(71), 4, 77–96. (In Russ.).
 23. Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar', M.N. (2020). [Spectral and dynamic parameters of earthquake sources in Crimea in 2019]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo Geografiia. Geologiya* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University Geography. Geology], 6(72), 4, 66–84. (In Russ.).
 24. 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]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 238–242. (In Russ.).
 25. 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.).
 26. Riznichenko, Yu.V., & Sejduzova, S.S. (1984). *Spektral'no-vremennaja karakteristika sejsmicheskoy opasnosti* [Spectral-temporal characteristic of seismic hazard]. Moscow, Nauka Publ., 180 p. (In Russ.).
 27. 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.).