

II. СПЕКТРЫ и ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

УДК 550.348.(477.75)

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА в 2016–2017 гг.

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

¹ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства»

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

Аннотация. Приведены результаты определения спектральных и динамических параметров очагов 21 землетрясения в диапазоне энергетических классов $K_{II}=6.5-13.1$ Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. Динамические параметры очагов восстановлены по 149 амплитудным спектрам объемных P - и S -волн, зарегистрированных сетью региональных сейсмических станций Крыма. Для землетрясений 13 мая, 28 июня, 22 июля 2016 г. с $K_{II}=10.5, 10.9$ и 11.6 соответственно и 16 июня 2017 г. с $K_{II}=11.0$ получены решения механизма очагов по знакам смещений в продольных сейсмических волнах на основе дислокационной модели двойного диполя. Для наиболее сильного землетрясения 15 октября 2016 г. с $K_{II}=13.1$ использовано решение механизма очага по данным ISC. Тип подвижки в очаге ошутимого землетрясения 13 мая – чистый сдвиг, а в очагах землетрясений 28 июня, 22 июля, 15 октября 2016 г. и 16 июня 2017 г. – взброс. В соответствии с полученными решениями определена направленность излучения из очагов на станции регистрации, которая учтена при расчете сейсмического момента M_0 . Средние значения скалярных сейсмических моментов и радиусов круговой дислокации в очагах землетрясений 2016–2017 гг. в пределах погрешностей их определения удовлетворяют долговременным зависимостям этих параметров от энергетического уровня землетрясений, полученным за полувековой период по аналоговым записям.

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

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22 **EDN:** DMTVLR

Для цитирования: 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: 10.35540/1818-6254.2022.25.22. EDN: DMTVLR

Введение. На региональных станциях с цифровой регистрацией в частотном диапазоне $0.1-25$ Гц сейсмические колебания осложнены различными помехами (шумами), имеющими как природный или техногенный, так и приборный генезис. Для исключения помех и выделения полезного (сейсмического) сигнала используются различные фильтры, корректность применения которых не всегда очевидна, особенно при слабой записи. В этой связи спектральный анализ сейсмических волн и восстановление по ним очаговых параметров ежегодно проводятся только для ограниченного числа зарегистрированных сейсмических событий. Так, из 148 землетрясений Крымско-Черноморского региона, включенных в каталог за 2016–2017 гг. [1], динамические параметры определены только для 21 землетрясения в диапазоне энергетических классов $K_{II}=6.5-13.1$, что составляет 14 % от всех зарегистрированных за два года сейсмических событий в диапазоне $K_{II}=3.5-13.1$. Кинематические параметры очагов восстановлены только для пяти наиболее сильных землетрясений с $K_{II} \geq 10.4$.

Исходные данные. Для восстановления очаговых параметров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. выбраны наиболее значимые представительные сейсмические события с $K_{II} > 9.5$, а также несколько слабых толчков для пополнения статистических данных по менее изученным территориям (табл. 1). Пространственное расположение эпицентров землетрясений дано на рис. 1.

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 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	2016.03.11	19 17 32.5	44.35	33.48	24	–	2.6/2	–	7.4	Севастопольский (№ 1)
2	2016.05.13	14 05 27.8	44.63	34.41	13	3.2	3.6/4	3.3	10.4	Алуштинский (№ 3)
3	2016.05.15	17 14 02.0	43.84	33.83	32	–	2.9/1	–	7.9	Севастопольский (№ 1)
4	2016.05.26	16 49 33.9	44.73	36.21	23	3.0	3.1/4	3.0	9.7	Керченско-Анапский (№ 5)
5	2016.06.17	18 04 07.4	44.76	35.16	31	–	3.0/3	–	8.4	Судакско-Феодосийский (№ 4)
6	2016.06.28	04 23 48.1	42.46	31.59	35	–	4.1/7	3.7	10.9	Черноморская впадина (№ 9)
7	2016.07.22	21 40 13.6	42.35	34.95	25	3.9	4.3/10	4.2	11.6	Черноморская впадина (№ 9)
8	2016.08.24	02 32 31.3	44.02	33.76	28	–	2.8/4	–	7.9	Севастопольский (№ 1)
9	2016.10.12	12 59 12.7	43.98	33.77	20	–	2.4/2	–	7.8	Севастопольский (№ 1)
10	2016.10.15	08 18 33.3	42.12	30.70	17	5.1	5.1/5	5.0	13.1	Черноморская впадина (№ 9)
11	2016.11.03	07 51 47.3	44.52	34.08	16	–	2.1/3	–	6.7	Ялтинский (№ 2)
12	2017.01.27	19 05 25.9	44.35	34.37	29	–	3.0/1	–	8.2	Ялтинский (№ 2)
13	2017.06.16	18 17 34.8	44.72	36.74	9	3.6	4.05/9	3.7	11.0	Керченско-Анапский (№ 5)
14	2017.07.05	20 12 41.4	43.86	34.12	41	2.5	3.3/6	3.1	9.0	Ялтинский (№ 2)
15	2017.07.09	20 37 12.1	44.62	34.97	24	–	2.5/2	–	6.5	Алуштинский (№ 3)
16	2017.07.13	12 49 38.7	44.81	32.42	7	–	2.4/2	–	7.4	Севастопольский (№ 1)
17	2017.08.08	04 08 50.5	44.68	36.77	8	3.1	3.3/8	3.4	9.9	Керченско-Анапский (№ 5)
18	2017.08.08	05 32 20.3	44.59	36.77	5	–	3.4/8	3.6	10.2	Керченско-Анапский (№ 5)
19	2017.08.30	20 24 40.9	45.34	34.20	25	–	2.5/3	–	7.7	Степной Крым (№ 6)
20	2017.10.02	13 58 34.0	43.05	36.44	30	–	3.5/4	3.3	9.5	Черноморская впадина (№ 9)
21	2017.11.12	12 58 29.2	44.86	32.29	9	2.9	3.5/5	3.4	9.8	Севастопольский (№ 1)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 даны по [1], значения M_w/n – из табл. 4, где n – число индивидуальных определений, участвовавших в осреднении.

Наибольшее количество изученных землетрясений (шесть событий) относится к Севастопольскому району, по четыре – к Черноморской впадине и Керченско-Анапскому району, три – к Ялтинскому, два – к Алуштинскому и по одному – к Судакско-Феодосийскому и степному Крыму. Землетрясение № 2 с $K_{II}=10.4$ произошло вблизи побережья Южного берега Крыма и ощущалось с интенсивностью до 5 баллов в г. Алуште [2].

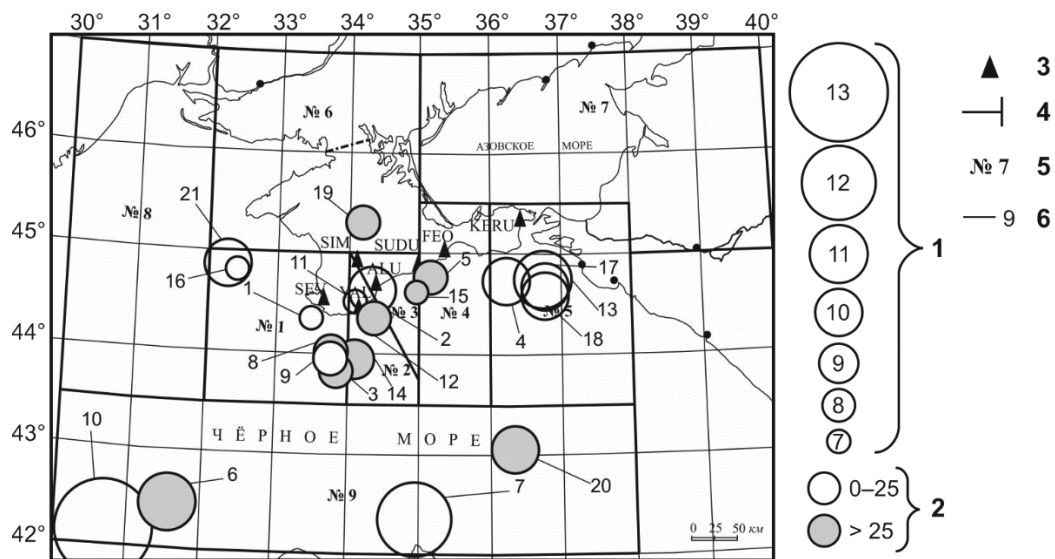


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг., для которых восстановлены очаговые параметры

1 – энергетический класс K_{II} [3]; 2 – глубина очага h , км; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница района; 5 – номер района, 6 – номер землетрясения по табл. 1.

Для расчета амплитудных спектров и восстановления по ним динамических параметров очагов использовано 149 записей продольных (P) и поперечных (S) волн на пяти региональных цифровых сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU) и «Ялта» (YAL), расположенных на скальных грунтах.

Решения механизмов очагов четырех наиболее сильных землетрясений 13 мая, 28 июня и 22 июля 2016 г., а также 16 июня 2017 г. [4] получены по знакам первых вступлений продольных (P) сейсмических волн на станциях Крыма и Международной сети [5]. Дополнительно были найдены и использованы непосредственно сейсмограммы на станциях Турции и Кавказа для пополнения статистических данных по знакам P -волн из районов азимутальных «брешей». Таким образом удалось получить представительные исходные данные в широком азимутальном створе. Для наиболее сильного землетрясения 15 октября с $K_{II}=13.1$ имеется несколько решений механизма очага по данным различных агентств [5].

Механизмы очагов (табл. 2, рис. 2) получены на основе теории дислокации в рамках модели двойного диполя по стандартной методике [6].

Таблица 2. Параметры механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. [4]

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
2016.05.13	14 05 27.8	13	3.6	5	116	56	14	33	205	343	71	-152	243	63	-22
2016.06.28	04 23 48.1	35	4.1	81	325	1.7	66	9	156	65	54	88	248	36	93
2016.07.22	21 40 13.6	25	4.3	71	104	19	284	0	14	266	48	64	122	48	115
2017.06.16	18 17 34.8	9	4.0	76	130	11	270	9	2	262	55	77	105	37	108

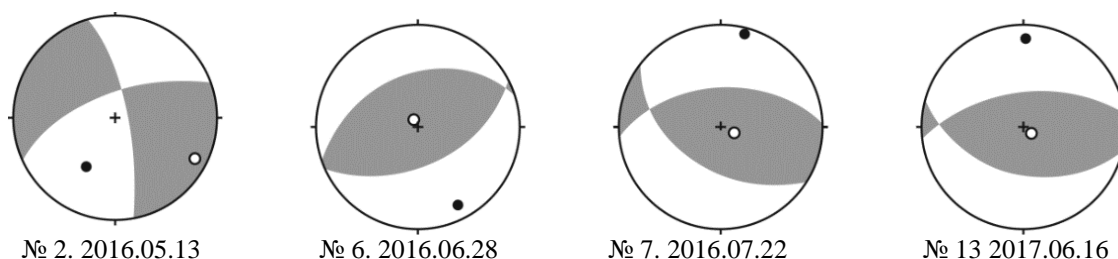


Рис. 2. Стереодиаграммы механизмов очагов землетрясений № 2, 6, 7, 13 согласно таблице 1 (в проекции нижней полусферы, затемнены области сжатия)

Тип подвижки в очаге ощутимого землетрясения 13 мая 2016 г. (№ 2), возникшего в центральной зоне региона вблизи Южного берега Крыма, – сдвиг, правосторонний по плоскости $NP1$ и левосторонний – по $NP2$ (рис. 2). Обе нодальные плоскости имели близдиагональное простирание ($STK1=343^\circ$ и $STK2=243^\circ$). Сдвиговый тип подвижки в очагах землетрясений для центральной зоны региона отмечен впервые в [7].

Землетрясение 28 июня 2016 г. (№ 6) произошло в западной части Черноморской впадины под действием горизонтальных сил сжатия ($PL=9^\circ$), ориентированных в $AZM=156^\circ$. Обе нодальные плоскости наклонные ($DP1=54^\circ$ и $DP2=36^\circ$) с падением $NP1$ к юго-востоку и $NP2$ – к северо-западу (табл. 2). Тип подвижки в очаге – взброс (надвиг).

При землетрясении 22 июля 2016 г. (№ 7) с эпицентром вблизи центральной части побережья Турции также возникла взбросовая подвижка под действием близмеридиональных горизонтальных сжимающих напряжений ($PL=0^\circ$). Одна из нодальных плоскостей имела широтное простирание ($NP1=266^\circ$), а другая – диагональное ($NP2=122^\circ$). Обе плоскости наклонены к горизонту под одинаковыми углами ($DP=48^\circ$) (рис. 2, табл. 2).

В очаге землетрясения 16 июня 2017 г. (№ 13) произошел взброс активного крыла разрыва под действием горизонтальных сил сжатия ($PL=9^\circ$) меридионального направления ($AZM=2^\circ$). Такой тип подвижки является доминирующим для очагов землетрясений восточной части Крымско-Черноморского региона [7].

Для самого сильного землетрясения 15 октября с $K_{II}=13.1$ района западной части Черноморской впадины решение механизма взято из [5] по данным обработки в разных международных агентствах (рис. 3, табл. 3).

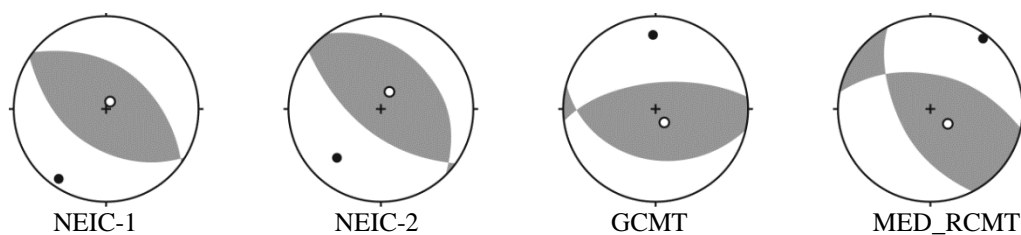


Рис. 3. Стереодиаграммы механизма очага землетрясения 15 октября 2016 г. по данным Международных агентств [5]

Решения были получены в рамках двойного диполя по знакам первых вступлений объемных волн (NEIC-1, NEIC-2) и по методу тензора сейсмического момента (GCMT и MED RCMT).

Таблица 3. Параметры механизма очага землетрясения (№ 10 в табл. 1) 15 октября 2016 г. с $K_{II}=13.1$, $M_w=5.1$ по данным [5]

Агентство	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
GCMT	08 18 35.9	22	5.3	72	219	11	92	14	360	75	33	70	279	60	103
NEIC-1	08 18 33.6	8	5.0	88	335	0	236	2	146	56.2	47	90.5	236	43	89.5
NEIC-2	08 18 39	16	5.1	72	337	5	232	17	141	55	62	95	224	28	80
RGMT	08 18 33	13	5.0	62	231	28	53	1	323	27	51	53	257	52	127

По параметрам механизмов очагов (табл. 2, 3) землетрясений определена направленность излучения из очага на станции регистрации и введена соответствующая поправка в расчет динамических параметров.

Методика обработки и интерпретация амплитудных спектров не изменились по сравнению с 2014 и 2015 гг. [8, 9]. Для расчета амплитудных спектров использованы записи только с четкими фазами объемных P - и S -волн, с превышением полезного сигнала над фоном помех в два раза и более. Пример такой записи дан на рисунке 4.

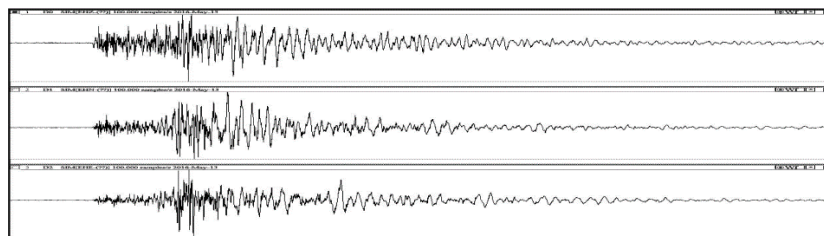


Рис. 4. Пример записи на станции «Симферополь» ($\Delta=42$ км) ошутимого землетрясения 13 мая 2016 г. с $K_{II}=10.4$ (№ 2 по таблице 1). Составляющие Z, N-S, E-W расположены сверху вниз

Для интерпретации амплитудных спектров выбрана теоретическая дислокационная модель Бруна (ω^{-2}) [10], в рамках которой надежно аппроксимируются рассчитанные амплитудные спектры объемных волн землетрясений за 2016–2017 гг. (рис. 5).

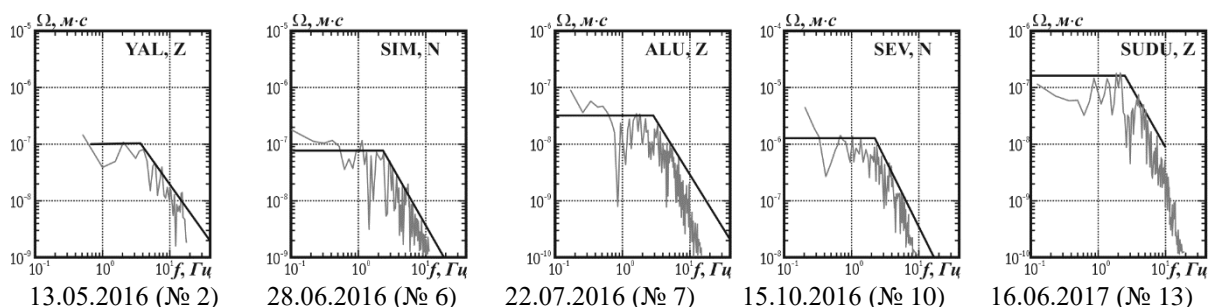


Рис. 5. Примеры амплитудных спектров P - и S -волн наиболее сильных землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. по записям региональных сейсмостанций и их аппроксимация в рамках теоретической модели Бруна (номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1)

Расчет динамических параметров очага выполнен по параметрам амплитудных спектров записей: спектральной плотности Ω_0 , которая пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 , и угловой частоте f_0 , прямо связанной с радиусом дислокации r_0 [10]. Другие динамические параметры очагов: 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 [10–15], приведенным в [9].

Методика перехода от стационарного спектра к спектру источника подробно изложена в работах [11–13] и не изменилась по сравнению с предыдущими годами [8, 9].

Большинство динамических параметров получено по группе независимых стационарных определений (табл. 4), за исключением двух случаев (№ 3 и № 12). Для этих относительно слабых толчков с $K_{II}=7.9$ и $K_{II}=8.1$ пригодными для анализа оказались записи только S-волн на ближайшей к очагам станции «Алушта».

Вычисление средних геометрических значений параметров S и стандартных отклонений δS (табл. 4) выполнено, как и прежде, по стационарным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [11]. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью (табл. 4, графа M_w^*). В связи с тем, что стационарные значения радиационного трения $\Delta\sigma_r$ получились отрицательными или знакопеременными, их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ по формуле из [14]:

$$\Delta\sigma_r = 1/2\Delta\sigma - \overline{\eta\sigma} \quad (1)$$

В этом случае графа «стандартное отклонение δS » в таблице 4 не заполнялась.

Результаты стационарных и средних значений динамических параметров представлены в таблице 4. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ , км, тип использованной волны (P, S) и составляющая записи, где (N+E) означает полный вектор колебаний по N–S и E–W компонентам.

Таблица 4. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг.

Код станции	Тип волны	Компонента	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс	$\sum \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\epsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_U \cdot 10^8$, Дж	M_w^*
Землетрясение 11 марта 2016 г.; $t_0=19^h 17^m 32.5^s$ (№ 1 в табл. 1)															
SEV	P	Z	27	0.01	–	6.5	0.81	0.37	0.7	2.4	0.06	1.1	–0.7	0.1	2.54
SEV	S	N+E	27	–	0.08	3.8	1.15	0.35	1.1	3.8	0.1	0.7	–0.2	0.2	2.64
S							0.97	0.36	0.88	3.0	0.08	0.88	–0.44	0.14	2.6
δS							0.08	0.01	0.1	0.1	0.11	0.1	–	0.15	0.05
Землетрясение 13 мая 2016 г.; $t_0=14^h 05^m 27.8^s$ (№ 2 в табл. 1)															
SIM	P	Z	42	0.4	–	3.2	35.6	0.73	4.04	13.5	0.71	9.5	–7.5	24.0	3.64
SIM	S	N+E	42	–	3.6	2.1	46.4	0.64	7.81	26.0	1.21	7.8	–3.35	60.4	3.71
YAL	P	Z	26	0.1	–	3.5	20.3	0.67	3.02	10.1	0.49	16.6	–15.0	10.2	3.47
YAL	S	N+E	26	–	1.55	2.0	20.6	0.67	3.00	10.0	0.49	16.3	–14.8	10.3	3.48
S							28.8	0.68	4.11	13.7	0.67	11.9	–9.85	19.75	3.58
δS							0.09	0.01	0.1	0.1	0.09	0.08	–	0.18	0.1
Землетрясение 15 мая 2016 г.; $t_0=17^h 14^m 02^s$ (№ 3 в табл. 1)															
ALU	S	N+E	104	–	0.11	3.6	3.23	0.39	2.23	7.7	0.22	0.6	0.57	1.25	2.9
Землетрясение 26 мая 2016; $t_0=16^h 49^m 33.9^s$ (№ 4 в табл. 1)															
ALU	S	N+E	143	–	0.2	2.5	7.88	0.54	2.1	–	0.28	7.8	–6.7	2.78	3.2
SIM	S	N	165	–	0.09	2.2	2.96	0.61	0.57	1.01	0.08	20.2	–19.9	0.28	2.9
SUDU	P	Z	97	0.02	–	5.0	4.1	0.47	1.78	5.9	0.2	19.6	–13.7	1.22	3.0
SUDU	S	N+E	97	–	0.2	2.55	7.84	0.53	2.36	7.86	0.3	7.6	–6.5	3.08	3.2
S							5.23	0.54	1.5	4.29	0.19	12.4	–11.7	1.31	3.1
δS							0.11	0.02	0.14	0.21	0.13	0.12	–	0.24	0.12

Код станции	Тип волны	Компонента	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	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta \sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta \sigma \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^8$, Дж	M_W^*
Землетрясение 17 июня 2016 г.; $t_0=18^h 04^m 07.4^s$ (№ 5 в табл. 1)															
SUDU	P	Z	19	0.06	–	4.5	5.31	0.55	1.43	4.75	0.19	1.0	–0.3	1.26	3.09
SUDU	S	N+E	19	–	0.22	3.0	3.72	0.47	1.55	5.16	0.18	1.44	–0.66	0.96	2.98
ALU	S	N+E	60	–	0.14	2.9	4.37	0.49	1.65	5.49	0.19	1.22	–0.4	1.2	3.03
S							4.42	0.5	1.54	5.12	0.19	1.21	–0.44	1.13	3.03
δS							0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.05	–	0.04	0.03
Землетрясение 28 июня 2016 г.; $t_0=04^h 23^m 48.1^s$ (№ 6 в табл. 1)															
ALU	S	N+E	335	–	0.32	2.3	312	0.73	35.8	59.7	3.15	4.3	13.6	932	4.27
SUDU	P	Z	384	0.025	–	3.6	321	0.85	23	38.4	2.37	4.18	7.34	617	4.27
SUDU	S	N+E	384	–	0.11	2.3	204	0.73	23.4	39.0	2.06	6.58	5.11	398	4.14
YAL	S	N+E	306	–	0.08	2.9	138	0.58	31.8	53	2.22	9.7	6.2	367	4.03
SIM	P	Z	343	0.02	–	3.8	121	0.8	10.2	17	0.99	11.1	–6.0	102	3.99
SIM	S	N+E	343	–	0.18	2.2	147	0.76	14.7	24.6	1.36	9.14	–1.78	180	4.05
SEV	S	N+E	286	–	0.08	3	134	0.70	17.5	29.1	1.47	10	–1.27	196	4.02
S							182.4	0.73	20.7	34.5	1.83	7.35	3	314.2	4.11
δS							0.07	0.02	0.07	0.07	0.06	0.07	–	0.13	0.1
Землетрясение 22 июля 2016 г.; $t_0=21^h 40^m 13.6^s$ (№ 7 в табл. 1)															
SUDU	P	Z	283	0.3	–	2.4	1050	1.02	42.6	142	10.6	3.61	17.7	7430	4.62
SUDU	S	N+E	283	–	1.4	1.6	657	0.88	41.5	138	8.91	5.75	15.0	4550	4.48
SIM	P	Z	298	0.045	–	2.85	405	0.86	27.6	92.0	5.77	9.4	4.46	1860	4.34
SIM	S	N+E	298	–	0.75	1.5	291	0.94	15.2	50.5	3.47	13	–0.54	735	4.25
SEV	P	Z	266	0.012	–	2.8	229	0.88	14.8	49.3	3.15	16.5	–0.91	564	4.18
SEV	S	N+E	266	–	0.17	2.0	155	0.71	19.1	63.6	3.28	24.4	–14.9	492	4.06
YAL	P	Z	248	0.02	–	2.85	146	0.86	10.0	33.2	2.08	25.9	20.9	242	4.05
YAL	S	N+E	248	–	0.38	2.15	159	0.66	24.4	81.2	3.89	23.8	–11.6	645	4.07
ALU	P	Z	264	0.03	–	2.9	299	0.85	21.5	71.6	4.41	12.6	–1.9	1070	4.25
ALU	S	N+E	264	–	1.35	1.75	470	0.81	38.9	130	7.62	8.04	11.4	3040	4.38
S							314.3	0.84	23.1	76.83	4.71	12.04	–0.49	1206	4.27
δS							0.09	0.02	0.07	0.07	0.07	0.09	–	0.15	0.15
Землетрясение 24 августа 2016 г.; $t_0=02^h 32^m 31.3^s$ (№ 8 в табл. 1)															
SEV	P	Z	59	0.028	–	5.2	3.76	0.45	1.84	6.12	0.2	0.5	0.4	1.15	2.99
SEV	S	N+E	59	–	0.08	3.3	2.05	0.41	1.34	4.47	0.13	0.92	–0.25	0.46	2.91
YAL	P	Z	61	0.006	–	5.3	0.83	0.44	0.43	1.44	0.06	2.27	–2.1	0.06	2.55
YAL	S	N+E	61	–	0.06	3.2	1.59	0.42	0.95	3.16	0.1	1.19	–0.7	0.25	2.74
S							1.79	0.43	1	3.34	0.11	1.1	–0.6	0.3	2.8
δS							0.14	0.01	0.14	0.14	0.11	0.14	–	0.27	0.15
Землетрясение 12 октября 2016 г.; $t_0=12^h 59^m 12.7^s$ (№ 9 в табл. 1)															
SEV	P	Z	63	0.004	–	5	0.55	0.47	0.24	0.08	0.03	3.36	–3.34	0.022	2.4
SEV	S	N+E	63	–	0.013	3.6	0.34	0.37	0.23	0.1	0.02	5.57	–5.4	0.016	2.3
S							0.43	0.41	0.23	0.09	0.02	4.33	–4.2	0.02	2.35
δS							0.1	0.05	0.01	0.05	0.09	0.11	–	0.07	0.05
Землетрясение 15 октября 2016 г.; $t_0=08^h 18^m 33.3^s$ (№ 10 в табл. 1)															
ALU	P	Z	413	0.5	–	2	1720	1.23	40.5	135	12.1	34.8	–14.5	11600	4.76
SEV	S	N+E	358	–	2.5	1.4	2310	1.01	98	326	24.0	25.9	23	37700	4.85
SIM	S	N+E	418	–	10.6	1.15	8970	1.23	211	702	62.9	6.7	98.7	315000	5.24
SUDU	P	Z	463	2.8	–	1.9	8700	1.29	176	586	55.2	6.9	81.7	255000	5.23
SUDU	S	N+E	463	–	4.74	1.2	7960	1.18	212	707	60.7	7.5	98.6	281000	5.2
S							4769	1.18	125.6	418.3	36.1	12.6	50.2	99740	5.06
δS							0.16	0.02	0.14	0.14	0.14	0.16	–	0.29	0.2
Землетрясение 3 ноября 2016 г.; $t_0=07^h 51^m 47.3^s$ (№ 11 в табл. 1)															
SEV	P	Z	32	0.0012	–	9	0.09	0.26	0.23	0.76	0.014	2.6	–2.5	0.003	1.91
SEV	S	N+E	32	–	0.015	4.5	0.18	0.28	0.36	1.19	0.024	1.31	–1.13	0.011	2.11
YAL	S	N+E	7	–	0.064	4.2	0.35	0.3	0.56	1.87	0.04	0.68	–0.4	0.033	2.3
S							0.18	0.28	0.36	1.19	0.02	1.32	–1.14	0.01	2.11
δS							0.17	0.02	0.11	0.11	0.13	0.17	–	0.3	0.13

Код станции	Тип волны	Компонента	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	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta \sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta \sigma \cdot 10^5$, Па	$E_0 \cdot 10^8$, Дж	M_W *
Землетрясение 27 января 2017 г.; $t_0=19^h 05^m 25.9^s$ (№ 12 в табл. 1)															
ALU	S	N+E	37	–	0.32	3.85	4.59	0.37	4.04	13.5	0.36	0.83	1.2	3.1	3.0
Землетрясение 16 июня 2017 г.; $t_0=18^h 17^m 34.8^s$ (№ 13 в табл. 1)															
ALU	S	E	185	–	1.8	1.5	185	0.89	11.7	37.7	2.45	3.64	2.02	349	4.12
SEV	P	Z	243	0.12	–	3.0	179	0.74	18.9	63	3.42	3.76	5.69	563	4.11
SEV-1	S	N+E	243	–	0.6	1.65	111	0.81	9.1	30.6	1.79	6.03	–1.48	169	3.97
SEV	S	N+E	243	–	0.8	1.6	149	0.84	11.0	36.8	2.25	4.52	1.0	274	4.05
SUDU	P	Z	139	0.18	–	2.4	169	0.93	9.18	30.6	2.07	3.97	0.62	259	4.09
YAL	P	Z	206	0.1	–	2.46	125	0.91	7.32	24.4	1.61	5.36	–1.7	153	4.0
YAL	S	N+E	206	–	0.72	1.6	125	0.84	9.32	31.1	1.89	5.36	–0.7	195	4.0
SIM	P	Z	208	0.12	–	2.4	177	0.93	9.58	31.9	2.16	3.8	0.1	282	4.11
SIM	S	N+E	208	–	0.71	1.6	117	0.84	8.7	29.0	1.77	5.74	–1.39	170	3.98
S							150	0.86	10.4	34.44	2.15	4.48	0.72	258.32	4.05
δS							0.03	0.01	0.04	0.04	0.04	0.03	–	0.06	0.05
Землетрясение 5 июля 2017 г.; $t_0=20^h 12^m 41.4^s$ (№ 14 в табл. 1)															
ALU	P	Z	94	0.02	–	3.3	4.85	0.85	0.35	0.87	0.05	5.84	–5.67	0.21	3.06
ALU	S	N+E	94	–	0.8	2.25	29.4	0.66	4.43	11.1	0.54	0.96	1.25	16.3	3.58
SEV	S	N+E	84	–	0.11	2.18	5.64	0.68	0.77	1.93	0.1	5.02	–4.63	0.55	3.10
SUDU	P	Z	133	0.05	–	3.5	25.4	0.8	2.18	5.46	0.32	1.12	–0.03	6.92	3.54
SUDU	S	N+E	133	–	0.29	2.2	22.3	0.68	3.15	7.86	0.39	1.27	0.30	8.78	3.5
YAL	S	N+E	70	–	0.34	2.3	11.1	0.65	1.78	4.45	0.21	2.56	–1.67	2.46	3.3
S							13.1	0.72	1.56	3.91	0.2	2.16	–1.38	2.56	3.34
δS							0.14	0.02	0.17	0.17	0.16	0.14	–	0.3	0.19
Землетрясение 9 июля 2017 г.; $t_0=20^h 37^m 12.1^s$ (№ 15 в табл. 1)															
ALU	S	N+E	46	–	0.03	3.6	0.61	0.37	0.52	1.73	0.05	0.27	–0.015	0.053	2.46
SUDU	S	N	30	–	0.05	3.8	0.76	0.35	0.76	2.53	0.065	0.22	0.15	0.096	2.52
S							0.68	0.36	0.63	2.1	0.06	0.24	0.08	0.07	2.49
δS							0.05	0.01	0.08	0.08	0.06	0.04	–	0.13	0.03
Землетрясение 13 июля 2017 г.; $t_0=12^h 49^m 38.7^s$ (№ 16 в табл. 1)															
SEV	S	N+E	104	–	0.012	3.1	0.35	0.38	0.27	0.88	0.025	2.75	–2.62	0.015	2.3
SUDU	S	N+E	203	–	0.015	3.15	0.84	0.32	0.68	2.26	0.062	1.13	–0.79	0.095	2.55
S							0.54	0.35	0.43	1.41	0.04	1.76	–1.55	0.04	2.42
δS							0.19	0.04	0.2	0.2	0.2	0.19	–	0.4	0.12
Землетрясение 8 августа 2017 г.; $t_0=04^h 08^m 50.5^s$ (№ 17 в табл. 1)															
ALU	S	N+E	187	–	0.45	2.2	32.9	0.61	6.36	21.2	0.94	2.57	0.61	34.9	3.61
SEV	P	Z	245	0.02	–	4.0	10.0	0.58	2.23	7.42	0.31	8.44	–7.32	3.72	3.27
SEV	S	N+E	245	–	0.14	2.3	13.4	0.58	2.96	9.87	0.42	6.31	–4.83	6.62	3.35
SIM	P	Z	211	0.025	–	3.1	10.8	0.75	1.12	3.73	0.2	7.81	–7.25	2.02	3.29
SIM	S	N+E	211	–	0.14	2.1	11.6	0.64	1.95	6.49	0.3	7.3	–6.3	3.76	3.31
SUDU	P	Z	141	0.02	–	4.0	5.79	0.58	1.28	4.28	0.18	14.6	–14.0	1.24	3.11
SUDU	S	N+E	141	–	0.4	2.2	22.1	0.61	4.27	14.2	0.63	3.82	–1.69	15.8	3.5
YAL	S	N+E	208	–	0.09	2.9	9.77	0.46	4.33	14.4	0.48	8.66	–6.5	7.04	3.26
S							12.73	0.6	2.61	8.7	0.38	6.64	–5.34	5.55	3.34
δS							0.08	0.02	0.09	0.09	0.09	0.08	–	0.17	0.11
Землетрясение 8 августа 2017 г.; $t_0=05^h 32^m 20.3^s$ (№ 18 в табл. 1)															
ALU	S	N+E	188	–	0.5	2.8	31.0	0.45	14.7	48.9	1.61	5.44	1.89	75.7	3.6
SEV	P	Z	245	0.03	–	3.95	13.4	0.57	3.23	10.8	0.44	12.6	–11.0	7.19	3.35
SEV	S	N+E	245	–	0.16	3.0	13.0	0.42	7.54	25.1	0.77	13.0	–9.24	16.3	3.35
SIM	S	N+E	214	–	0.16	2.75	11.3	0.46	5.08	16.9	0.57	14.9	–12.4	9.58	3.31
SUDU	P	Z	144	0.05	–	4.05	13.1	0.55	3.41	11.4	0.46	12.9	–11.2	7.45	3.35
SUDU	S	N+E	144	–	0.43	2.8	20.5	0.45	9.7	32.3	1.06	8.23	–3.38	33.1	3.48
YAL	P	Z	208	0.02	–	4.04	7.54	0.55	1.96	6.54	0.26	22.4	–21.4	2.47	3.19
YAL	S	N+E	208	–	0.15	3.0	10.3	0.42	5.99	20.0	0.61	16.4	–13.4	10.6	3.28
S							13.74	0.48	5.38	17.95	0.63	12.28	–9.59	12.37	3.36
δS							0.07	0.02	0.1	0.1	0.09	0.07	–	0.16	0.06

Код станции	Тип волны	Компонента	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	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$Eu \cdot 10^8$, Дж	M_w *
Землетрясение 30 августа 2017 г.; $t_0=20^h 24^m 40.9^s$ (№ 19 в табл. 1)															
ALU	P	Z	75	0.0012	–	5.8	0.19	0.4	0.13	0.43	0.13	9.9	–9.8	0.04	2.12
ALU	S	N+E	75	–	0.07	3.1	1.42	0.43	0.77	2.56	0.08	1.33	–0.95	0.18	2.7
SIM	S	N+E	44	–	0.09	3.05	1.2	0.44	0.62	2.06	0.07	1.58	–1.27	0.12	2.66
S							0.55	0.42	0.3	1.05	0.03	1.12	0.68	0.42	0.4
δS							0.32	0.01	0.3	0.29	0.27	0.6	0.28	0.01	0.24
Землетрясение 2 октября 2017 г.; $t_0=13^h 58^m 34.0^s$ (№ 20 в табл. 1)															
ALU	P	Z	245	0.01	–	3.0	12.1	0.82	0.96	3.2	0.19	4.96	–4.48	1.93	3.33
YAL	S	N	244	–	0.056	2.3	12.9	0.62	2.42	8.08	0.36	4.64	–3.43	5.21	3.34
SUDU	S	N+E	236	–	0.18	2.0	39.8	0.71	4.92	16.4	0.84	1.5	0.95	32.6	3.67
SIM	S	N+E	282	–	0.085	2.1	22.5	0.67	3.21	10.7	0.53	2.67	–1.06	12.0	3.5
S							19.34	0.7	2.46	8.21	0.42	3.1	–1.87	7.92	3.46
δS							0.12	0.03	0.15	0.15	0.14	0.12	–	0.26	0.15
Землетрясение 12 ноября 2017 г.; $t_0=12^h 58^m 29.2^s$ (№ 21 в табл. 1)															
ALU	S	N+E	168	–	0.71	2.1	32.8	0.57	7.85	26.2	1.08	2.58	1.34	42.9	3.61
SEV	S	N+E	115	–	0.56	2.3	18.1	0.52	5.7	19.0	0.72	4.87	–1.95	17.2	3.44
SIM	S	N+E	144	–	0.7	1.9	28.0	0.63	4.97	16.6	0.76	3.02	–0.5	23.2	3.57
SUDU	P	Z	213	0.1	–	3.3	38.7	0.68	5.45	18.2	0.89	2.19	0.5	35.2	3.66
SUDU	S	N+E	213	–	0.7	1.9	28.0	0.63	4.97	16.6	0.76	3.02	–0.53	23.2	3.57
S							28.26	0.06	5.7	19.03	0.83	3.02	–0.17	26.86	3.57
δS							0.05	0.02	0.04	0.04	0.03	0.06	–	0.07	0.15

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

Обсуждение результатов. Для большинства землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. получено удовлетворительное согласие между собой индивидуальных станционных определений динамических параметров очагов при стандартном отклонении менее $\delta S \leq 0.1$ (табл. 4). Наилучшая сходимость станционных определений получена для радиуса круговой дислокации r_0 с преобладанием значений $\delta r_0 = 0.01 \div 0.05$. Уверенно определены средние значения моментных магнитуд M_w с погрешностью не выше ± 0.2 , с преобладанием $\delta M_w = \pm 0.1$. Хорошее согласие результатов по группе станций ($\delta S < 0.1$) отмечено для очаговых параметров землетрясений с известным механизмом очагов (№ 2, 6, 7, 13).

Наибольшие значения динамических параметров (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, \bar{u} , Eu и M_w) получены для наиболее сильного землетрясения 15 октября (№ 10) с $K_{II}=13.1$, произошедшего в районе Черноморской впадины на глубине $h=18$ км, а наименьшие – для слабого сейсмического события 3 ноября (№ 11) с $K_{II}=6.7$ из Ялтинского района.

Как и в предыдущие годы [8, 9], проведено сравнение полученных в 2016–2017 гг. динамических параметров очагов землетрясений (сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0) со средними их долговременными величинами (рис. 6).

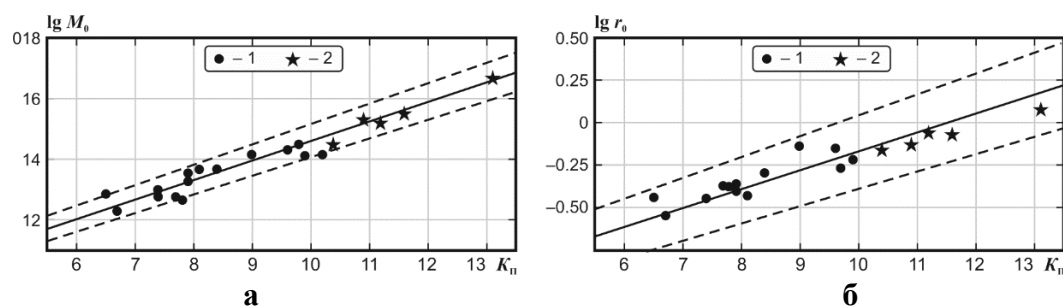


Рис. 6. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений за 2016–2017 гг. – сейсмического момента M_0 (а) и радиуса круговой дислокации r_0 (б) – с таковыми согласно долговременным зависимостям $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$ из [16]

1 – экспериментальные значения за 2016–2017 гг.; 2 – значения для землетрясений с известными механизмами очагов; пунктиром обозначены пределы погрешностей уравнений 2 и 3.

Для сравнения использованы зависимости $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$, установленные для Крыма по экспериментальным данным за период 1955–2008 гг. по аналоговым записям [16]:

$$\lg M_0 = 0.645(\pm 0.027) \cdot K_{II} + 15.142(\pm 0.271), \rho = 0.99. \quad (2)$$

$$\lg r_0 = 0.112(\pm 0.011) \cdot K_{II} - 1.293(\pm 0.107), \rho = 0.93, \quad (3)$$

где ρ – коэффициент корреляции.

Из рис. 6 видно, что средние значения динамических параметров M_0 и r_0 землетрясений 2016–2017 гг. находятся в пределах доверительных областей долговременных зависимостей $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$. При этом значения r_0 наиболее сильных сейсмических толчков с $K_{II} > 10$ расположены несколько ниже относительно линии долговременной регрессии $r_0(K_{II})$. Наилучшее соответствие сейсмического момента долговременным его значениям (рис. 6 а) получено для землетрясений 28 июня, 22 июля, 15 октября 2016 г. и 16 июня 2017 г., для которых в расчеты M_0 введены поправки за реальную направленность излучения, исходя из решения механизма очагов.

Спектральные свойства очагов землетрясений 2016 г. дополнительно были изучены по энергетическим спектрам [17]. Отмечено, что значения плотности сейсмической энергии q_{max} по всем станциям и разным составляющим записи находились в сравнительно ограниченном диапазоне частот: $\delta f = 1 \div 6$ Гц с преобладанием максимальных значений q_{max} вблизи 3 Гц.

Закключение. В целом полученные новые данные об очаговых параметрах землетрясений Крымско-Черноморского региона за период 2016–2017 гг. относятся к категории надежных с преобладанием стандартных отклонений менее $\delta S \leq 0.1$, поскольку получены по волновым формам записей как P -, так и S -волн на группе региональных станций, расположенных на скальных грунтах с надежными амплитудно-частотными и фазовыми характеристиками сейсмографов. Использование для расчетов в большинстве случаев от трех до десяти индивидуальных станционных определений позволило нивелировать влияние индивидуальных особенностей среды на пути распространения сейсмических волн и локальных условий под станциями регистрации, а также снизить ошибки за счет неравномерной направленности излучения из очага. Только для пяти наиболее сильных землетрясений в расчет сейсмического момента введена реальная поправка за направленность излучения по результатам решения механизма очагов, что обеспечило малую величину стандартного отклонения δS для всех динамических параметров этих землетрясений. Количественные оценки очаговых параметров (данные о механизме очагов и динамических параметров) землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. дополнили специализированную базу данных по Крыму для дальнейшего ее использования в научных и научно-прикладных задачах сейсмологии, региональной геотектоники и геодинамики.

Л и т е р а т у р а

1. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-25.html>
2. Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А., Бондарь М.Н. Сейсмичность Крымско-Черноморского региона в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – С. 46–55. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.03 EDN: PNZYRD
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. (отв. сост.) Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 гг.). – [Электронное приложение]. – URL: <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-25.html>
5. International Seismological Centre. (2022). 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. 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.

8. 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: 10.35540/1818-62-54.2020.23.25
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. 226–236. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.22
10. 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.
11. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
12. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры P -волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканонология и сейсмология. – 1989. – № 2. – С. 66–79.
13. 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 // Вулканонология и сейсмология. – 1985. – № 2. – С. 60–70.
14. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
15. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // Journal of Geophysical Research. – 1979. – V. 84, N B5. – P. 2348–2350.
16. 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.
17. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016 год // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2017. – Т. 3(69), № 4. – С. 51–69.

**FOCAL PARAMETERS of CRIMEAN-BLACK SEA
REGION EARTHQUAKES in 2016–2017**

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

¹State Autonomous Institution “Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities”, Simferopol, Russia, bpustovitenko@mail.ru

²Institute of Seismology and Geodynamics of the Federal State Autonomous educational institution “V.I. Vernadsky Crimean Federal University”, Simferopol, Russia

Abstract. Focal parameters of twenty-one 2016–2017 earthquakes of the Crimean-Black sea region with $K_{II}=6.5–13.1$ have been recovered. Solutions of focal mechanisms have been obtained for the four strongest earthquakes. The dynamic source parameters – scalar seismic moment M_0 , the radius of circular dislocation r_0 , released stress $\Delta\sigma$, shear deformation ε , apparent stress $\eta\sigma$, radiation friction $\Delta\sigma_r$, average slip along fault \bar{u} , energy of dislocation formation in the source E_U , moment magnitude M_w – have been restored for twenty-one earthquakes by 149 amplitude spectra using Brune theoretical dislocation model. The type of slip in the source of May 13, 2016, felt an earthquake, which happened near the southern coast of Crimea, is a strike-slip. The June 28, July 22 and October 15, 2016 earthquakes occurred in the Black sea basin under the action of horizontal compressive stress, the type of slip in the source is a reverse fault. In the source of the June 16, 2017 earthquake, a thrust of active rupture wing occurred under the action of horizontal compression stress of the meridional direction. This type of movement is typical for earthquakes in the eastern part of the Crimean-Black Sea region. The mechanism parameters of these earthquakes were used to determine the direction of the source radiation to the recording station to account for relevant amendments in the calculation of the seismic moment M_0 . In general, average values of M_0 and r_0 for 2016–2017 earthquakes were within the confidence intervals of long-term dependencies $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$. The best correspondence of seismic moment values to the long-term dependencies was obtained for the earthquakes of the June 28, July 22, October 15, 2016 and June 16, 2017, with known focal mechanisms because the corrections for real radiation direction $R_{\theta\phi}$ were introduced in the formula for M_0 calculation. For reliable estimates of the spectral and dynamic source parameters of the 2016–2017 Crimean earthquakes, only very clear records of body waves at seismic stations with reliable characteristics of recording equipment were used. The averaging of the source dynamic parameters was done by 2–10 station definitions, which provided a small value of standard deviations. In this regard, quantitative estimates of focal parameters can be classified as reliable for further use for scientific and scientific-applied problems, in particular, for the development of geodynamic models.

Keywords: focal mechanism, amplitude spectrum, Brune model, spectral density, corner frequency, seismic moment, dislocation radius, apparent stress drop, radiation friction.

DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22 **EDN:** DMTVLR

For citation: Pustovitenko, B.G., Eredzhepov, E.E., & Bondar, M.N. (2022). [Focal parameters of the Crimean-Black Sea region earthquakes in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 242–252. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22. EDN: DMTVLR

References

1. Kozinenko, N.M., Svidlova, V.A., & Sykchina, Z.N. (2022). [Catalog of the earthquakes of the Crimean-Black Sea region in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-25.html> (In Russ.).
2. Pustovitenko, B.G., Svidlova, V.A., & Bondar, M.N. (2022). [Seismicity of the Crimean-Black Sea region in 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017), 46–55. (In Russ.). DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.03 EDN: PNZYRD
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, Vol. 2] (pp. 113–125). Moscow, Russia: IFZ AN SSSR Publ. (In Russ.).
4. Pustovitenko, B.G. (2022). [Catalog of focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2016–2017]. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 25(2016–2017). Electronic supplement. Retrieved from <http://www.ceme.gsras.ru/zse/app-25.html> (In Russ.).
5. International Seismological Centre. (2022). 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.
7. Volfman, Iu.M., Pustovitenko, B.G., Kolesnikova, E.Ia., & 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. Geologiya* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology], 2(68), 4, 7–50. (In Russ.).
8. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2020). [Spectral and focal parameters earthquakes in the Crimean-Black Sea region] *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 23(2014), 250–262. doi: 10.35540/1818-62-54.2020.23.25 (In Russ.).
9. 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), 226–236. doi: 10.35540/1818-6254.2021.24.22 (In Russ.).
10. Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997–5009.
11. 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.
12. Aptekman, Zh.Ja., Belavina, Ju.F., Zaharova, A.I., Zobin, V.M., Kogan, S.Ja., 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.).
13. Aptekman, Zh.Ja., Daragan, S.K., Dolgoplov, V.V., Zaharova, A.I., Zobin, V.M., Kogan, S.Ja., 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.).
14. Kostrov, B.V. (1975). *Mehanika ochaga tektonicheskogo zemletrjasenija* [Tectonic earthquake source mechanics]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 179 p.
15. Hanks, T.C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348–2350.
16. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., Kapitanova, S.A., & Porechnova, E.I. (2008). [Spatial features of focal parameters of earthquakes in the Crimea]. In *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii. Seismichnost' Severnoi Evrazii* [Proceedings of the international conference. Seismicity in Northern Eurasia] (pp. 238–242). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
17. Pustovitenko, B.G., & Eredzhepov, E.E. (2017). [Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region for 2016]. *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiia. Geologiya* [Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology], 3(69), 4, 51–69. (In Russ.).