

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Б.Г. Пустовитенко, И.В. Калинюк, Е.А. Мерзей

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

Динамические параметры очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2010 г. восстановлены по параметрам амплитудных спектров объемных волн, зарегистрированных региональными цифровыми сейсмическими станциями Крыма. Для расчета спектров использованы сейсмограммы шести станций: «Судак»-SUDU, «Севастополь»-SEV, «Симферополь»-SIM, «Алушта»-ALU, «Феодосия»-FEO и «Ялта»-YAL.

На рис. 1 для примера приведены четыре из шести АЧХ, нормированные по максимальному уровню увеличения на единицу ($k=1$), для которых в 2010 г. надежно определены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) цифровых сейсмических станций (ЦСС). Калибровочные кривые ЦСС «Ялта» и «Феодосия» близки по форме, соответственно, к калибровочным кривым «Симферополь» и «Алушта» в связи с установленной на них идентичной аппаратурой.

Для определения спектральных параметров землетрясений деконволюция волновых форм проводилась в программе WSG с использованием калибровочных кривых в формате PAZ.

Для анализа выбраны волновые формы только с четкими фазами продольных P - и поперечных S -волн, не осложненные микросейсмическим шумом. Всего отобрано 67 сейсмограмм девятнадцати землетрясений с энергетическими классами $K_{II}=7.6-10.2$ (табл. 1), произошедших в различных частях региона на расстояниях от 14 до 300 км относительно станций регистрации (рис. 2). Основные параметры изученных землетрясений приведены из каталога землетрясений [1].

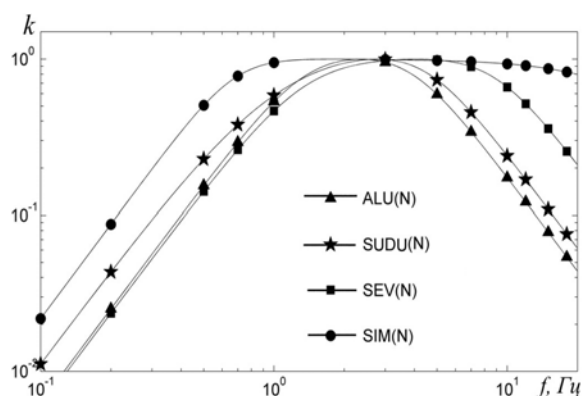


Рис. 1. Примеры амплитудно-частотных характеристик сейсмографов в 2010 г.

Таблица 1. Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2010 г., для которых рассчитаны динамические параметры очагов

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда		K_{II}	Район
			φ° , N	λ° , E		Mc	Mw/n		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	09.01	05 50 12.7	44.98	36.43	26		2.6/1	8.1	Керченско-Анапский (№ 5)
2	21.01	08 00 25.8	44.78	34.43	16	2.3	2.9/2	8.4	Алуштинский (№ 3)
3	31.03	08 46 46.0	44.62	34.55	17	2.1	2.7/1	7.7	Алуштинский (№ 3)
4	15.04	20 13 44.8	44.58	34.50	21	1.7	2.5/1	8.1	Алуштинский (№ 3)
5	20.05	06 25 45.0	44.65	37.25	23		3.2/2	9.0	Керченско-Анапский (№ 5)
6	20.06	00 04 55.9	44.70	36.70	8		2.8/2	8.1	Керченско-Анапский (№ 5)
7	24.07	18 51 33.6	44.32	33.17	39	2.6	2.9/2	8.7	Севастопольский (№ 1)
8	24.07	18 55 45.9	44.22	33.22	28	2.8	3.6/6	10.2	Севастопольский (№ 1)
9	25.07	16 10 51.6	44.22	33.22	31	2.3	3.2/5	9.1	Севастопольский (№ 1)

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда		K_{Π}	Район
			φ° , N	λ° , E		M_s	M_w/n		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	07.08	10 50 45.0	44.51	36.95	11		2.7/2	8.7	Керченско-Анапский (№ 5)
11	09.08	18 12 45.7	46.82	36.25	9		3.3/2	8.7	Азово-Кубанский (№ 7)
12	21.09	07 32 39.1	43.47	35.23	21	2.4	3.1/3	9.5	Черноморская впадина (№ 9)
13	18.10	02 09 09.8	44.66	36.43	11	2.6	2.9/5	9.1	Керченско-Анапский (№ 5)
14	02.11	08 18 42.2	44.69	36.51	11		2.7/2	8.1	Керченско-Анапский (№ 5)
15	06.11	10 49 24.0	43.89	34.08	33		2.8/2	8.5	Ялтинский (№ 2)
16	08.11	11 52 35.3	43.87	34.03	35	2.8	3.6/6	9.7	Ялтинский (№ 2)
17	08.11	16 10 00.2	43.90	34.02	35		3.2/5	8.6	Ялтинский (№ 2)
18	19.11	01 18 17.6	45.36	32.71	9		3.0/1	7.6	Степной Крым (№ 6)
19	30.12	23 22 52.1	42.28	35.97	23		3.3/2	8.6	Черноморская впадина (№ 9)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9,10 соответствуют таковым в [1]; значения региональной моментной магнитуды M_w/n – из табл. 2.

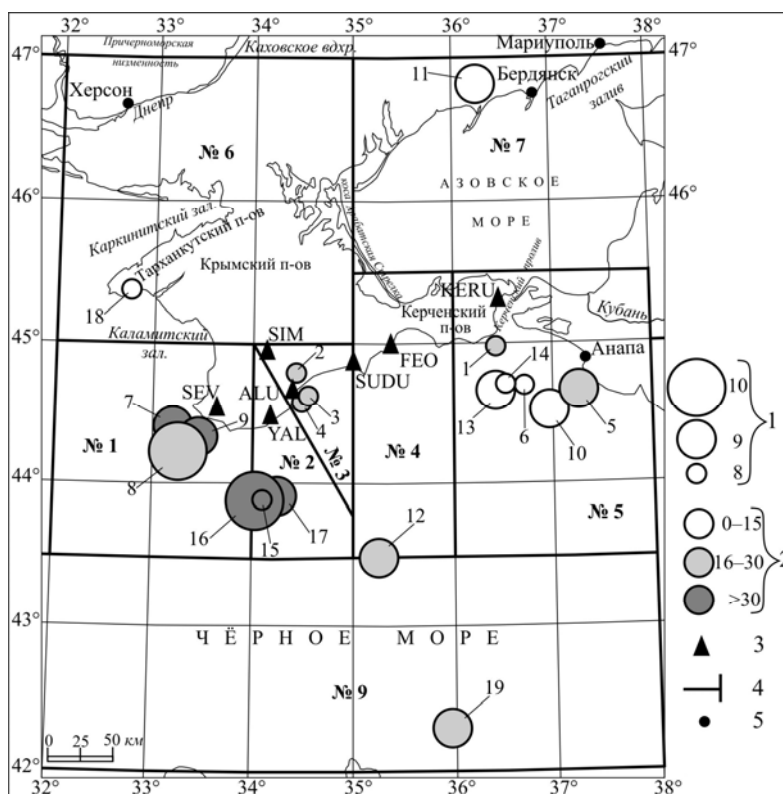


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2010 г., для которых определены динамические параметры очагов

1 – энергетический класс K_{Π} [2]; 2 – глубина очага h , км; 3 – сейсмическая станция; 4 – граница районов; 5 – крупный населенный пункт.

Наибольшее число пригодных для обработки сейсмограмм получено для шести землетрясений Керченско-Анапского района № 5, по три – для Севастопольского № 1, Ялтинского № 2 и Алуштинского № 3 районов (рис. 3 а).

Для сравнительно слабоактивного северного побережья Азовского моря в Азовско-Кубанском районе № 7 пригодными для расчета спектров оказались только две записи S -волн по станциям «Судак» и «Алушта» для землетрясения с $K_{\Pi}=8.7$, произошедшего 9 августа в 18^h12^m вблизи очаговой зоны 5-балльного Бердянского (Осипенковского) землетрясения 31.07.2006 г. г. [3, 4], с $M_{w,рег}=3.3$ [5].

Впервые восстановлены очаговые параметры в слабоактивном районе Степного Крыма № 6, на полуострове Тарханкутский (рис. 1), для относительно слабого ($K_{\Pi}=7.6$) землетрясения,

произошедшего 19 января в 01^h18^m (табл. 1). Его спектр построен по записям ближайшей к очагу сейсмической станции «Севастополь».

Наибольшее число спектров рассчитано по волновым формам *P*- и *S*-волн на станции «Судак» (рис. 3 б), соответственно с участием этой станции восстановлены динамические параметры очагов 14 землетрясений из 19, что составляет ~74% от их общего числа, в то время как сейсмограммы станции «Феодосия» привлечены для анализа только в шести случаях (31%).

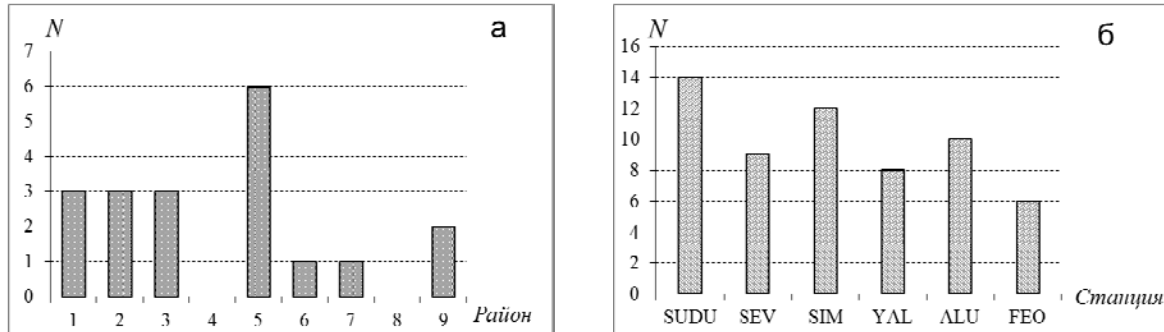


Рис. 3. Распределение числа изученных землетрясений по районам региона (а) и числа спектров *P*- и *S*-волн по записям отдельных сейсмических станций (б)

Максимальное число записей как поперечных, так и продольных волн (табл. 2) использовано для оценки динамических параметров наиболее сильного ($K_{II}=10.2$) землетрясения 24 июля в 18^h55^m45.9^s (район № 1). Пример записи этого землетрясения на станции «Симферополь» приведен на рис. 4.

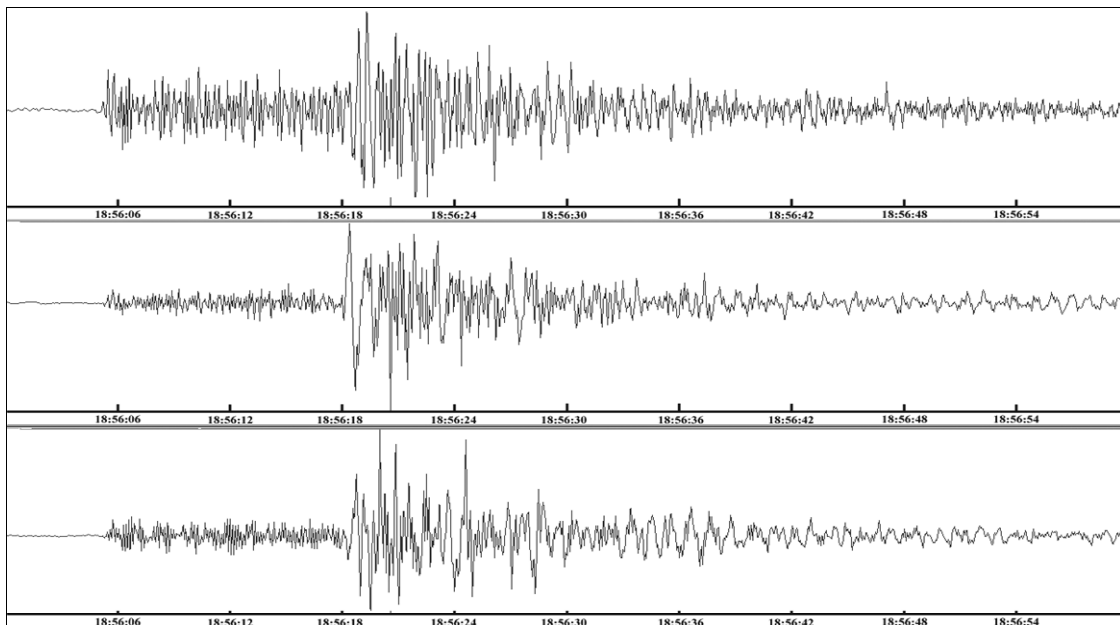
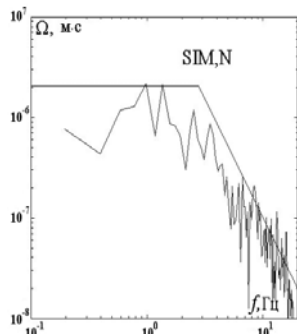


Рис. 4. Пример цифровой записи землетрясения 24 июля в 18^h55^m45.9^s, с $K_{II}=10.2$ по длиннопериодным каналам ВН на сейсмической станции «Симферополь» с $\Delta=108$ км

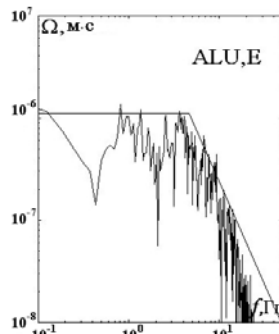
Методика расчета спектров и их аппроксимация не изменились по сравнению с таковыми в 2009 г. [6]. Амплитудные спектры записей землетрясений получены методом быстрого преобразования Фурье с учетом АЧХ сейсмографов.

Там, где условия отбора позволяли, спектры рассчитывались как по горизонтальным составляющим (N-S), (E-W), так и по вертикальной – Z. Длительность исследуемого участка принята равной интервалу времени от вступления *S*- и *P*-волн до времени спада максимальных колебаний A_{max} на уровень $\frac{1}{3}A_{max}$ [7].

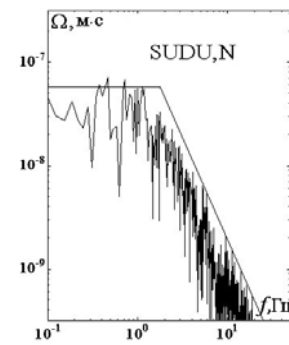
Как видно из рис. 5, все рассчитанные спектры удовлетворительно описываются в рамках дислокационной модели Бруна [8].



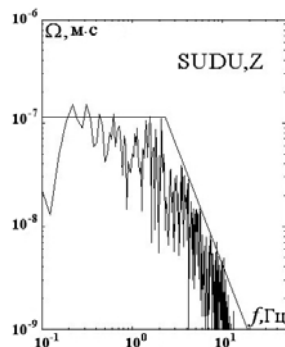
21 января в 08^h00^m25.8^s (№ 2 в табл. 1)



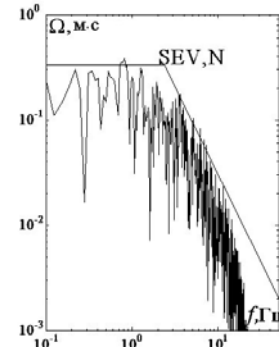
15 апреля в $t_0=20^h13^m44.8^s$ (№ 4)



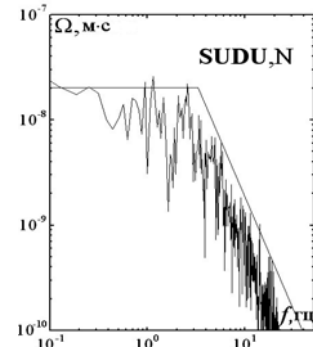
20 мая в $t_0=06^h25^m45.0^s$ (№ 5)



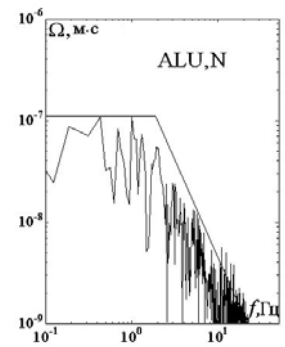
24 июля в 18^h55^m45.9^s (№ 8)



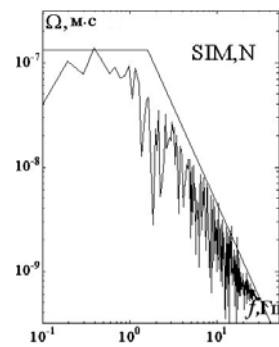
25 июля в 16^h10^m51.6^s (№ 9)



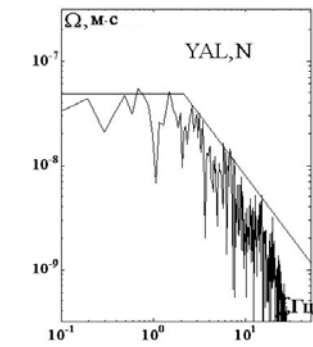
7 августа в 10^h50^m45.0^s (№ 10)



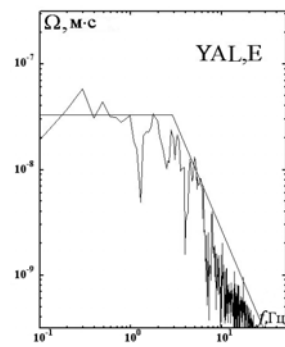
9 августа в 18^h12^m45.7^s (№ 11)



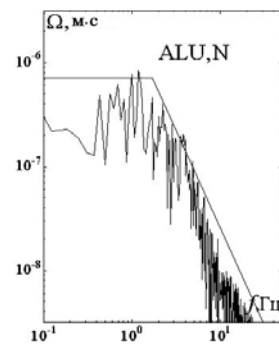
21 сентября в 07^h32^m39.1^s (№ 12)



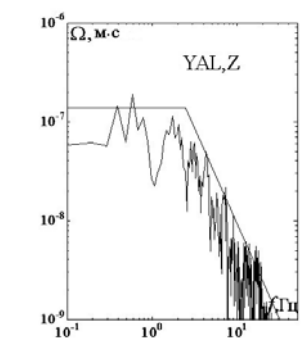
18 октября в 02^h09^m09.8^s (№ 13)



6 ноября в 10^h49^m24.0^s (№ 15)



8 ноября в 11^h52^m35.3^s (№ 16)



8 ноября в 16^h10^m00.2^s (№ 17)

Рис. 5. Примеры амплитудных спектров землетрясений Крыма за 2010 г. по записям цифровых сейсмических станций (номера землетрясений из табл. 1)

Следуя модели Брюна, спектр смещения объемной волны можно описать с помощью трех основных характеристик: спектральной плотности $\Omega_0(x, f)$ при $f \rightarrow 0$, угла γ наклона огибающей спектра и угловой частоты f_0 (ω_0). Спектральная плотность $\Omega_0(x, f)$ и угловая частота f_0 явля-

ются главными исходными параметрами для расчета скалярного момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 .

Формула для расчета M_0 по стационарному спектру имеет вид:

$$M_0 = \Omega_0 (4\pi \cdot \rho \cdot v^3) / R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega) \cdot Sm(f), \quad (1)$$

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; ρ – плотность пород в окрестности очага; v – скорость распространения волны; $R_{\theta\phi}$ – направленность излучения из очага на станцию; $G(\Delta, h)$ – поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ – частотная характеристика среды под станцией; $Sm(f)$ – поправка за неупругое затухание в мантии.

Методика учета всех этих факторов при переходе от стационарного спектра к спектру источника подробно изложена в [7–10]. Геометрические размеры очага r_0 определялись по угловой частоте f_0 амплитудного спектра смещения. Для дислокационной модели Брюна с разрывом в виде круга радиус дислокации r_0 вычисляется по формуле:

$$r_0 = 2.34 \frac{v_p}{2\pi \cdot f_0}. \quad (2)$$

По найденным региональным значениям сейсмического момента M_0 и размерам разрыва r_0 с использованием формул из работ [7–10] определены другие динамические параметры очагов: сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ϵ , средняя подвижка или величина дислокации по разрыву u и региональная моментная магнитуда Mw (табл. 2). Моментная магнитуда рассчитана по стационарным оценкам сейсмических моментов с использованием формул Канамори [11]:

$$Mw = 2/3 \cdot \lg M_0 - 10.7, \quad (3)$$

$$Mw = 2/3 \cdot (\lg M_0 + 7) - 10.7, \quad (4)$$

где M_0 имеет размерность *дин·см* и *Н·м* в системах СГС и СИ соответственно.

При расчете динамических параметров очагов по спектрам записи поперечных *S*-волн использован полный вектор колебаний по составляющим N-S и E-W (в табл. 2 указано как N+E), а по продольным *P*-волнам – спектр записи вертикальной составляющей *Z*. Средние значения *S* всех динамических параметров и их стандартное отклонение δS найдены с учетом лог-нормального закона распределения величин [7]. Среднее значение моментной магнитуды Mw определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью (табл. 2). Для четырех землетрясений (№№ 1, 3, 4, 18) приведены значения только по одной станции.

Динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2010 г. получены с незначительными вариациями стационарных значений и преимущественно с малыми стандартными отклонениями относительно средних величин (табл. 2), что позволяет отнести их к категории надежных. В большинстве случаев индивидуальные значения магнитуд Mw либо полностью совпали, либо их разброс не превысил погрешности ± 0.1 . Наибольший разброс в стационарных значениях Mw получен для землетрясений № 6 и № 14 с использованием записей сейсмической станции «Феодосия», которая находится в худших, по сравнению с другими станциями, инженерно-геологических условиях. В большинстве случаев эта станция дала заниженные значения сейсмического момента и, соответственно, заниженные Mw (табл. 2).

Таблица 2. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2010 г.

Станция	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	Mw	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\epsilon \cdot 10^{-6}$	$u \cdot 10^{-2}$, м
Землетрясение (1) 9 января: $t_0=05^h50^m12.7^s$, $\varphi=44.98^\circ$, $\lambda=36.43^\circ$, $h=26$ км, $K_{II}=8.1$										
Судак	N+E	114	0.028	2.5	1.0	2.6	0.55	0.27	0.9	3.6
Землетрясение (2) 21 января: $t_0=08^h00^m25.8^s$, $\varphi=44.78^\circ$, $\lambda=34.43^\circ$, $h=16$ км, $K_{II}=8.4$										
Судак	N	39	0.15	2.8	2.74	2.9	0.48	1.09	3.64	12.7
Симферополь	N	46	0.32	2.8	1.95	2.8	0.48	0.78	2.59	9.0
S					2.31	2.85	0.48	0.92	3.07	10.69
δS					0.07	0.05	0	0.07	0.07	0.07

Станция	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	M_w	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$u \cdot 10^{-2}$, м
Землетрясение (3) 31 марта: $t_0=08^h46^m46.0^s$, $\varphi=44.62^\circ$, $\lambda=34.55^\circ$, $h=17$ км, $K_{II}=7.7$										
Судак	N	46	0.1	2.5	1.23	2.67	0.51	0.41	1.38	5.1
Землетрясение (4) 15 апреля: $t_0=20^h13^m44.8^s$, $\varphi=44.58^\circ$, $\lambda=34.50^\circ$, $h=21$ км, $K_{II}=8.1$										
Алушта	N+E	14	0.24	3.2	0.72	2.5	0.42	0.43	1.44	4.4
Землетрясение (5) 20 мая: $t_0=06^h25^m45.0^s$, $\varphi=44.65^\circ$, $\lambda=37.25^\circ$, $h=23$ км, $K_{II}=9.0$										
Севастополь	N	283	0.063	1.5	7.05	3.18	0.89	0.43	1.44	9.4
Судак	N	180	0.082	1.5	5.85	3.12	0.89	0.36	1.2	7.8
S					6.42	3.15	0.89	0.39	1.31	8.56
δS					0.04	0.03	0	0.04	0.04	0.04
Землетрясение (6) 20 июня: $t_0=00^h04^m55.9^s$, $\varphi=44.70^\circ$, $\lambda=36.70^\circ$, $h=8$ км, $K_{II}=8.1$										
Феодосия	N	109	0.06	1.5	0.88	2.57	0.84	0.06	0.21	1.3
Севастополь	N	239	0.09	1.3	5.73	3.11	0.97	0.27	0.09	6.4
S					2.25	2.84	0.9	0.13	0.14	2.88
δS					0.41	0.27	0.03	0.33	0.18	0.35
Землетрясение (7) 24 июля: $t_0=18^h51^m33.6^s$, $\varphi=44.32^\circ$, $\lambda=33.17^\circ$, $h=39$ км, $K_{II}=8.7$										
Алушта	N+E	106	0.13	2.5	2.9	2.9	0.54	0.82	2.74	10.7
Симферополь	N+E	102	0.21	2.4	3.4	2.96	0.56	0.85	2.84	11.6
S					3.14	2.93	0.55	0.835	2.79	11.14
δS					0.03	0.03	0.008	0.008	0.008	0.02
Землетрясение (8) 24 июля: $t_0=18^h55^m45.9^s$, $\varphi=44.22^\circ$, $\lambda=33.22^\circ$, $h=28$ км, $K_{II}=10.2$										
Судак	Z	159	0.11	2.6	31.5	3.61	0.9	1.92	6.4	41.7
Судак	N+E	159	0.38	1.8	18.6	3.46	0.72	2.13	7.1	37.5
Феодосия	N	192	0.63	1.8	19.1	3.46	0.74	2.06	6.7	36.5
Симферополь	Z	108	0.55	2.55	49.1	3.74	0.85	3.54	11.8	72.7
Симферополь	N+E	108	1.35	1.85	23.0	3.52	0.77	2.24	7.47	41.6
Ялта	Z	80	0.22	2.9	24.1	3.53	0.8	2.04	6.78	39.6
S					25.9	3.55	0.78	2.27	7.53	43.56
δS					0.06	0.08	0.02	0.04	0.04	0.05
Землетрясение (9) 25 июля: $t_0=16^h10^m51.6^s$, $\varphi=44.22^\circ$, $\lambda=33.22^\circ$, $h=31$ км, $K_{II}=9.1$										
Севастополь	N	51	0.45	2.2	9.01	3.25	0.61	1.74	5.8	25.7
Судак	N	159	0.051	2.0	3.8	3.0	0.67	0.55	1.82	8.9
Алушта	N	107	0.52	2.1	14.6	3.39	0.64	2.46	8.2	38.1
Феодосия	N	193	0.14	2.0	5.3	3.1	0.67	0.77	2.58	12.6
Симферополь	N	108	0.35	2.1	7.47	3.22	0.64	1.26	4.18	19.4
S					7.23	3.19	0.65	1.18	3.93	18.44
δS					0.1	0.1	0.008	0.12	0.12	0.11
Землетрясение (10) 7 августа: $t_0=10^h50^m45.0^s$, $\varphi=44.51^\circ$, $\lambda=36.95^\circ$, $h=11$ км, $K_{II}=8.7$										
Судак	N	160	0.03	2.9	1.28	2.68	0.44	0.67	2.2	7.1
Севастополь	N	260	0.018	2.8	1.25	2.67	0.45	0.59	1.97	6.5
S					1.265	2.68	0.445	0.63	2.08	6.79
δS					0.005	0.01	0.005	0.03	0.02	0.02
Землетрясение (11) 9 августа: $t_0=18^h12^m45.7^s$, $\varphi=46.82^\circ$, $\lambda=36.25^\circ$, $h=9$ км, $K_{II}=8.7$										
Судак	N	236	0.19	1.5	11.7	3.32	0.84	0.85	2.8	17.4
Алушта	N	277	0.15	1.5	7.33	3.19	0.84	0.53	1.78	10.9
S					9.26	3.25	0.84	0.67	2.23	13.77
δS					0.1	0.06	0	0.1	0.1	0.1
Землетрясение (12) 21 сентября: $t_0=07^h32^m39.1^s$, $\varphi=43.47^\circ$, $\lambda=35.23^\circ$, $h=21$ км, $K_{II}=9.5$										
Ялта	N+E	149	0.07	1.9	3.3	2.94	0.71	0.41	1.37	7.0
Судак	N+E	166	0.12	1.7	6.3	3.14	0.79	0.56	1.88	10.8
Симферополь	N+E	194	0.17	1.7	5.2	3.09	0.74	0.55	1.86	10.0
S					4.76	3.06	0.75	0.5	1.69	9.11
δS					0.08	0.08	0.01	0.04	0.05	0.06

Станция	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	M_w	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$u \cdot 10^{-2}$, м
Землетрясение (13) 18 октября: $t_0=02^h09^m09.8^s$, $\varphi=44.66^\circ$, $\lambda=36.43^\circ$, $h=11$ км, $K_{II}=9.1$										
Судак	N+E	116	0.11	2.2	3.4	2.96	0.6	0.68	2.25	9.9
Симферополь	N+E	185	0.1	2.0	2.5	2.88	0.63	0.43	1.44	6.65
Ялта	N	181	0.07	2.15	2.8	2.91	0.59	0.6	2.02	8.64
Севастополь	N	218	0.078	2.0	4.5	3.05	0.63	7.8	2.6	12.0
Феодосия	N	91	0.07	2.1	0.84	2.56	0.6	0.17	0.56	2.5
S					2.46	2.87	0.61	1.88	1.57	7.02
δS					0.12	0.13	0.006	0.33	0.12	0.12
Землетрясение (14) 2 ноября: $t_0=08^h18^m42.2^s$, $\varphi=44.69^\circ$, $\lambda=36.51^\circ$, $h=11$ км, $K_{II}=8.1$										
Судак	N	122	0.09	2.0	2.9	2.91	0.63	0.5	1.67	7.7
Феодосия	N	96	0.07	2.5	0.9	2.57	0.53	0.27	0.89	3.4
S					1.62	2.74	0.58	0.37	1.22	5.12
δS					0.25	0.17	0.04	0.13	0.14	0.18
Землетрясение (15) 6 ноября: $t_0=10^h49^m24.0^s$, $\varphi=43.89^\circ$, $\lambda=34.08^\circ$, $h=33$ км, $K_{II}=8.5$										
Севастополь	N	80	0.09	2.1	2.31	2.7	0.64	0.39	1.3	6.0
Ялта	N+E	67	0.14	2.2	2.44	2.86	0.61	0.47	1.6	7.0
S					2.37	2.78	0.625	0.43	1.44	6.48
δS					0.01	0.08	0.01	0.04	0.05	0.03
Землетрясение (16) 8 ноября: $t_0=11^h52^m35.3^s$, $\varphi=43.87^\circ$, $\lambda=34.03^\circ$, $h=35$ км, $K_{II}=9.7$										
Судак	N	137	0.7	1.5	38.1	3.67	0.94	1.99	6.6	45.5
Севастополь	N	80	1.2	1.52	38.0	3.66	0.93	2.06	6.9	46.5
Алушта	N	95	1.0	1.5	25.2	3.54	0.94	1.31	4.4	30.1
Симферополь	N	120	1.45	1.35	35.1	3.64	1.05	1.33	4.4	33.9
Ялта	N	70	1.32	1.7	30.0	3.6	0.83	2.28	7.6	46.0
Феодосия	N	167	0.42	1.55	18.7	3.46	0.91	1.08	3.6	23.8
S					29.93	3.59	0.93	1.61	5.38	36.5
δS					0.05	0.07	0.01	0.05	0.05	0.05
Землетрясение (17) 8 ноября: $t_0=16^h10^m00.2^s$, $\varphi=43.90^\circ$, $\lambda=34.02^\circ$, $h=35$ км, $K_{II}=8.6$										
Севастополь	N	76	0.38	1.25	10.7	3.3	1.13	0.32	1.1	8.9
Алушта	Z	92	0.02	6.5	2.97	2.92	0.49	1.09	3.6	13
Алушта	N	92	0.43	1.35	9.75	3.27	1.05	0.37	1.23	9.4
Судак	N	134	0.21	1.3	10.3	3.28	1.09	0.35	1.17	9.2
Ялта	Z	66	0.12	2.4	12.9	3.35	1.02	0.52	1.75	13
S					8.37	3.22	0.92	0.47	1.58	10.54
δS					0.11	0.07	0.07	0.1	0.1	0.04
Землетрясение (18) 19 ноября: $t_0=01^h18^m17.6^s$, $\varphi=45.36^\circ$, $\lambda=32.71^\circ$, $h=9$ км, $K_{II}=7.6$										
Севастополь	N	118	0.14	1.1	3.66	3.0	1.08	0.13	42	3.3
Землетрясение (19) 30 декабря: $t_0=23^h22^m52.1^s$, $\varphi=42.28^\circ$, $\lambda=35.97^\circ$, $h=23$ км, $K_{II}=8.6$										
Судак	N	300	0.14	1.15	13.3	3.36	1.17	0.37	1.22	10.4
Алушта	N	295	0.17	1.25	10.6	3.29	1.07	0.38	1.25	9.8
S					11.87	3.33	1.12	0.375	1.235	10.1
δS					0.05	0.03	0.02	0.006	0.005	0.01

Примечание. Средние значения S выделены жирным шрифтом.

Наибольшие значения динамических параметров M_0 , $\Delta\sigma$, ε , \bar{u} получены для землетрясений № 8 с $K_{II}=10.2$, $h=28$ км и № 6 с $K_{II}=9.7$, $h=35$ км, а радиуса круговой дислокации – для более слабых землетрясений района полуострова Тарханкут (№ 18) с $K_{II}=7.6$, $h=9$ км и Черноморской впадины (№ 19) с $K_{II}=8.6$, $h=23$ км.

В целом можно отметить увеличение значений динамических параметров изученных очагов с ростом энергии землетрясений. Вместе с тем в пределах одного и того же диапазона энергетических классов наблюдаются различия очаговых параметров, иногда достигающие одного

порядка величин (табл. 2). Так, в диапазоне $K_{II}=8.6-8.7$ средние значения сейсмического момента для землетрясений № 19 и № 10 отличаются в 9.4 раза, а радиуса круговой дислокации – в 2.5 раза. Такие различия очаговых параметров землетрясений одного уровня энергий естественны и могут быть объяснены как особенностями процессов в очаге каждого землетрясения, так и значительными погрешностями в определении глубин очагов, следовательно, и скоростей продольных и поперечных волн в очаговой зоне, используемых для расчета динамических параметров. Так, отнесение гипоцентра к земной коре или верхней мантии в переходной зоне (при ошибке $\delta h=(5-10)$ км), может привести к различиям в сейсмическом моменте почти в 2 раза. Кроме того, невозможно точно учесть многообразие геолого-геофизических свойств среды на пути распространения сейсмических колебаний и в верхней толще пород под станциями регистрации, а также направленности излучения без знания механизма очагов для слабых землетрясений.

Как и в предыдущем, 2009 г. [6], проведено сравнение восстановленных динамических параметров очагов за 2010 г. со средними долговременными зависимостями (5) и (6) от энергетического класса K_{II} землетрясений [12]:

$$\lg M_0 = 0.645(\pm 0.027) \cdot K_{II} + 8.142(\pm 0.271), \quad \rho=0.99; \quad (5)$$

$$\lg r_0 = 0.112(\pm 0.011) \cdot K_{II} - 1.293(\pm 0.107), \quad \rho=0.93. \quad (6)$$

Сравнения проведены только для сейсмического момента и радиуса круговой дислокации (рис. 6), поскольку другие динамические параметры зависят от этих двух величин.

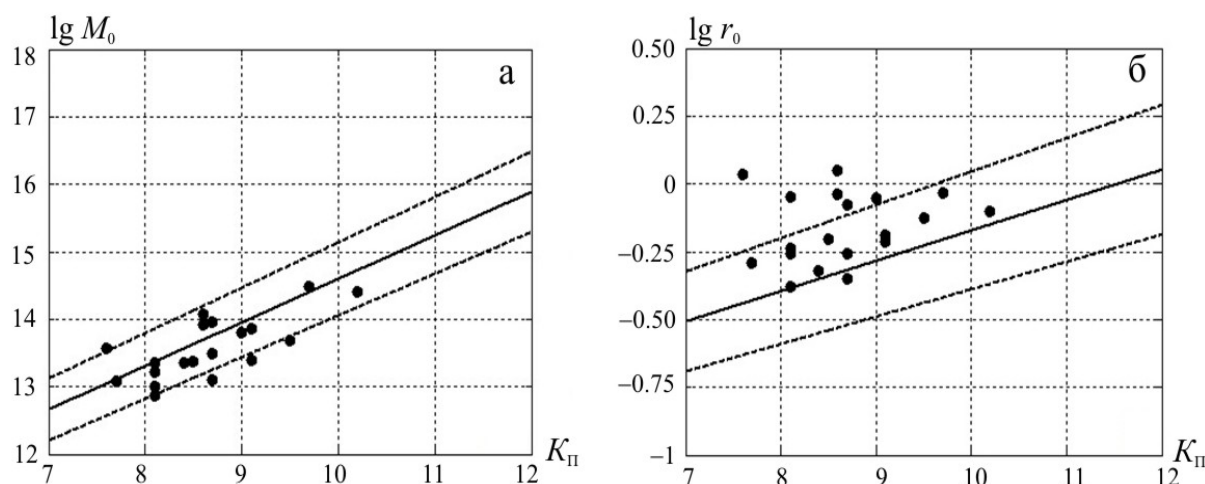


Рис. 6. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений 2010 г.: сейсмического момента (а) и радиуса круговой дислокации (б) – с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$ в [12]

Пунктиром обозначены пределы погрешностей (доверительная область на уровне 0.95).

Из рис. 6 видно, что средние значения M_0 за 2010 г., как и за 2009 г. [6], в основном удовлетворяют долговременной зависимости $M_0(K_{II})$, находясь в пределах ее доверительной области, с преобладанием отрицательных значений отклонений δM_0 (рис. 6 а). В то же время величины радиусов круговой дислокации r_0 (рис. 6 б) получились преимущественно выше долговременной зависимости $r_0(K_{II})$ (положительные отклонения δr), как и в 2009 г. [6]. Наибольшие отклонения δr_0 отмечены для землетрясений 20 июня, 19 ноября и 30 декабря (№№ 6, 18 и 19 в табл. 1,) с небольшими глубинами очагов 8, 9 и 23 км соответственно. Преобладание завышенных значений r_0 в очагах землетрясений в 2010 и 2009 гг. может быть объяснено как использованием более широкополосных цифровых сейсмических каналов, по сравнению с прежними аналоговыми, так и возможными ошибками в оценках энергетических классов K_{II} по записям цифровых станций. Не исключены и естественные пространственно-временные вариации очаговых параметров. Исследования по оценке преимущества долговременных зависимостей и энергетической шкалы K_{II} [2], разработанные по материалам аналоговых сейсмических станций, будут продолжены.

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 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
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 А.Н., Свидлова В.А., Князева В.С., Бушмакина Г.Н.** Бердянское землетрясение 31.07.2006 г. // *Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 год.* – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2008. – С. 27–30.
4. **Пустовитенко А.Н., Свидлова В.А., Князева В.С., Бушмакина Г.Н., Габсатарова И.П.** Две версии изосейст Осипенковского (Бердянского) землетрясения 31 июля 2006 г. с $M_w=3.3$, $I_0=5$ (Украина, Запорожская область) // *Землетрясения Северной Евразии, 2006 год.* – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 359–366.
5. **Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н.** Очаговые параметры землетрясений Крыма // *Землетрясения Северной Евразии, 2006 год.* – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 282–285.
6. **Пустовитенко Б.Г., Калинин И.В., Мерзей Е.А., Пустовитенко А.А.** Динамические параметры очагов землетрясений Крыма // *Землетрясения Северной Евразии, 2009 год.* – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 261–270.
7. **Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 249 с.
8. **Brune I.V.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // *J. Geophys. Res.* – 1970. – **75.** – N 26. – P. 4997–5009.
9. **Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С.** Спектры P -волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // *Вулканология и сейсмология.* – 1989. – № 2. – С. 66–79.
10. **Костров Б.В.** Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
11. **Hanks T.C., Kanamori H.** A Moment Magnitude Scale // *J. Geophys. Res.* – 1979. – **84.** – N 135. – P. 2348–2350.
12. **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.