

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА**Б.Г. Пустовитенко^{1,2}, И.В. Калинюк^{1,2}, Е.А. Мерзжей^{1,2},****Е.И. Поречнова², З.Н. Сыкчина²**¹Крымский экспертный совет по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений,г. Симферополь, bella@seismoexpert.crimea.ua,²Отдел сейсмологии Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,г. Симферополь, seimosilver@mail.ru

Для восстановления динамических параметров очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2008 г. использованы записи региональных сейсмических станций, оснащенных как аналоговой, так и цифровой аппаратурой. Аналоговая регистрация землетрясений в 2008 г. сохранилась параллельно только на сейсмических станциях «Алушта» и «Симферополь». Остальные станции полностью перешли на цифровую запись [1].

Динамические параметры очагов получены для восьми землетрясений с $K_{II}=8.8-12.7$ (табл. 1), произошедших в земной коре на глубинах h от 9 до 45 км в различных районах региона: Севастопольском (№ 1), Судакско-Феодосийском (№ 4), Керченско-Анапском (№ 5), Северо-Западном (№ 8) и Черноморской впадине (№ 9).

Таблица 1. Список землетрясений Крыма, для которых рассчитаны спектры в 2008 г.

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуды			K_{II}	Район
			φ° , N	λ° , E		M_c	M_w/n , табл. 2	$MPSP$ [3] m_b^* [4]		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	08.02	03 28 47.6	43.92	33.79	45	2.4	3.3/1		9.2	Севастопольский (№ 1)
2	04.04	10 39 00.3	44.66	35.42	30	2.0	3.0/6	4.1/1	9.3	Судакско-Феодосийский (№ 4)
3	07.05	08 00 21.1	45.34	30.95	11	5.1	4.8/4	5.0/61 4.9*/207	12.7	Северо-Западный (№ 8)
4	04.07	16 40 26.5	45.34	31.01	30	2.9	3.7/4	3.9/1 3.4*/2	9.7	Северо-Западный (№ 8)
5	24.07	14 14 11.2	44.87	36.37	25	2.8	3.7/1	4.1/5 3.8*/5	10.1	Керченско-Анапский (№ 5)
6	09.08	01 53 14.8	42.71	32.63	35	3.5	3.5/5	4.0/11 3.8*/13	10.1	Черноморская впадина (№ 9)
7	22.09	05 47 27.2	44.84	37.78	45		3.4/2	4.0/1 3.7*/2	9.9	Керченско-Анапский (№ 5)
8	29.10	02 46 44.6	44.67	34.99	9	2.2	2.8/5		8.8	Судакско-Феодосийский (№ 4)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 10, 11 соответствуют таковым в [2].

При подборе землетрясений для анализа учитывался прежде всего их сравнительно высокий энергетический уровень с $K_{II} \geq 9$. Исключение составляет только землетрясение (8) в табл. 1 с энергетическим классом меньше выбранного порога, но оно произошло вблизи побережья на самых малых эпицентральных расстояниях ($\Delta=24-76$ км) от станций регистрации. Кроме того, интерес представляли сейсмические районы, для которых накоплено меньше всего статистических данных по очаговым параметрам: Севастопольский, Судакско-Феодосийский, Северо-Западный и Черноморская впадина. Два землетрясения из достаточно хорошо изученного восточного района № 5 выбраны с целью дополнить статистику по стационарным определениям на станциях «Керчь» и «Судак». Пространственное положение эпицентров изученных землетрясений представлено на рис. 1.

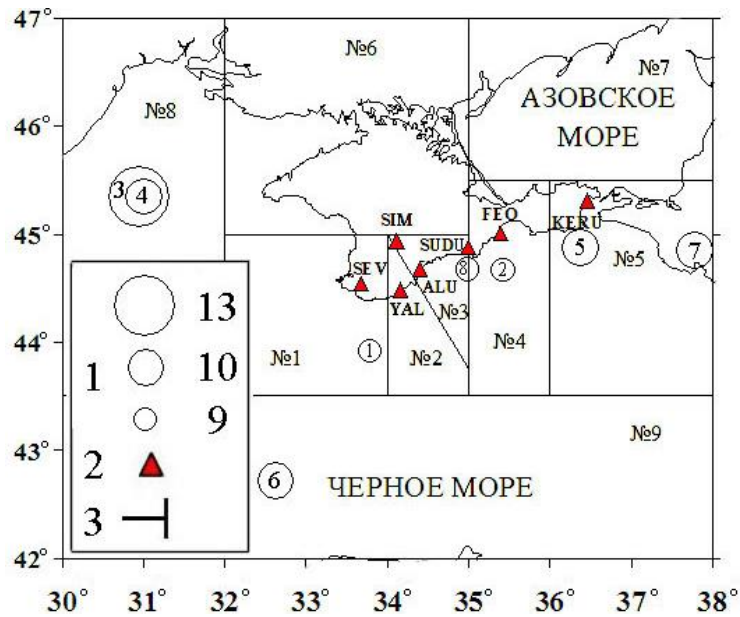


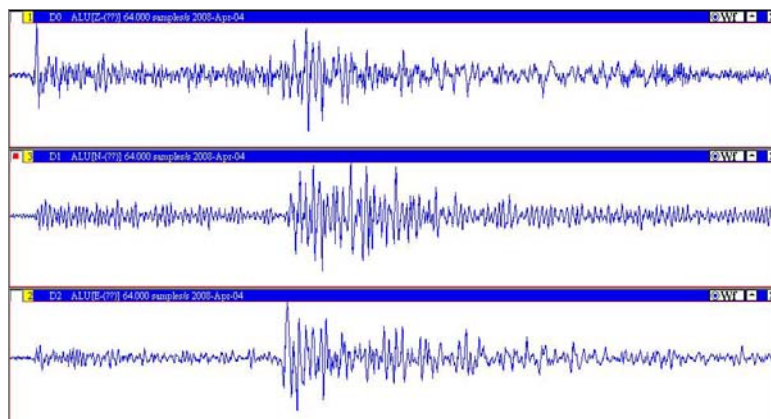
Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2008 г., для которых рассчитаны спектры (номера в кругах по табл. 1)

1 – энергетический класс K_{II} [5]; 2 – сейсмическая станция; 3 – граница района.

Для отобранных землетрясений рассчитано 38 амплитудных спектров объемных P - и S -волн по записям станций: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Керчь» (KERU), «Ялта» (YAL), расположенных по отношению к исследованным очагам на эпицентральных расстояниях в диапазоне $\Delta=24\text{--}317$ км. Большинство спектров получено по записям станции ALU, SUDU, YAL, в одном случае – по станции KERU.

В основном использованы волновые формы поперечных S -волн, как наиболее интенсивных и четко выделяемых на фоне микросейсм. Во всех случаях подбирались записи только с индексом четкости « i » и с превышением полезного сигнала над фоном помех в несколько раз. Там, где условия отбора позволяли, спектры рассчитывались по обеим горизонтальным составляющим (N–S), (E–W) и по вертикальной (Z). При обработке как аналоговых, так и цифровых записей, относительная длительность исследуемого участка принята равной интервалу времени от вступления P - или S -волн до времени спада максимальных амплитуд колебаний A_{\max} до уровня $1/3 A_{\max}$ [6].

Аналоговые сейсмограммы по станции «Алушта» и «Симферополь» со скоростью развертки записи 60 мм/мин оцифрованы ручным способом по «характерным» точкам и спектры рассчитаны экспресс-методом по методике [6]. Спектры по цифровым станциям получены методом БПФ по стандартной программе с учетом методических рекомендаций по [7]. Все записи скоростей были пересчитаны в функции смещения грунта с учетом имеющихся АЧХ и рабочих динамических диапазонов каналов регистрации [1]. Примеры цифровых записей даны на рис. 2.



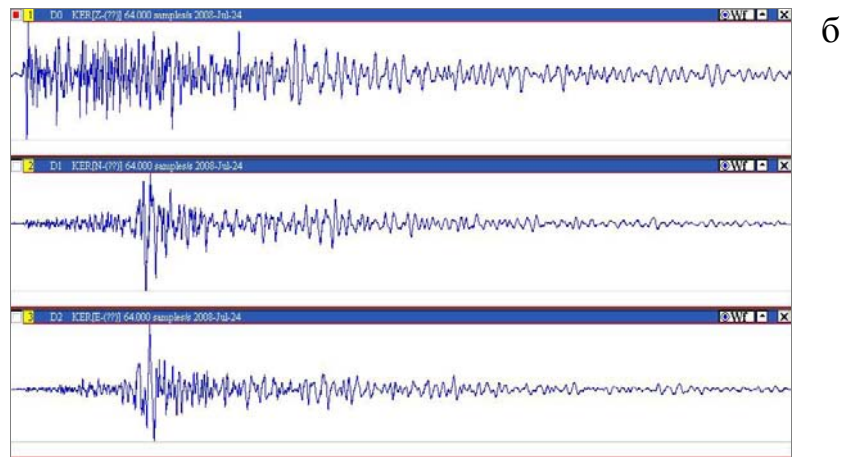


Рис. 2. Примеры цифровых записей землетрясений 4 апреля в 10^h39^m, с $K_{II}=9.3$, $M_w=3.0$, $\Delta=80$ км на станции «Алушта» (а) и 24 июля в 14^h14^m с $K_{II}=10.1$, $M_w=3.7$, $\Delta=49$ км на станции «Керчь» (б) по короткопериодным каналам ЕН

Все пять амплитудных спектров, полученные по аналоговым записям, приведены на рис. 3. Спектры представлены в логарифмическом масштабе с обозначением аббревиатур сейсмических станций на русском языке: «Алушта» (Алш) и «Симферополь» (Смф).

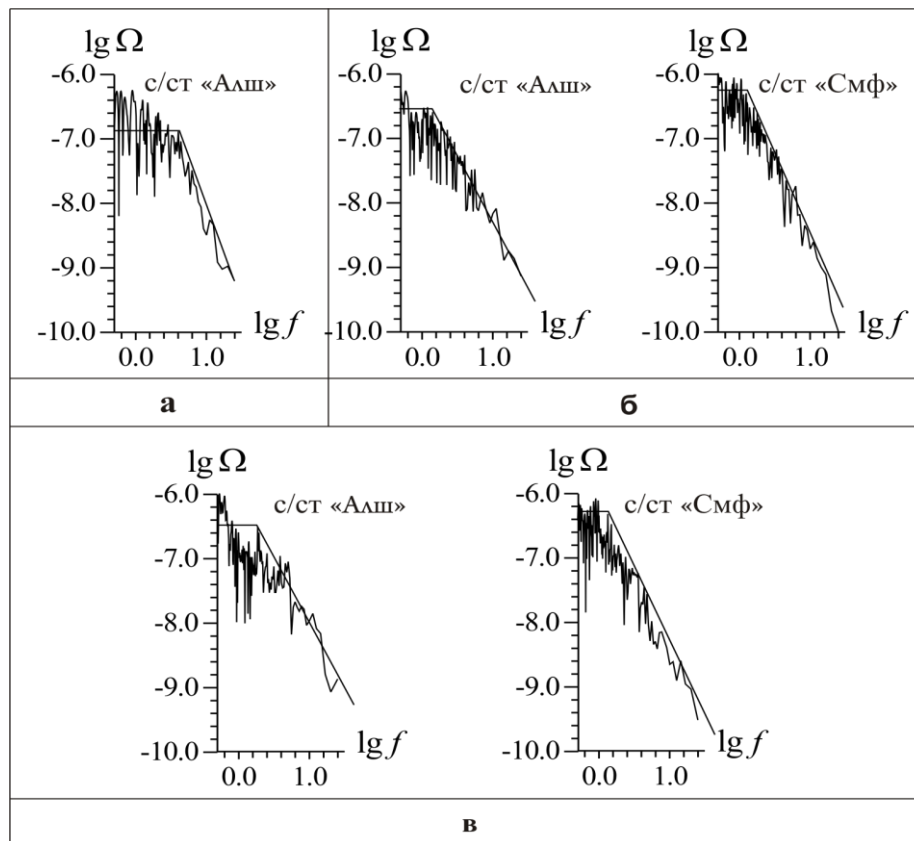


Рис. 3. Амплитудные спектры землетрясений 8 февраля в 03^h28^m с $K_{II}=9.2$, $M_w=3.3$ (а); 4 июля в 16^h40^m с $K_{II}=9.7$, $M_w=3.7$ (б); 9 августа в 01^h53^m с $K_{II}=10.1$, $M_w=3.5$ (в), полученные по аналоговым записям

Сравнительно большое число спектров (33 из 38) рассчитано с привлечением цифровых записей. Привести их полностью невозможно, поэтому на рис. 4 даны только примеры по каждому землетрясению и по отдельным сейсмическим станциям.

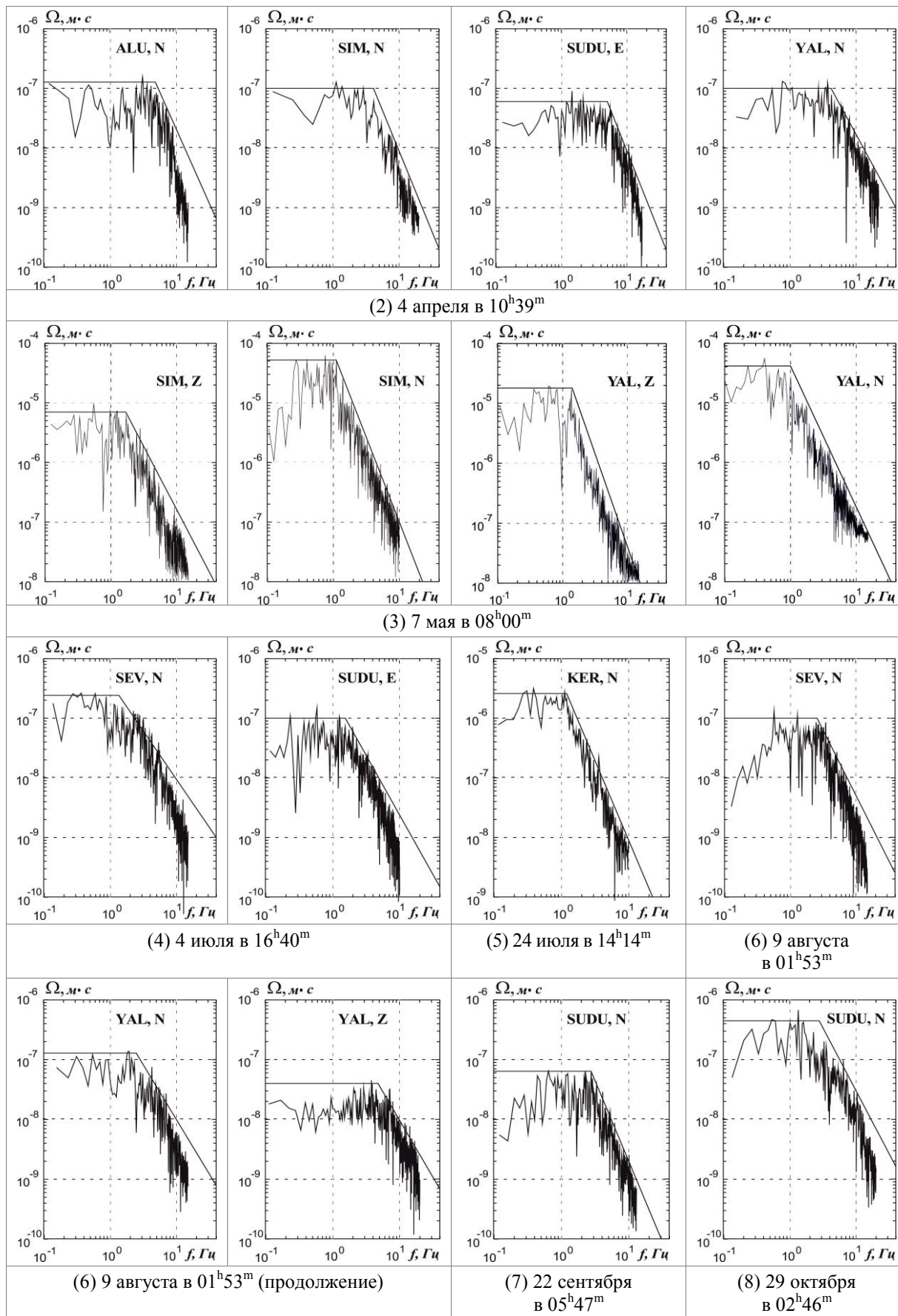


Рис. 4. Примеры амплитудных спектров землетрясений Крыма за 2008 г. по записям цифровых сейсмических станций (номера землетрясений из табл. 1)

На рис. 4 видно, что спектры, полученные по цифровым станциям, так же как и по аналоговым, надежно аппроксимируются в рамках модели Брюна [8] со спадом уровня спектральной плотности в высокочастотную область по квадратичному закону. Вид и аппроксимация остальных семнадцати спектров изученных землетрясений аналогичны приведенным на рис. 4. Все спектры 2008 г. отнесены к классу надежных.

Методика расчета спектральных и очаговых параметров описана в [6–8]. Главные характеристики амплитудных спектров – угловая частота f_0 и спектральная плотность Ω_0 в длиннопериодной части – использованы для расчета динамических параметров очагов землетрясений Крыма по методике Брюна [8]. Результаты расчетов сейсмического момента M_0 , моментной магнитуды M_w , радиуса круговой дислокации r_0 , сброшенного напряжения $\Delta\sigma$, деформации сдвига ε , средней подвижки \bar{u} по разрыву представлены в табл. 2.

Значения моментной магнитуды M_w рассчитаны по сейсмическому моменту M_0 с использованием формулы Канамори [9]:

$$M_w = 2/3 \cdot \lg M_0 - 10.7, \quad (1)$$

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

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

Спектральная плотность Ω_0 , определенная по спектру записей на двух горизонтальных составляющих, пересчитывалась в полный вектор колебаний (в табл. 2 отмечено как N+E). При вычислении средних по группе станций значений динамических параметров S использовался логнормальный закон распределения величин, как и в [6], и оценивалось стандартное отклонение (дисперсия δS).

Для наиболее сильного землетрясения (3), произошедшего 7 мая в 08^h00^m с $K_{II}=12.7$, расчеты динамических параметров выполнены по трехкомпонентным записям (N-S, E-W, Z) на станциях «Ялта» и «Симферополь» с учетом направленности излучения ($R_{\theta\phi}$) для *P*- и *S*-волн [10], полученной из решения механизма очага [11]. Это обеспечило хорошую внутреннюю сходимость определения станционных параметров и малую дисперсию средних значений (табл. 2).

К сожалению, не удалось подобрать надежных записей одновременно по аналоговым и цифровым сейсмическим станциям для прямого их сопоставления. Только для землетрясений (4) и (6) очаговые параметры восстановлены по двум видам регистрации волновых форм, но при этом использованы разные станции. Тем не менее можно отметить достаточно хорошее согласие всех станционных определений, особенно для землетрясения (4), зарегистрированного 4 июля в 16ⁿ40^m с $K_{II}=9.7$.

Таблица 2. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2008 г.

Станция	Составляющая	Δ , км	Ω_0 , 10^{-6} м·с	f_0 , Гц	M_0 , 10^{13} Н·м	M_w	r_0 , км	$\Delta\sigma$, 10^5 Н/м ²	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м
Землетрясение 1, 8 февраля: $t_0=03^h28^m47.6^s$, $\varphi=43.92^\circ$, $\lambda=33.79^\circ$, $h=45$ км, $K_{II}=9.2$										
Алушта*	N	98	0.13	4.0	9.241	3.3	0.39	6.75	11.25	0.319
Землетрясение 2, 4 апреля: $t_0=10^h39^m0.3^s$, $\varphi=44.66^\circ$, $\lambda=35.42^\circ$, $h=30$ км, $K_{II}=9.3$										
Алушта	Z	80	0.02	6.5	2.22	2.8	0.36	2.11	7.0	0.18
Алушта	N+E	80	0.16	3.9	3.39	3.0	0.34	3.65	12.2	0.30
Симферополь	N	108	0.16	3.5	3.41	3.0	0.38	2.66	8.8	0.25
Севастополь	N	138	0.065	4.0	3.54	3.0	0.34	4.11	13.7	0.33
Судак	N+E	42	0.24	3.8	3.97	3.0	0.35	3.98	13.2	0.39
Ялта	N+E	102	0.15	4.0	5.06	3.1	0.34	5.88	19.6	0.48
<i>S</i>					3.50	3.0	0.35	3.54	11.8	0.31
δS					0.048		0.008	0.064	0.064	0.061
Землетрясение 3, 7 мая: $t_0=08^h00^m21.1^s$, $\varphi=45.34^\circ$, $\lambda=30.95^\circ$, $h=11$ км, $K_{II}=12.7$										
Симферополь	Z	252	7.0	1.8	2320	4.85	1.37	39.9	133	13.2
Симферополь	N+E	252	69	1.0	1890	4.79	1.38	31.6	105	10.6
Ялта	Z	269	3.0	1.7	2530	4.87	1.45	36.6	122	12.8
Ялта	N+E	269	41	1.0	1980	4.8	1.38	33.1	110	11.1
<i>S</i>					2165	4.8	1.39	35.2	117	11.9
δS					0.03	0.05	0.006	0.023	0.023	0.023

Станция	Составляющая	Δ , км	Ω_0 , 10^{-6} м·с	f_0 , Гц	M_0 , 10^{13} Н·м	M_w	r_0 , км	$\Delta\sigma$, 10^5 Н/м ²	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м
Землетрясение 4, 4 июля: $t_0=16^{\text{h}}40^{\text{m}}26.5^{\text{s}}$, $\varphi=45.34^\circ$, $\lambda=31.01^\circ$, $h=30$ км, $K_{\text{П}}=9.7$										
Алушта*	N	276	0.29	1.41	28.46	3.6	0.94	1.49	4.96	0.34
Симферополь*	N	247	0.56	1.28	49.25	3.8	1.04	1.94	6.47	0.49
Севастополь	N	228	0.34	1.5	31.1	3.6	0.89	1.90	6.35	0.41
Судак	N+E	317	0.26	1.4	32.80	3.6	0.96	1.64	5.45	0.38
S					34.58	3.65	0.96	1.73	5.77	0.40
δS					0.053	0.05	0.014	0.027	0.028	0.033
Землетрясение 5, 24 июля: $t_0=14^{\text{h}}14^{\text{m}}11.2^{\text{s}}$, $\varphi=44.87^\circ$, $\lambda=36.37^\circ$, $h=25$ км, $K_{\text{П}}=10.1$										
Керчь		49	3.9	1.3	42.4	3.7	1.03	1.69	5.64	0.42
Землетрясение 6, 9 августа: $t_0=01^{\text{h}}53^{\text{m}}14.8^{\text{s}}$, $\varphi=42.71^\circ$, $\lambda=32.63^\circ$, $h=35$ км, $K_{\text{П}}=10.1$										
Алушта*	N	261	0.32	1.69	29.788	3.6	0.78	2.71	9.04	0.51
Симферополь*	E	276	0.52	1.32	51.140	3.8	1.01	2.18	7.26	0.53
Севастополь	N	221	0.15	2.3	17.3	3.4	0.62	3.25	10.8	0.48
Ялта	Z	232	0.04	4.0	20.2	3.5	0.61	3.8	12.7	0.57
Ялта	N	232	0.17	2.4	16.4	3.4	0.59	3.51	11.7	0.50
S					24.45	3.5	0.71	3.03	10.1	0.52
δS					0.092	0.1	0.044	0.043	0.043	0.013
Землетрясение 7, 22 сентября: $t_0=05^{\text{h}}47^{\text{m}}27.2^{\text{s}}$, $\varphi=44.84^\circ$, $\lambda=37.78^\circ$, $h=45$ км, $K_{\text{П}}=9.9$										
Судак	Z	219	0.025	3.8	14.4	3.4	0.65	2.33	7.76	0.36
Судак	N+E	219	0.09	2.5	9.9	3.3	0.57	2.39	7.96	0.33
S					11.9	3.35	0.61	2.36	7.86	0.34
δS					0.081	0.05	0.029	0.006	0.006	0.019
Землетрясение 8, 29 октября: $t_0=02^{\text{h}}46^{\text{m}}44.67^{\text{s}}$, $\varphi=44.67^\circ$, $\lambda=34.99^\circ$, $h=9$ км, $K_{\text{П}}=8.8$										
Алушта	Z	46	0.015	6	0.85	2.6	0.37	0.72	2.4	0.06
Алушта	N+E	46	0.16	3.6	1.64	2.75	0.35	1.65	5.5	0.14
Судак	N+E	24	0.5	3.2	4.03	3.0	0.40	2.85	9.5	0.27
Ялта	N	69	0.05	4.0	0.96	2.6	0.32	1.33	4.4	0.10
Симферополь	N+E	76	0.2	3.2	2.53	2.9	0.40	1.79	5.9	0.17
S					1.69	2.8	0.37	1.52	5.0	0.13
δS					0.127	0.1	0.018	0.097	0.097	0.11

Примечание. Знаком * отмечена аналоговая запись.

В целом получено хорошее согласие всех станционных значений динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2008 г. с малыми стандартными отклонениями (табл. 2). В связи с этим восстановленные для всех изученных землетрясений очаговые параметры можно, как и спектры, отнести к категории надежных. При этом нужно отметить хорошее внутреннее согласие станционных определений всех очаговых параметров и сходимость результатов при совместном их определении по аналоговым и цифровым станциям для землетрясений (4) и (6) (табл. 2). Для большинства землетрясений индивидуальные значения моментных магнитуд M_w либо полностью совпали, либо их разброс не превысил ± 0.1 . Наибольшие значения сейсмического момента M_0 , r_0 , $\Delta\delta$, ε , u получены для землетрясения (3) 7 мая 2008 г. с $K_{\text{П}}=12.7$. В целом для всех землетрясений наблюдается увеличение значений динамических параметров с ростом энергии землетрясений.

Поскольку большинство очаговых параметров рассчитано по данным только цифровых записей, представляет интерес сравнить их со средними долговременными зависимостями от энергии землетрясений, полученными ранее [12] для аналоговых сейсмических станций:

$$\lg M_0 = 0.645(\pm 0.027) \cdot K_{\text{П}} + 15.142(\pm 0.271), \quad \rho = 0.99, \quad (3)$$

$$\lg r_0 = 0.112(\pm 0.011) \cdot K_{\text{П}} - 1.293(\pm 0.107), \quad \rho = 0.93. \quad (4)$$

Сравнение проведено только для сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 (рис. 5), непосредственно определяемых из параметров спектров.

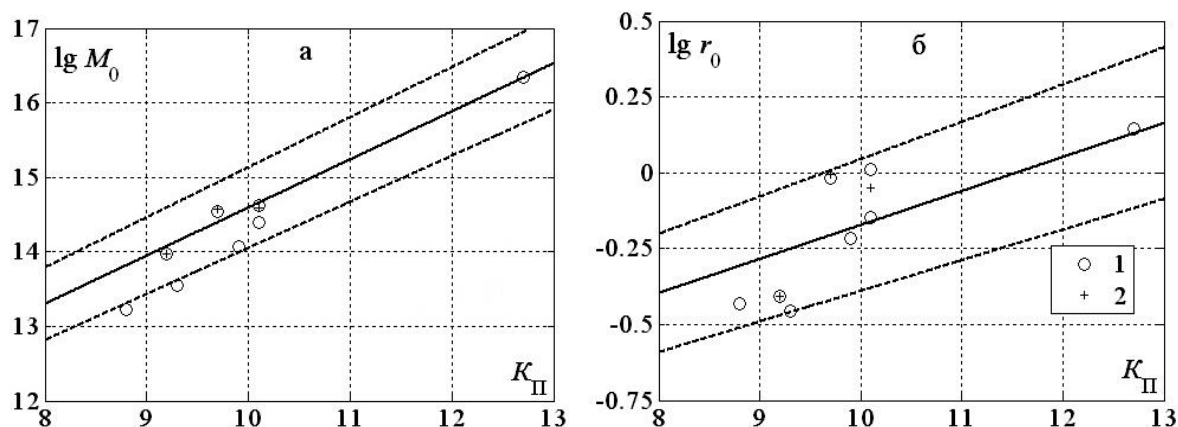


Рис. 5. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений 2008 г. – сейсмического момента (а) и радиуса круговой дислокации (б) – с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$ и $r_0(K_{II})$ в [12]

1, 2 – значения параметров по данным цифровых и аналоговых записей соответственно; пунктиром обозначены пределы погрешностей.

Как видно из рис. 5, значения M_0 и r_0 , восстановленные по цифровым записям, находятся в пределах доверительного интервала (δM_0 и δr_0) долговременных зависимостей этих параметров от энергетического уровня землетрясений [6, 12], установленных по аналоговым записям. Аналогичные результаты были получены в [13]. Для четырех землетрясений ((1) – в Севастопольском районе, (3) и (4) – в Северо-Западном, (6) – в Черноморской впадине) значения M_0 соответствуют долговременным зависимостям, т.е. $\delta M_0 \approx 0$, а для остальных землетрясений значения M_0 лежат в нижней части полосы ошибок. Радиусы круговой дислокации r_0 также не противоречат долговременным значениям (рис. 5 б), находясь в пределах доверительной области $\pm \delta$, тем не менее они разнесены по урону, а именно: для землетрясений (4) и (5) из Северо-Западного и Керченско-Анапского районов значения δr_0 положительны, а для наиболее слабых (1, 2, 8) из Севастопольского и Судакского районов – δr_0 отрицательны. Поскольку выбранные для анализа записи и рассчитанные спектры соответствуют высокому классу надежности, можно предположить, что разброс значений динамических параметров для относительно слабых очагов землетрясений 2008 г. естественен и связан как с пространственно-временными их вариациями [6, 12], так и невозможностью адекватно учесть параметры среды и направленность излучения сейсмической энергии из очага на станции регистрации.

Л и т е р а т у р а

1. Свидлова В.А., Пустовитенко А.А., Пасынков Г.Д. Крым. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
2. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыкчина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крыма за 2008 г. ($N=61$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
3. Bulletin of the International Seismological Centre for 2008. – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2010. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
4. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2008 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2008.
5. 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.
6. Пустовитенко Б.Г., Пантелева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 249 с.
7. 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 Р-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.

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. **Hanks T.C., Kanamori H.** A moment magnitude scale// *J. Geophys. Res.* – 1979. – 84. – № 35. – P. 2348–2350.
10. **Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Калинюк И.В.** Очаговые параметры землетрясения 7 мая 2008 г. в районе о. Змеиный (западная часть шельфа Черного моря) // Сейсмологический бюллетень за 2008 год. – Симферополь: ОС ИГ НАНУ, 2010. – С. 20–27.
11. **Пустовитенко А.А.** (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Крыма за 2008 г. ($N=1$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
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.
13. **Пустовитенко Б.Г., И.В. Калинюк, Мержей Е.А., Пустовитенко А.А.** Сравнение динамических параметров землетрясений Крыма по данным цифровых и аналоговых записей // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 461–468.