

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА

Б.Г. Пустовитенко, И.В. Калинин, Е.А. Мерзжей, А.А. Пустовитенко

*Институт сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского,
г. Симферополь, bella@seismoexpert.crimea.ua*

В 2009 г. все региональные сейсмические станции Крыма перешли на цифровой способ регистрации сейсмических колебаний [1]. Соответственно, была прекращена ручная оцифровка записей по «характерным» точкам и расчет спектров экспресс-методом с использованием аналоговых записей [2]. Цифровой способ регистрации сейсмических колебаний обладает более высокой разрешающей способностью дискретизации сейсмической записи и оперативностью ее получения по сравнению с аналоговой. Вместе с тем при обработке и интерпретации цифровых записей для четкого выделения сейсмических волн используются различные полосовые фильтры, от корректности выбора которых часто зависит правильность (чистота) результатов. Проблема также заключается в отсутствии строгой теории и единого метода расчета амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) цифровых сейсмографов. В связи с этим для расчета спектров землетрясений 2009 г. и восстановления по ним динамических параметров очагов отобраны записи только по тем станциям, для которых в 2009 г. АЧХ были определены достаточно надежно, а фон помех был минимальным.

Использованы волновые формы тринадцати землетрясений с энергетическими классами $K_{II} \geq 8.4$ (табл. 1), произошедших в Ялтинском (№ 2) и Северо-Западном (№ 8) районах Крыма, а также в Черноморской впадине (№ 9) на глубинах от 7 до 45 км. Большая часть изученных землетрясений относится к форшокам и афтершокам Симеизского землетрясения 12 апреля с $K_{II}=11.2$, $I_0=4$ балла, произошедшего в районе № 2 (рис. 1).

Таблица 1. Список землетрясений Крыма, для которых рассчитаны спектры в 2009 г.

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуды				K_{II}	Район
			φ° , N	λ° , E		M_s	M_w/n , табл. 2	$MPSP/n$, [3]	m_b/n , [4]		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	18.02	09 44 13.6	43.98	31.65	16		3.9/3	4.2/6	4.0/11	11.1	Северо-Западный (№ 8)
2	03.03	19 54 29.2	44.47	34.40	16	1.9	2.8/3			8.4	Ялтинский (№ 2)
3	15.03	01 28 26.6	45.37	30.89	7		3.2/4		3.1/3	9.1	Северо-Западный (№ 8)
4	11.04	00 09 10.8	44.13	34.07	28	3.3	3.5/3	3.7/2	3.3/4	9.9	Ялтинский (№ 2), форшок
5	11.04	05 18 45.8	44.12	34.07	45	2.4	3.2/3			8.7	Ялтинский (№ 2), форшок
6	11.04	22 02 44.6	44.07	34.12	29	2.6	3.4/3			9.5	Ялтинский (№ 2), форшок
7	12.04	16 31 40.8	44.06	34.14	32	4.0	4.3/9	4.2/15	4.0/24	11.2	Ялтинский (№ 2), гл. толчок
8	12.04	19 01 55.2	44.02	34.09	28	3.3	3.4/3			9.5	Ялтинский (№ 2), афтершок
9	15.04	07 48 37.5	44.09	34.09	35	2.4	3.1/1			8.7	Ялтинский (№ 2), афтершок
10	18.04	00 42 18	44.33	34.32	22	2.6	3.55/6	3.9/1	3.5/4	10.4	Ялтинский (№ 2)
11	20.05	07 36 14	42.89	36.54	25		2.95/2			8.6	Черноморская впадина (№ 9)
12	21.06	19 36 54.1	44.00	34.11	28	2.7	3.5/3	4.1/1		10.2	Ялтинский (№ 2), афтершок
13	20.11	06 43 32	44.66	31.02	35		3.0/1			8.7	Северо-Западный (№ 8)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 10, 11 соответствуют таковым в [5].

Для отобранных землетрясений рассчитано 46 амплитудных спектров объемных P - и S -волн по записям станций: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), расположенных по отношению к исследованным очагам на эпицентральных расстояниях в диапазоне $\Delta=56\text{--}330$ км. Абсолютное большинство спектров получено по запи-

сям высокочувствительной станции «Судак» [6], с минимальным уровнем помех и, соответственно, повышенной селективностью.

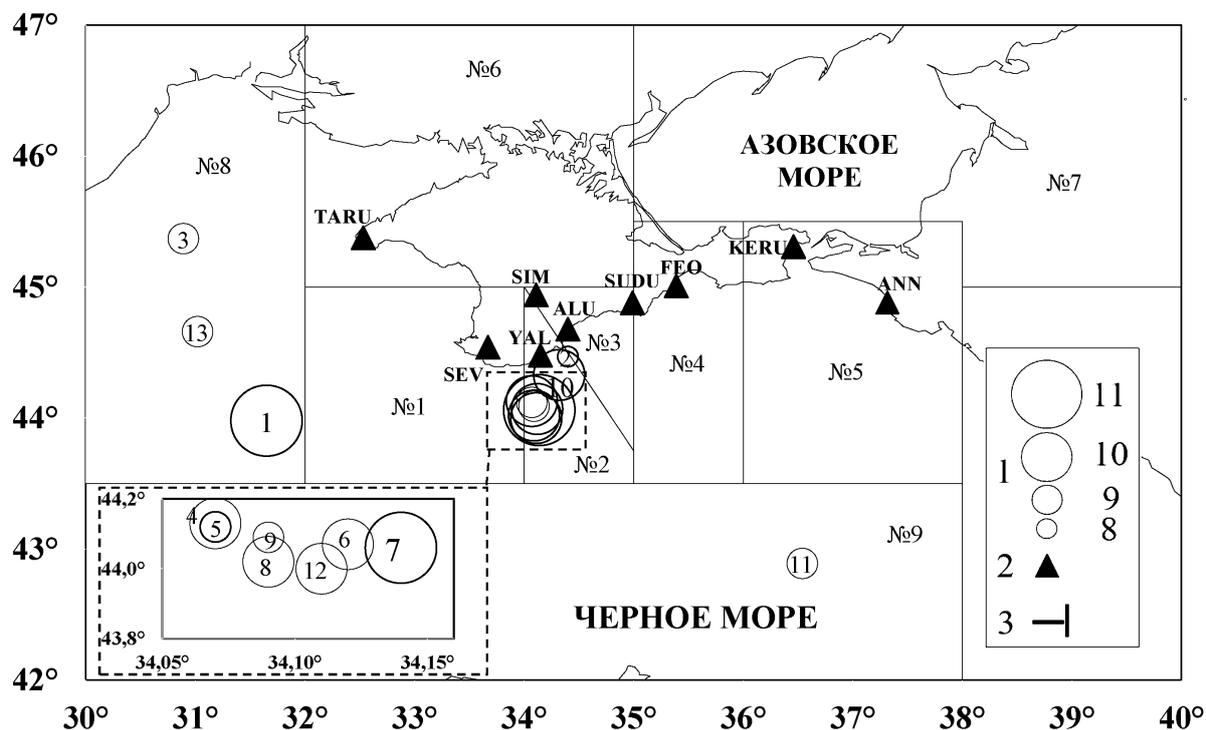
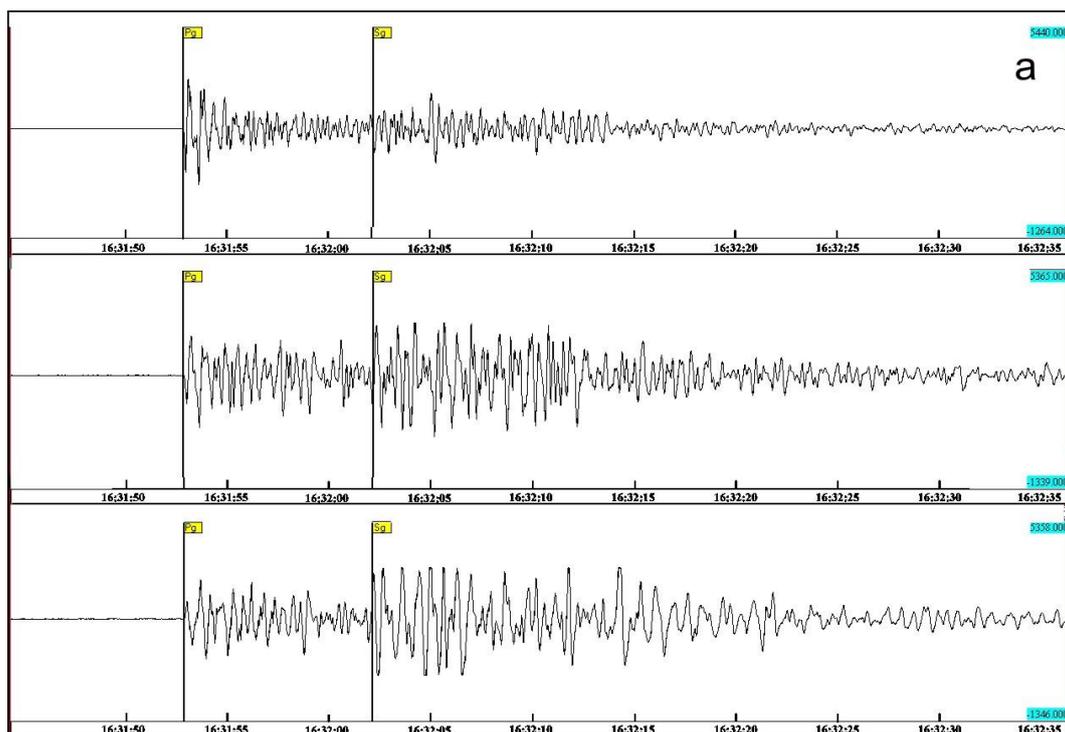


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2009 г., для которых рассчитаны спектры (номера в кругах по табл. 1)

1 – энергетический класс K_{II} [7]; 2 – сейсмическая станция; 3 – граница района. На врезке дана развернутая картина эпицентров форшоков и афтершоков ощутимого землетрясения 12 апреля с $K_{II}=11.2$, $M_w=4.3$.

Для анализа отбирались записи с четкими временами вступления волн (индекс четкости «i»), не осложненные микросейсмическим шумом. Примеры цифровых записей даны на рис. 2.



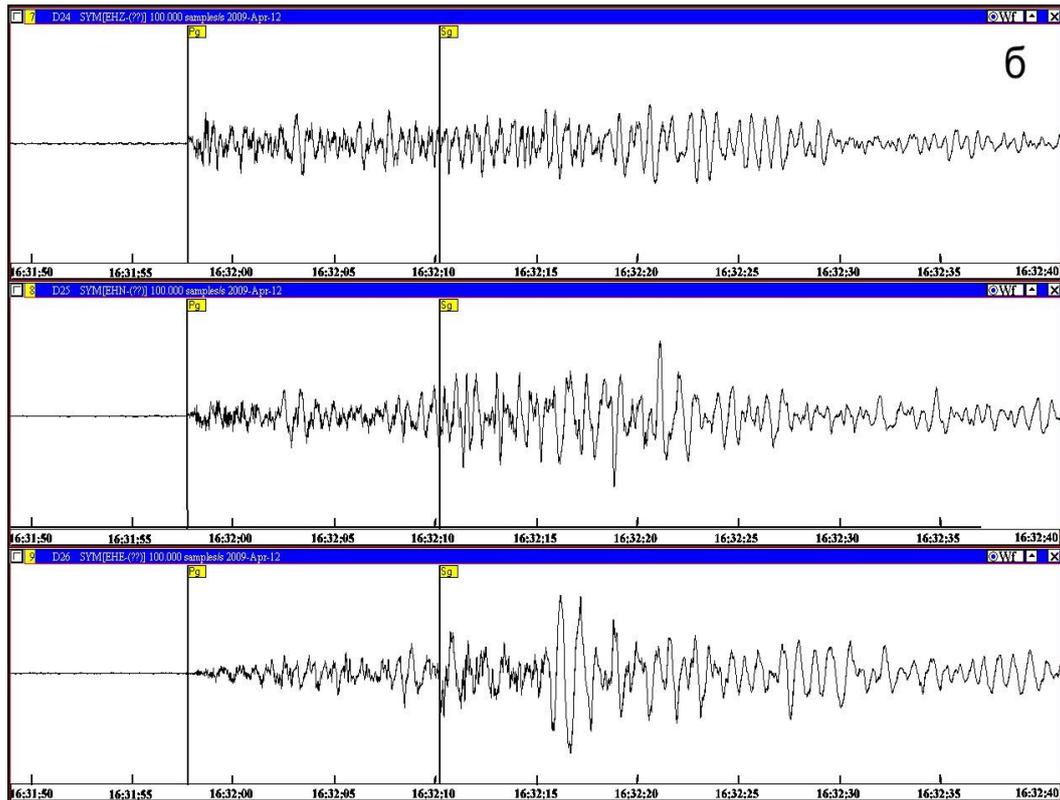


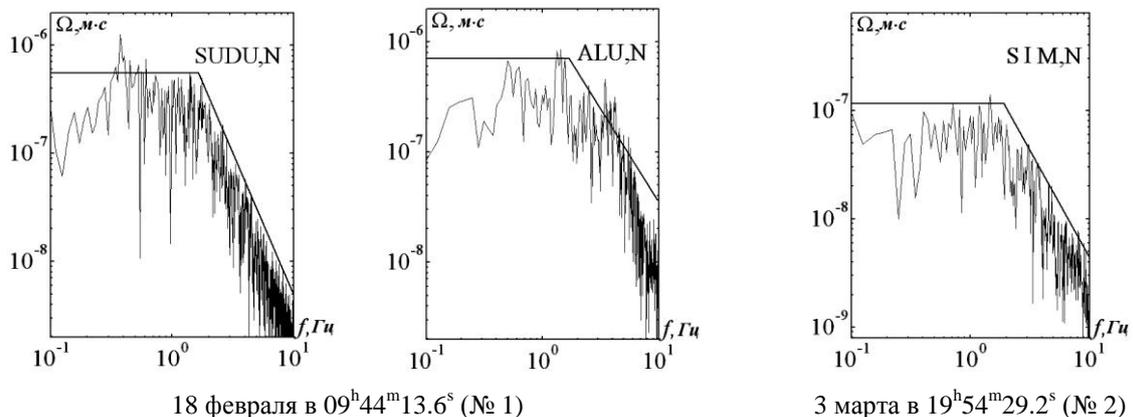
Рис. 2. Примеры цифровых записей землетрясения 12 апреля в 16^h31^m40.2^s с $K_{II}=11.2$, $M_w=4.3$ по короткопериодным каналам ЕН на станциях «Алушта» с $\Delta=73$ км (а) и «Симферополь» с $\Delta=99$ км (б)

Если условия отбора позволяли, спектры рассчитывались по обеим горизонтальным составляющим (N-S) и (E-W). Как и при обработке аналоговых 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 $1/3 A_{max}$ [2].

Амплитудные спектры получены с учетом АЧХ сейсмографов методом быстрого преобразования Фурье по стандартной программе с учетом методических рекомендаций по [8].

На рис. 3 даны примеры по каждому землетрясению и по отдельным сейсмическим станциям.

Видно (рис. 3), что спектры, полученные по цифровым станциям, можно надежно аппроксимировать в рамках дислокационной модели Брюна (ω^{-2}) [9] со спадом уровня спектральной плотности в высокочастотную область по квадратичному закону. Вид и аппроксимация остальных спектров изученных землетрясений аналогичны приведенным на рис. 3. Все спектры 2009 г. отнесены к классу надежных.



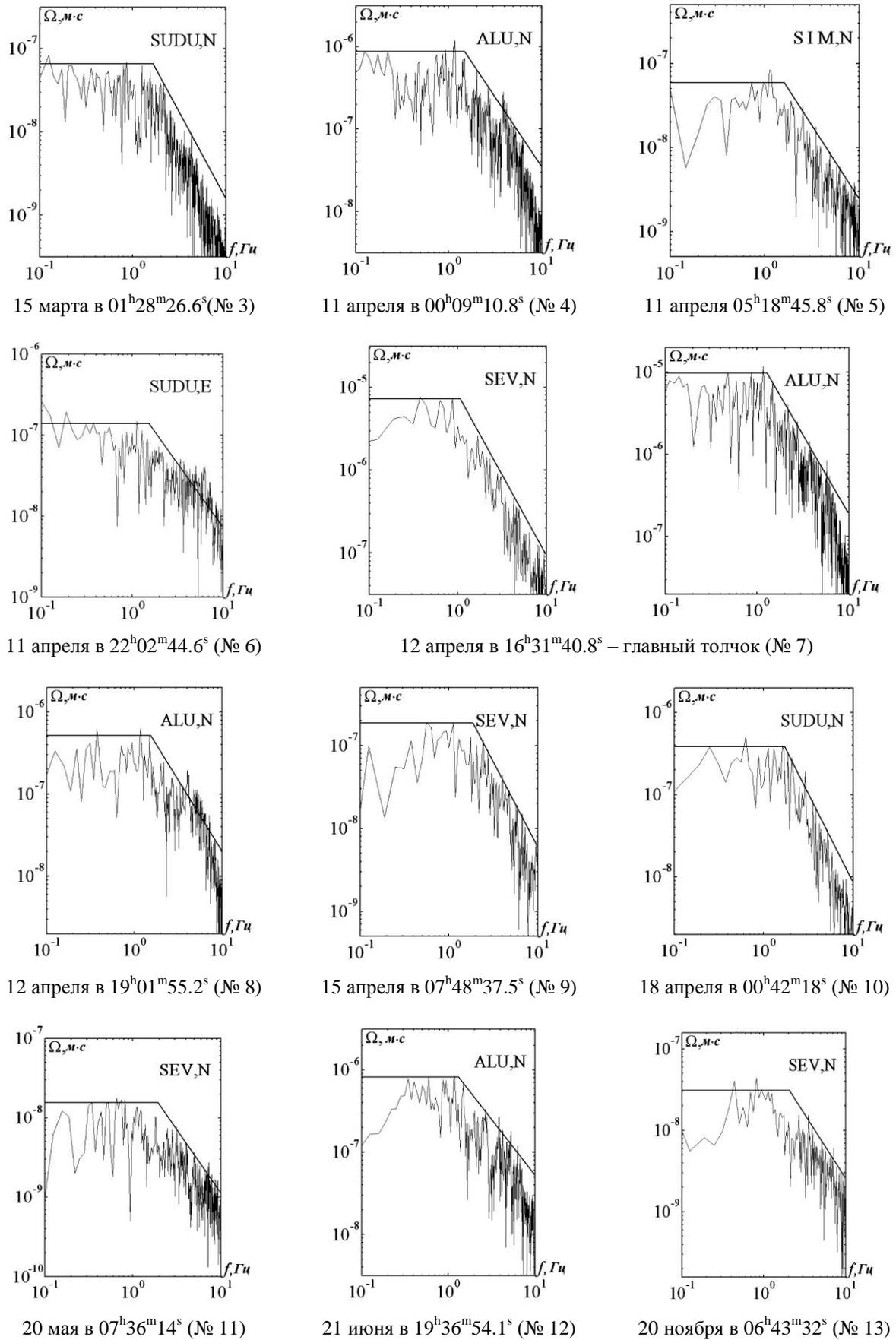


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров землетрясений Крыма за 2009 г. по записям цифровых сейсмических станций (номера землетрясений из табл. 1)

Следуя модели Брюна, спектр объемной волны аппроксимируется в билогарифмическом масштабе двумя прямыми: в длиннопериодной части спектра прямой, параллельной оси частот, в области коротких периодов – наклонной прямой с угловым коэффициентом $\gamma \sim -2$. Таким образом, спектр смещения можно описать с помощью трех основных характеристик: спектральной плотности $\Omega_0(x, f)$ при $f \rightarrow 0$, наклоном асимптоты высокочастотной ветви спектра γ и угловой частоты f_0 (ω_0).

Спектральная плотность $\Omega_0(x, f)$ пропорциональна сейсмическому моменту, а угловая частота f_0 – размеру дислокации. Они являются главными параметрами для оценки скалярного момента M_0 землетрясения и радиуса круговой дислокации r_0 . Параметр γ используется для проверки соответствия полученных стационарных спектров модели Брюна и их аппроксимации в рамках данной модели. В случае сильного отклонения значения γ от $\gamma \sim -2$ спектры отбраковывались.

Можно отметить (рис. 3), что полученные спектры записи поперечных волн на станциях «Алушта» (ALU) и «Севастополь» (SEV) иногда осложнены появлением повышенного уровня амплитуд на спаде, в диапазоне частот $\Delta f = 3-5$ Гц. Это может быть связано либо с резонансными свойствами пород, подстилающих станции, либо со спектральным составом микросейсмического фона. Анализ амплитудного спектра помех [10] не подтвердил вторую возможную причину: на частотах $f = 3-5$ Гц фон микросейсм как по станции «ALU», так и «SEV» на 1–2 порядка меньше, чем в области длиннопериодных колебаний.

В связи с этим при аппроксимация спектров двумя прямыми линиями всплески амплитуд на спаде в высокочастотной области игнорировались. Изучение резонансных свойств грунта на станции регистрации и их учет при анализе спектров должно стать предметом специального исследования.

Спектр записи реального землетрясения в точке наблюдения является суперпозицией эффектов самого источника, характеристики регистрирующего прибора, среды на пути очаг-станция, направленности излучения. Методика учета всех этих факторов при переходе от стационарного спектра к спектру источника подробно изложена в [2, 8]. Формула для расчета M_0 по стационарному спектру имеет вид [11]:

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

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

Функция геометрического расхождения $G(\Delta, h)$ для близких землетрясений на расстояниях от станции регистрации с $\Delta < 350$ км оценивалась как $1/R$, где R – гипоцентральное расстояние. Значения скоростей v и плотностей пород ρ выбирались в зависимости от глубины очага по моделям среды для Крымского региона из [2].

Для землетрясения 12 апреля с $K_{II} = 11.2$, $M_w = 4.3$ при оценке скалярного сейсмического момента учитывалась поправка за направленность излучения $R_{\theta\phi}$ по данным о параметрах механизма очага [12]. Наглядное представление поля излучения волн P , SV и SH из очаговой зоны дано на рис. 4.

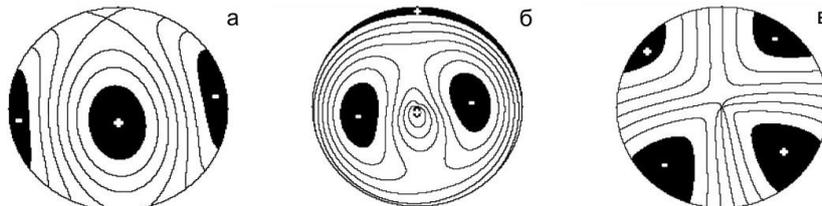


Рис. 4. Диаграммы направленности излучения для волн P (а), SV (б) и SH (в); затемнены области максимального (+1) и минимального (–1) значений коэффициента направленности для каждого типа волн

Поправки за направленность излучения из очага $R_{\theta\phi}$ на станции Крыма, которые использованы для восстановления динамических параметров, даны в табл. 2.

Таблица 2. Направленность излучения (коэффициент $R_{\theta\phi}$) на станции регистрации

Код станции Тип волны	SDK		SYM		ALU		SEV
	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>S</i>
$R_{\theta\phi}$	0.36	0.45	0.13	0.3	0.2	0.41	0.37

Такие же значения $R_{\theta\phi}$ использованы для афтершоков и форшоков (№4–6, 8, 9, 12) в предположении унаследования типа подвижки в очагах предшествующих и последующих толчков. Для других землетрясений при неизвестном механизме очага принято среднее значение $R_{\theta\phi}=0.4$.

Геометрические размеры очага определены по угловой частоте f_0 амплитудного спектра смещения. Частота f_0 связана с длительностью импульса, излученного очагом, которая в свою очередь определяется размером источника, скоростью испарывания и положением точки наблюдения по отношению к источнику. Для дислокационной модели Брюна [9, 11] с разрывом в виде круга радиус дислокации r_0 вычисляется по формуле:

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

По значениям скалярного сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 с использованием формул из работ [13, 14] определены другие очаговые параметры: сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ϵ , средняя подвижка по разрыву (или величина дислокации) \bar{u} , моментная магнитуда M_w (табл. 3). Моментная магнитуда рассчитана по индивидуальным оценкам сейсмических моментов M_0 с использованием формулы Канамори [15]:

$$M_w = 2/3 \cdot \lg M_0 - 10.7,$$

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

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. 3 указано, как N+E), а по продольным *P*-волнам – спектр записи вертикальной составляющей *Z*. В случае оцифровки только по одной составляющей, вектор спектральной плотности находился с учетом коэффициента из соотношения амплитуд A_N/A_E с использованием подробных данных из [16]. В табл. 3 полный вектор спектральной плотности обозначен $\Sigma\Omega_0$. Средние значения всех динамических параметров (*S*) и их стандартное отклонение (δS) найдены с учетом логнормального закона распределения величин [2]. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено, как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью (табл. 3).

Таблица 3. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2009 г.

Станция	Состав- ляющая	Δ , км	$\Sigma\Omega_0$, 10^{-6} м·с	f_0 , Гц	M_0 , 10^{13} Н·м	r_0 , 10^3 м	$\Delta\sigma$, 10^5 Н·м ²	ϵ , 10^{-6}	\bar{u} , 10^{-2} м	M_w
№ 1 – 18 февраля: $t_0=09^h44^m13.6^s$, $\varphi=43.98^\circ$, $\lambda=31.65^\circ$, $h=16$ км, $K_{\Gamma}=11.1$										
Судак	N	284	0.7	1.67	78.6	0.8	66.5	22.2	1.29	3.9
Алушта	N	232	1.22	1.7	74.7	0.79	66.6	22.2	1.27	3.9
Севастополь	N	173	1.1	1.63	75.2	0.83	58.0	19.3	1.16	3.9
<i>S</i>					76.2	0.81	63.6	21.2	1.24	3.9
δS					0.01	0.006	0.020	0.020	0.014	0
№ 2 – 3 марта: $t_0=19^h54^m29.2^s$, $\varphi=44.47^\circ$, $\lambda=34.40^\circ$, $h=16$ км, $K_{\Gamma}=8.5$										
Судак	N+E	66	0.09	2.2	1.98	0.58	4.5	1.51	0.063	2.8
Симферополь	N	59	0.21	2.18	2.08	0.58	4.6	1.55	0.065	2.85
<i>S</i>					2.03	0.58	4.6	1.53	0.064	2.82
δS					0.01	0	0.005	0.006	0.007	0.02
№ 3 – 15 марта: $t_0=01^h28^m26.6^s$; $\varphi=45.37^\circ$, $\lambda=30.89^\circ$, $h=7$ км, $K_{\Gamma}=9.1$										
Судак	Z	330		2	6.99	0.97	3.4	1.12	0.08	3.2
Судак	N+E	330	0.098	1.45	7.31	0.77	7.0	2.33	0.13	3.2

СПЕКТРЫ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Станция	Состав- ляющая	Δ , км	$\Sigma\Omega_0$, 10^{-6} м·с	f_0 , Гц	M_0 , 10^{13} Н·м	r_0 , 10^3 м	$\Delta\sigma$, 10^5 Н·м ²	ε , 10^{-6}	\bar{u} , 10^{-2} ·м	M_w
Алушта	N	289	0.17	1.44	7.42	0.78	6.9	2.32	0.13	3.2
S					7.24	0.84	5.5	1.82	0.11	3.2
δS					0.008	0.033	0.104	0.106	0.007	0
№ 4 – 11 апреля: $t_0=0^h09^m10.8^s$, $\varphi=44.13^\circ$, $\lambda=34.07^\circ$, $h=28$ км, $K_{II}=9.9$										
Алушта	N	67	1.2	1.41	21.2	0.95	10.8	3.6	0.25	3.5
Симферополь	N	91	1.1	1.36	19.9	0.99	9.1	3.0	0.22	3.5
Севастополь	N	56	0.79	1.4	17.5	0.96	8.7	2.9	0.20	3.5
S					19.5	0.97	9.5	3.2	0.22	3.5
δS					0.025	0.005	0.029	0.03	0.028	0
№ 5 – 11 апреля: $t_0=05^h18^m45.8^s$, $\varphi=44.12^\circ$, $\lambda=34.07^\circ$, $h=45$ км, $K_{II}=8.7$										
Севастополь	N	56	0.13	1.55	6.44	1.06	2.4	0.4	0.03	3.2
Судак	N	109	0.09	1.5	8.92	1.09	3.0	0.5	0.04	3.3
Симферополь	N	92	0.12	1.6	4.9	1.02	2.0	0.33	0.025	3.1
S					6.55	1.06	2.4	0.40	0.031	3.2
δS					0.075	0.008	0.051	0.052	0.059	0.1
№ 6 – 11 апреля: $t_0=22^h02^m44.6^s$, $\varphi=44.07^\circ$, $\lambda=34.12^\circ$, $h=29$ км, $K_{II}=9.5$										
Судак	N+E	115	0.22	1.55	10.1	0.86	6.8	2.27	0.14	3.3
Алушта	N	72	0.56	1.6	12.2	0.84	9.1	3.02	0.18	3.4
S					11.1	0.85	7.9	2.62	0.16	3.35
δS					0.04	0.005	0.063	0.062	0.055	0.05
№ 7 – 12 апреля: $t_0=16^h31^m40.2^s$, $\varphi=44.06^\circ$, $\lambda=34.14^\circ$, $h=32$ км, $K_{II}=11.2$										
Судак	Z	115	1.0	2.0	253	1.16	70.2	23.4	1.98	4.2
Судак	N	115	6.2	1.14	252	1.18	67.8	22.6	1.93	4.2
Алушта	Z	73	2.4	2.0	481	1.16	134.0	44.5	3.77	4.4
Алушта	N+E	73	15	1.2	280	1.12	87.9	29.5	2.38	4.3
Симферополь	Z	99	0.9	2	284	1.16	78.8	26.3	2.22	4.3
Симферополь	N+E	99	9.2	1.15	240	1.17	66.3	22.1	1.88	4.2
Севастополь	N	66	8.4	1.15	237	1.17	65.5	21.8	1.85	4.2
S					281	1.16	79.0	26.3	2.22	4.25
δS					0.04	0.003	0.042	0.042	0.041	0.05
№ 8 – 12 апреля: $t_0=19^h01^m55.2^s$, $\varphi=44.02^\circ$, $\lambda=34.09^\circ$, $h=28$ км, $K_{II}=9.5$										
Судак	N	120	0.3	1.6	14.1	0.84	10.6	3.53	0.21	3.4
Алушта	N	78	0.7	1.62	14.4	0.83	11.1	3.71	0.22	3.4
Севастополь	N	67	0.51	1.58	13.5	0.85	9.7	3.23	0.20	3.4
S					14.0	0.84	10.5	3.48	0.21	3.4
δS					0.008	0.003	0.017	0.018	0.012	0
№ 9 – 15 апреля: $t_0=07^h48^m37.5^s$, $\varphi=44.09^\circ$, $\lambda=34.09^\circ$, $h=35$ км, $K_{II}=8.7$										
Севастополь	N	60	0.19	1.95	4.55	0.69	6.1	2.04	0.10	3.1
Судак	N+E	114	0.13	1.9	5.89	0.71	7.3	2.44	0.12	3.1
S					5.18	0.70	6.7	2.23	0.11	3.1
δS					0.056	0.006	0.039	0.039	0.040	0
№ 10 – 18 апреля: $t_0=00^h42^m18^s$, $\varphi=44.33^\circ$, $\lambda=34.32^\circ$, $h=22$ км, $K_{II}=10.4$										
Судак	N+E	84	0.72	1.54	23.8	0.87	15.3	5.26	0.33	3.5
Севастополь	N	56	1.2	1.56	26.6	0.89	16.3	5.44	0.35	3.6
Симферополь	N+E	71	1.2	1.48	22.6	0.91	13.3	4.44	0.29	3.5
Симферополь	Z	71	0.12	2.5	27.3	0.93	14.8	4.94	0.33	3.6
S					25.0	0.90	14.9	5.01	0.32	3.55
δS					0.02	0.006	0.019	0.019	0.017	0.05
№ 11 – 20 мая: $t_0=07^h36^m14^s$, $\varphi=42.89^\circ$, $\lambda=36.54^\circ$, $h=25$ км, $K_{II}=8.6$										
Судак	N	254	0.0295	1.95	2.9	0.69	3.9	1.3	0.065	2.9
Севастополь	N	294	0.027	1.9	3.14	0.71	3.9	1.3	0.067	3.0
S					3.02	0.70	3.9	1.3	0.066	2.95
δS					0.017	0.006	0	0	0.007	0.05

Станция	Состав- ляющая	Δ , км	$\Sigma\Omega_0$, 10^{-6} м·с	f_0 , Гц	M_0 , 10^{13} Н·м	r_0 , 10^3 м	$\Delta\sigma$, 10^5 Н·м ²	ε , 10^{-6}	\bar{u} , 10^{-2} ·м	M_w
№ 12 – 21 мая: $t_0=19^h36^m54.1^s$, $\varphi=44.00^\circ$, $\lambda=34.11^\circ$, $h=28$ км, $K_{II}=10.2$										
Алушта	N	79	1.12	1.28	23.4	1.05	8.9	2.97	0.23	3.5
Судак	N	121	0.59	1.31	25.9	1.02	10.6	3.53	0.26	3.6
Симферополь	N	106	0.75	1.26	15.7	1.06	5.7	1.9	0.15	3.4
S					21.2	1.04	8.1	2.71	0.21	3.5
δS					0.066	0.005	0.080	0.08	0.072	0.1
№ 13 – 20 ноября: $t_0=06^h43^m32.0^s$, $\varphi=44.66^\circ$, $\lambda=31.02^\circ$, $h=35$ км, $K_{II}=8.7$										
Севастополь	N	211	0.044	2.0	3.68	0.67	5.3	1.78	0.09	3.0

Примечание. Жирным шрифтом выделены средние значения S .

Как видно из табл. 3, получено хорошее внутреннее согласие динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2009 г. по данным отдельных станций с малыми стандартными отклонениями δS . В связи с этим для всех изученных землетрясений восстановленные очаговые параметры можно отнести к категории очень надежных. Для большинства землетрясений индивидуальные значения моментных магнитуд M_w либо полностью совпали, либо их разброс не превысил погрешности ± 0.1 . Наибольшие значения M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , \bar{u} получены для землетрясения 12 апреля с $K_{II}=11.2$ и $h=32$ км. При этом дополнительно рассчитанные значения кажущегося напряжения и радиационного трения оказались соответственно в 3.7 и 8 раз ниже, чем для землетрясения 18 февраля близкого энергетического уровня с $K_{II}=11.1$, произошедшего в западной части Крыма на глубине $h=16$ км [10].

С использованием данных о скалярном сейсмическом моменте $M_0=2.81 \cdot 10^{15}$ Н·м параметры механизма очага землетрясения 12 апреля с $K_{II}=11.2$ [12] пересчитаны в компоненты тензора сейсмического момента (рис. 5). Тензор сейсмического момента может быть использован для расчета параметров, характеризующих вид напряженного состояния в очаге.

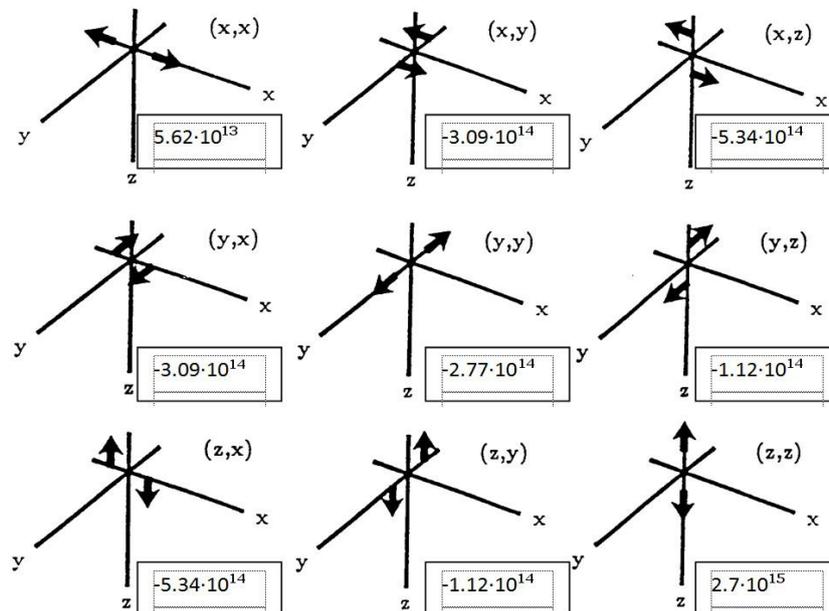


Рис. 5. Компоненты тензора сейсмического момента (Н·м)

Проведем сравнение динамических параметров очагов (сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0) землетрясений 2009 г. с долговременными зависимостями от энергии землетрясений (рис. 6), установленными ранее [17] для аналоговых сейсмических станций:

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

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

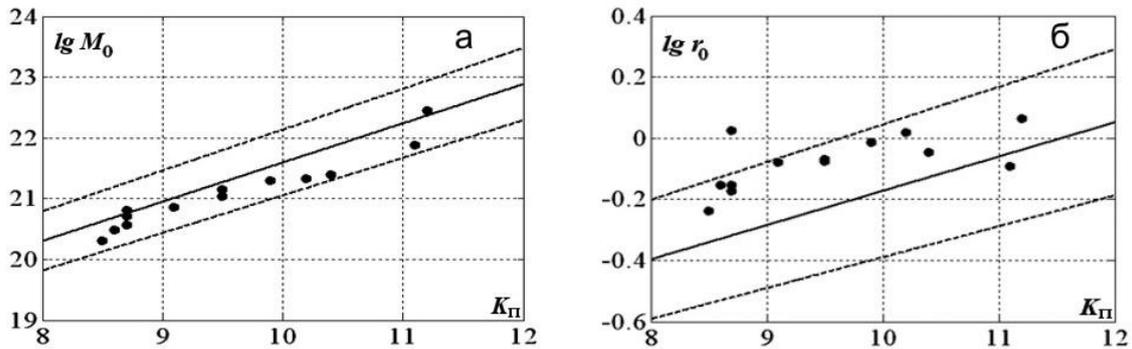


Рис. 6. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений 2009 г: сейсмического момента (а) и радиуса круговой дислокации (б) с долговременными зависимостями $M_0(K_{\Pi})$ и $r_0(K_{\Pi})$ в [17] (пунктиром обозначены пределы погрешностей)

Можно отметить (рис. 6), что практически все средние значения M_0 и r_0 удовлетворяют долговременным зависимостям $M_0(K_{\Pi})$ и $r_0(K_{\Pi})$, находясь в пределах их доверительных областей (δM_0 и δr_0). При этом для большинства землетрясений 2009 г. значения отклонений δM_0 относительно зависимости $M_0(K_{\Pi})$ имеют отрицательные значения (рис. 6 а), а радиусы круговой дислокации δr_0 – положительные (рис. 6 б). Наибольшее положительное отклонение δr_0 получено для землетрясения № 5 11 апреля в 05^h18^m с глубиной очага $h=45$ км на границе корамантия, где скорость сейсмических волн наибольшая.

Ранее [10] было высказано предположение о том, что завышенные значения r_0 для большинства землетрясений 2009 г. могут быть объяснены использованием более широкополосных цифровых сейсмических каналов (например «Судак» $\rightarrow \Delta T=0.10-5$ с [6]), по сравнению с прежними аналоговыми («Судак» $\rightarrow \Delta T=0.15-0.55$ с [18]). Это предположение должно быть проверено на более длительных рядах наблюдений для исключения возможных пространственно-временных вариаций динамических параметров очагов местных землетрясений.

Л и т е р а т у р а

1. Свидлова В.А., Пасынков Г.Д. Крым. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
2. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 249 с.
3. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2009 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2009–2010. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2009/.
4. Bulletin of the International Seismological Centre for 2009. – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2011.
5. Козиненко Н.М., Свидлова В.А., Сыччина З.Н. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крыма за 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
6. Свидлова В.А. (отв. сост.). Сейсмические станции Крыма в 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
7. 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.
8. 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.
9. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – 75. – N 26. – P. 4997–5009.
10. Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2009 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2009 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. – С. 11–23.
11. Hanks T.C., Wyss M. The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters // Bull. Seism. Soc. Am. – 1972. – 62. – N 2. – P. 561–589.

12. **Пустовитенко А.А. (отв. сост.)**. Каталог механизмов очагов землетрясений Крыма за 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
13. **Кейлис-Борок В.И.** Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Труды Геофизического института АН СССР. – 1959. – № 9(136). – С. 20–42.
14. **Aki K.** Estimation of earthquake moment released energy and stress-strain drop from G-wave spectrum // Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.– 1966. – **44**. – N 1. – P. 73–88.
15. **Hanks T.C., Kanamori H.** A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**. – N 35. – P. 2348–2350.
16. **Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Козиненко Н.М., Антонюк Г.П., Сухарина Л.И., Антонюк В.А., Курьянова И.В., Росляков А.В.** Каталог и подробные данные о землетрясениях Крымско-Черноморского региона за 2009 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2009 год. – Севастополь: НПЦ «Экоси-Гидрофизика», 2011. – С. 68–141.
17. **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.
18. **Пустовитенко А.Н., Свидлова В.А., Пустовитенко А.А., Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н.** Крым // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 58–63.