

УДК 550.348.435

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА

Пустовитенко Б.Г., Эреджесов Э.Э.

*Отдел сейсмологии Института геофизики им. С.И. Субботина НАНУ, г. Симферополь
E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

Представлены спектральные и динамические параметры очагов (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\bar{\sigma}$, $\Delta\sigma_t$, \bar{u} , E_u и M_w) 14 землетрясений Крыма с $K_{\Pi}=7.2-11.2$, восстановленные по 120 амплитудным спектрам продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных цифровыми региональными сейсмическими станциями. Наибольшие значения динамических параметров получены для ощутимого землетрясения 2 марта с $K_{\Pi}=11.2$, а наименьшие – для его слабого афтершока 6 апреля с $K_{\Pi}=7.2$. Средние значения сейсмических моментов и радиусов круговой дислокации в пределах погрешностей их определения удовлетворяют средним долговременным зависимостям параметров от энергетического уровня землетрясений, полученным по аналоговым записям. Дается анализ полученных результатов.

Ключевые слова: амплитудный спектр, модель Брюна, спектральная плотность, угловая частота, сейсмический момент, радиус дислокации, сброшенное и кажущееся напряжения, подвижка по разрыву, радиационное трение.

ВВЕДЕНИЕ

Различное сочетание полей тектонических напряжений, систем разрывных структур, геологических и прочностных свойств глубинной среды в регионе и в отдельных его частях, приводит к пространственной неоднородности несущей способности среды. Это отражается на динамических параметрах отдельных землетрясений и их групп. К динамическим параметрам очага относятся: скалярный сейсмический момент M_0 , радиус круговой дислокации r_0 , сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ε , кажущееся напряжение $\eta\bar{\sigma}$, величина радиационного трения $\Delta\sigma_t$, сейсмическая энергия E_S и средняя подвижка по разрыву \bar{u} (или величина дислокации), E_u – энергия образования дислокации в очаге.

Изучая пространственные и временные особенности динамических параметров очагов землетрясений в широком диапазоне энергий за длительное время, можно надеяться получить некоторое схематическое представление о дифференциации региона по условиям в очаговых зонах. В связи с этим ежегодное определение очаговых параметров и их оперативное опубликование является актуальным для своевременного использования в задачах геодинамических исследований.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В 2014 г. региональной сетью сейсмических станций Крыма зарегистрировано 119 местных землетрясений в диапазоне энергетических классов $K_{\Pi}=4.5-11.2$. Около 70% из них относится к слабым ($K_{\Pi} < 7$), непредставительным для региона сейсмическим событиям [1], зафиксированным только ближайшими к очаговой зоне сейсмостанциями. Для таких землетрясений основные параметры определены с

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА

меньшей надежностью и потому их записи не были привлечены для восстановления очаговых параметров. Как и в предыдущие годы для анализа выбраны все наиболее значимые представительные сейсмические события года с $K_{II} > 9.5$, а также более слабые толчки из района ощутимого землетрясения 2 марта с $K_{II} = 11.2$ и недостаточно изученных территорий северо-западной части Крыма и Азовского моря (районы 6, 7). По такому критерию за 2014 год отобрано 14 землетрясений с энергетическими классами $K_{II} = 7.2-11.2$, для расчета спектральных и динамических параметров очагов. Пространственное расположение эпицентров землетрясений, для которых восстановлены очаговые параметры, даны на рисунке 1, а их основные параметры приведены в таблице 1.

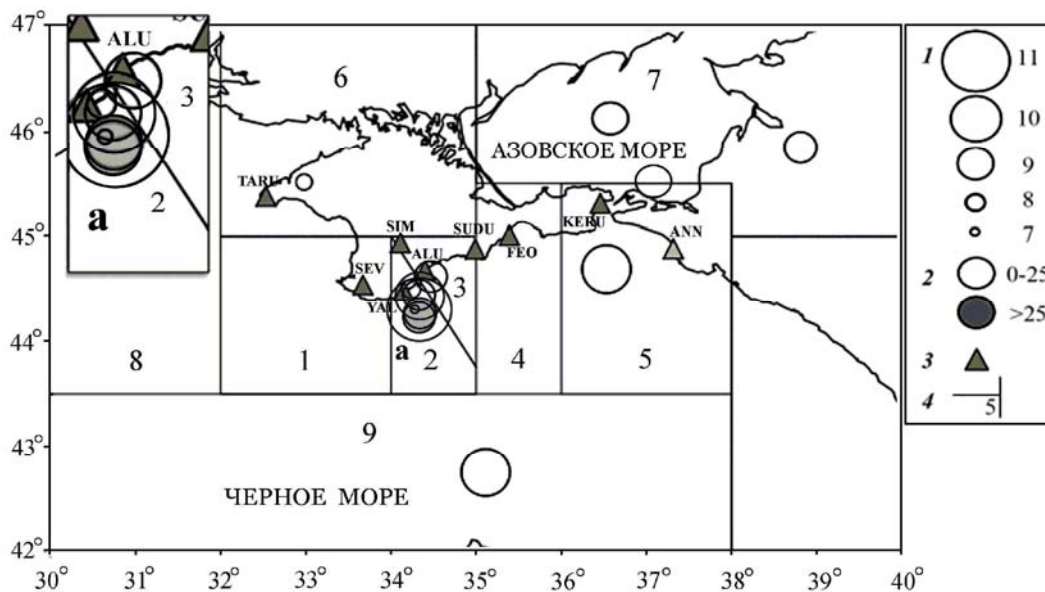


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2014 г., для которых восстановлены очаговые параметры: 1 – энергетический класс K_{II} ; 2 – глубина очага; 3 – сейсмические станции; 4 – граница районов. На врезке а представлена увеличенная карта эпицентров центральной зоны региона (районы 2–3).

Максимальное количество изученных землетрясений (7 событий), относится к Ялтинской зоне региона (район 2), три – к Азово-Кубанской (район 7) и по одному – к Алуштинской, Керченско-Анапской зоне очагов, Степному Крыму и Черноморской впадине (районы 3, 5, 6 и 9).

Таблица 1.

Основные параметры землетрясений Крыма за 2014 год,
для которых восстановлены динамические параметры очагов

№ п/п	Время возникновения землетрясения, t_0					Координаты эпицентра			Глубина очага, км		Энергетический класс		Магнитуда			Район
	месяц	день	час	мин	сек	$\varphi^{\circ}N$	$\lambda^{\circ}E$	$\delta\varphi, \delta\lambda^{\circ}$	$h, км$	$\delta h, км$	$K_{п}$	δK	M_w^*/n	δM_w	MSH	
1	1	4	7	48	0.3	46.14	36.57	0.10	6	3	9.4	0.4	3.52/7	0.14	3.3	7
2	3	2	3	34	28.3	44.30	34.33	0.01	28	1	11.2	0.2	3.95/7	0.11	3.9	2
3	3	2	18	10	25.9	44.26	34.34	0.02	26	3	8.5	0.4	2.88/4	0.14		2
4	3	17	23	13	36.0	44.43	34.34	0.01	19	1	9.8	0.4	3.31/7	0.13	3.0	2
5	3	25	17	4	40.5	44.69	36.53	0.08	13	7	9.6	0.3	3.32/7	0.12	3.2	5
6	3	29	5	41	21.1	44.44	34.33	0.01	19	1	8.6	0.4	3.05/7	0.08		2
7	3	30	7	55	59.1	45.51	32.98	0.02	21	1	8.2	0.1	3.13/4	0.09		6
8	4	6	20	47	13.2	44.30	34.28	0.02	23	2	7.2	0.1	2.63/5	0.08		2
9	4	27	2	51	33.6	44.23	34.33	0.02	22	3	8.5	0.2	2.9/6	0.12		2
10	4	28	6	30	35.8	44.62	34.47	0.01	22	1	9.3	0.3	3.44/5	0.08	2.9	3
11	6	30	15	4	43.1	45.85	38.81	0.03	9	3	8.9	0.6	3.5/1			7
12	8	20	17	5	27.2	44.49	34.25	0.01	15	1	7.9	0.2	2.83/7	0.11		2
13	10	18	15	34	54.0	42.74	35.11	0.03	5	3	10.1	0.3	3.66/5	0.13	3.7	9
14	11	9	4	8	13.7	45.51	37.07	0.06	25	6	8.5	0.2	3.05/4	0.1		7

- Значения M_w даны по результатам настоящей работы (Табл. 3);
 n – количество определений.

Для расчета амплитудных спектров и восстановления по ним динамических параметров очагов использовано 120 записей продольных (P) и поперечных (S) волн на сейсмических станциях «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU). Общая статистика использованного материала по каждой станции дана в таблице 2.

Таблица 2.

Статистика использованного материала

Сейсмическая станция	% участия	Количество спектров	Количество записей объемных волн	
			$P (Z)$	$S (N+E)$
«Алушта»	79	29	9	20
«Севастополь»	79	22	–	22
«Симферополь»	86	32	10	22
«Судак»	93	37	11	26

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА

Наибольшее количество спектров получено по записям станций «Симферополь» и «Судак». Процент участия этих же станций в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 86% и 93%. Во всех случаях стационарные определения очаговых параметров получены по полному вектору колебаний S -волны.

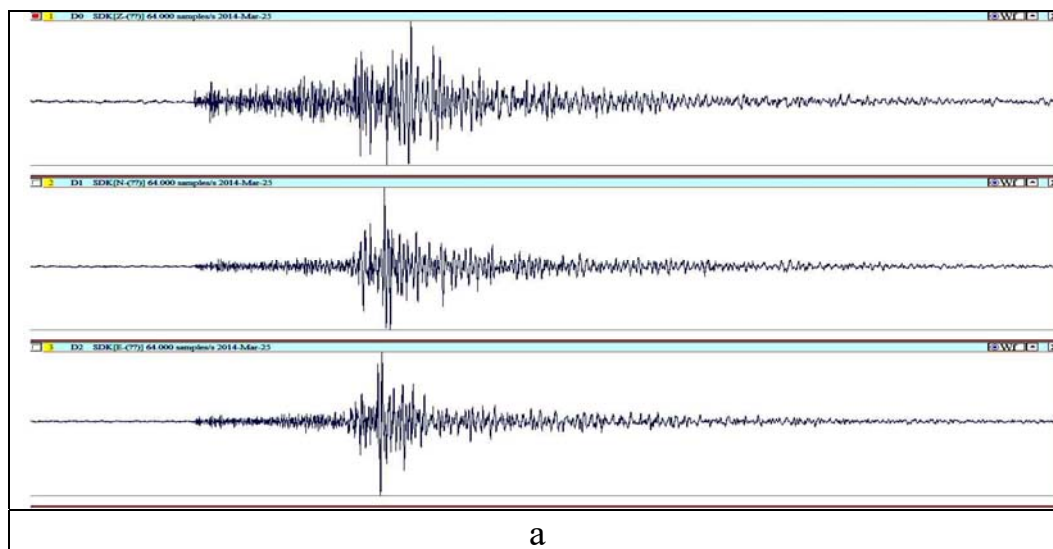
Пока не использованы для анализа записи сейсмостанций «Феодосия» и «Керчь», которые расположены в районах высокого уровня помех, соответственно, на мергелистых глинах и мшанковых известняках с пониженными прочностными свойствами и повышенным затуханием высоких частот. Сейсмические колебания от местных землетрясений на этих станциях не только осложнены микросейсмическим шумом, но и сложным образом искажены амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) среды, которую в настоящее время без специальных исследований корректно учесть не представляется возможным.

Записи сейсмостанции «Тарханкут», открытой в 2012 г. [2] также не привлечены для анализа из-за отсутствия надежных АЧХ сейсмографов и АЧХ локальных инженерно-геологических условий места расположения сейсмостанции.

На момент расчета спектров и оценки динамических параметров не были уточнены основные параметры сейсмографов сейсмостанции «Ялта» за 2014 г., в связи с этим сейсмограммы этой станции также не использованы в данной работе.

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ

Для предварительно отобранных землетрясений был проведен анализ качества сейсмограмм на сейсмических станциях с надежными амплитудно-частотными характеристиками приборов. Выбраны записи с четкими фазами объемных P и S волн, не осложненные микросейсмическим шумом с превышением полезного сигнала над фоном помех в 2 и более раза. Примеры таких записей даны на рисунке 2.



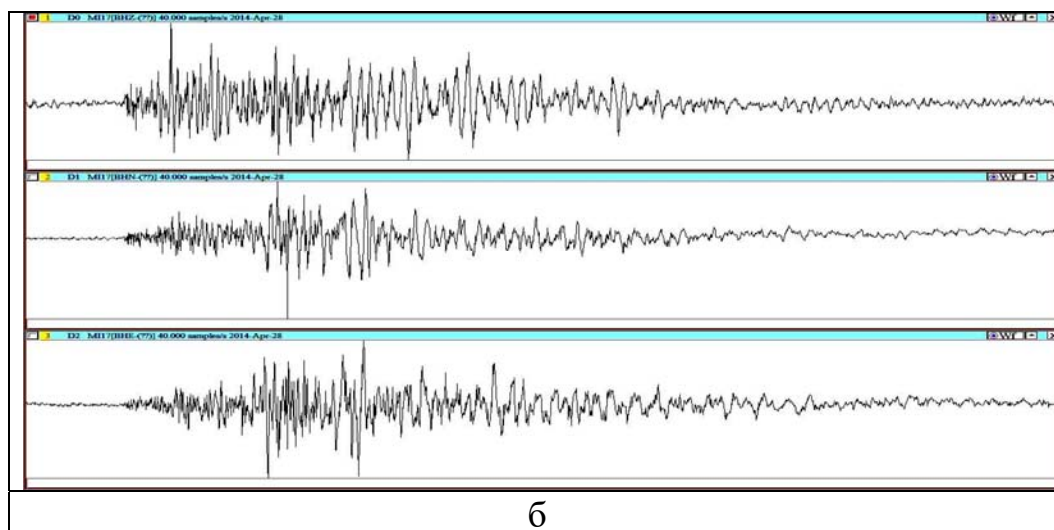


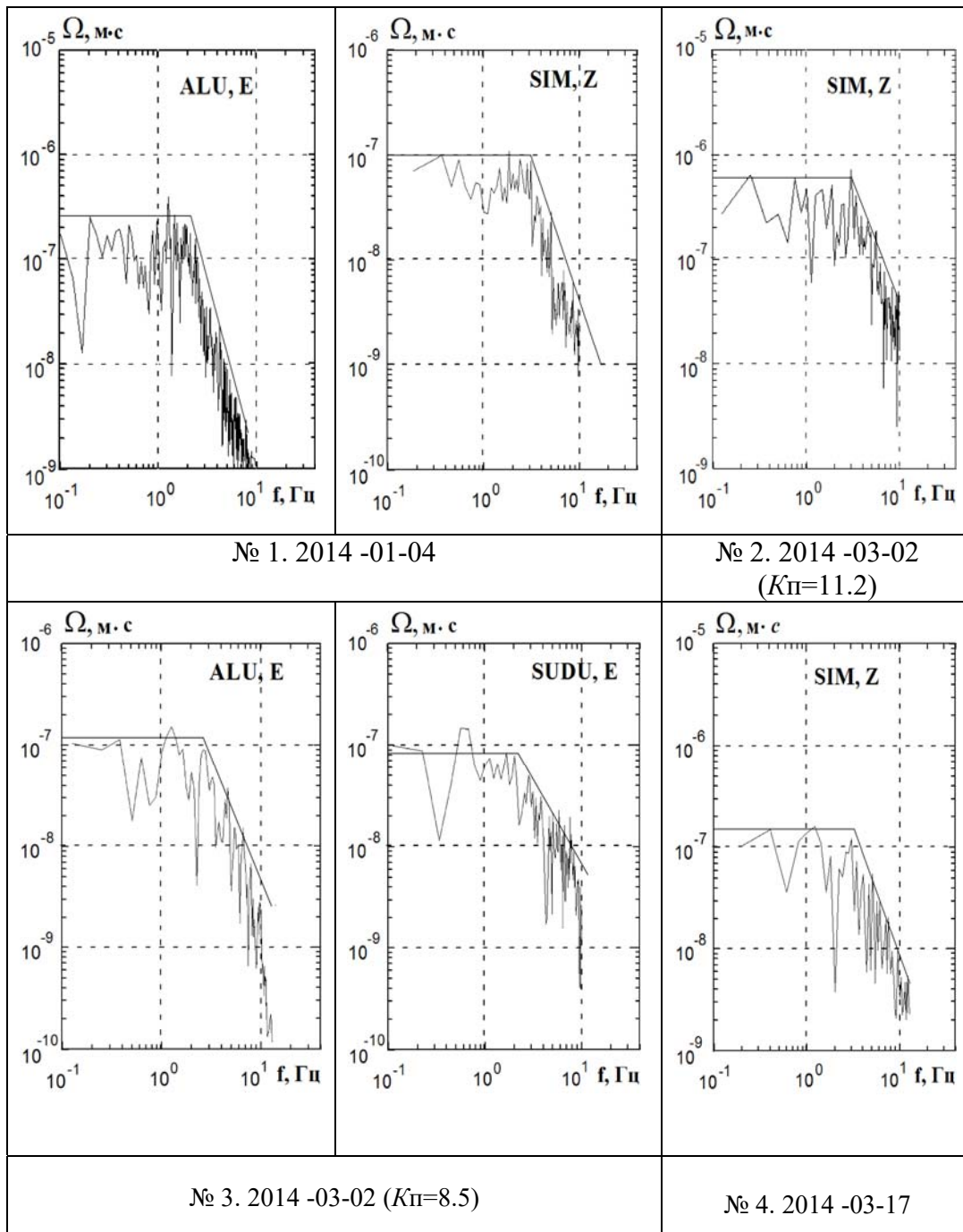
Рис. 2. Записи землетрясений 2014 г. по составляющим Z, N-S, E-W (сверху вниз): а– 25 марта с $K_{\Pi}=9.6$ (№5 по таблице 1); б– 28 апреля с $K_{\Pi}=9.3$ (№10 по таблице 1) соответственно на станциях «Судак», $\Delta=123$ км и «Симферополь», $\Delta=46$ км.

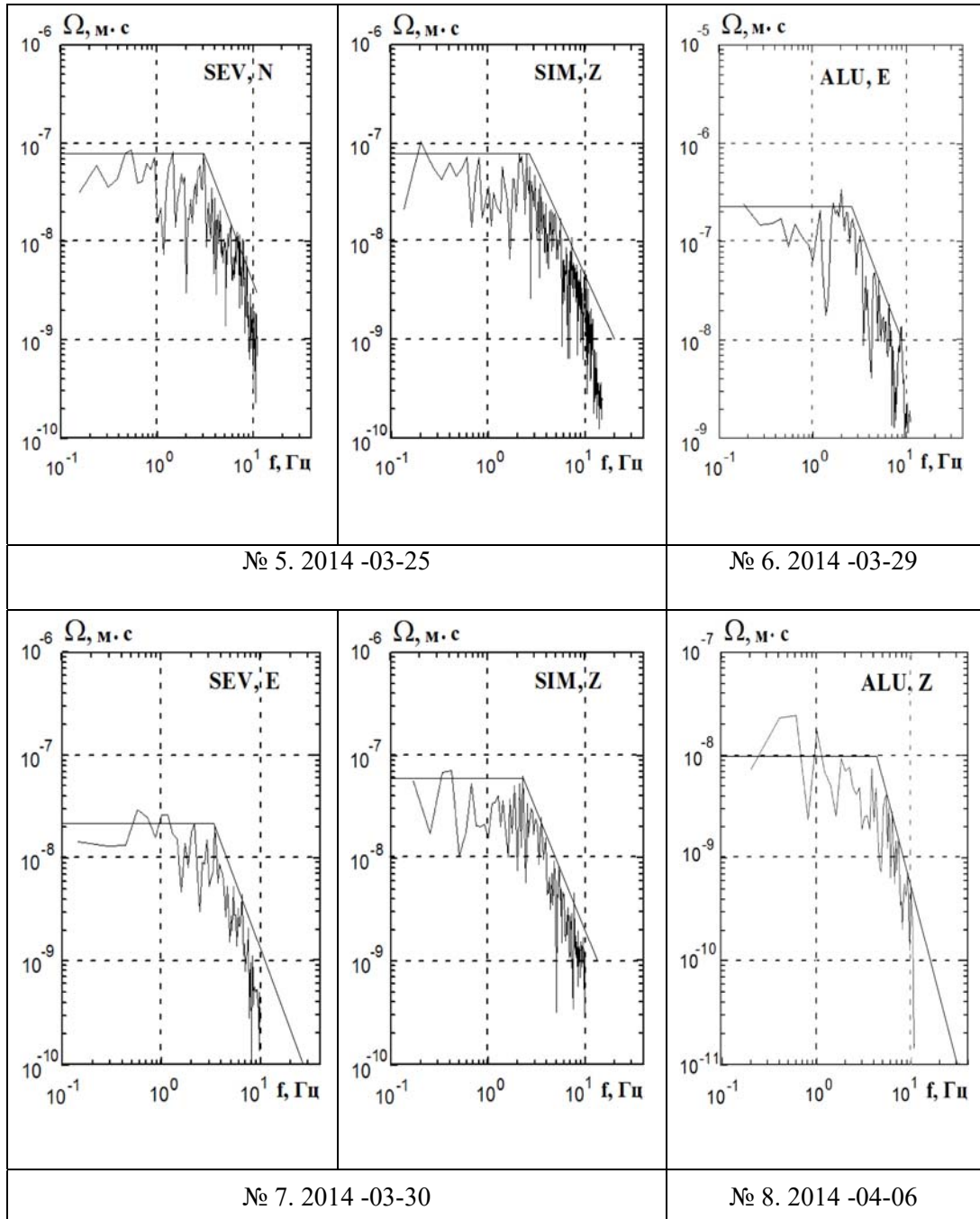
Амплитудные спектры поперечных волн (S) во всех случаях рассчитывались по двум горизонтальным составляющим (N-S) и (E-W) и вычислялся полный вектор колебаний, а продольных (P) – по вертикальной (Z). Относительная длительность τ исследуемого участка записи принята равной интервалу времени от момента вступления S - и P -волн до времени спада их максимальных амплитуд A_{\max} на уровень $1/3 A_{\max}$ [3].

Станционные амплитудные спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье. Для интерпретации выбрана теоретическая дислокационная модели Брюна (ω^{-2}) [4], согласно которой амплитудный спектр объемной волны характеризуется тремя основными параметрами: спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ в длиннопериодной части (при $f \rightarrow 0$), угловой частотой f_0 (ω_0) и углом наклона $\gamma \sim -2$. Полученные амплитудные спектры записей землетрясений Крыма за 2014 г. уверенно аппроксимируются двумя прямыми: в длиннопериодной части спектра – прямой, параллельной оси частот, в области коротких периодов – наклонной прямой с угловым коэффициентом $\gamma \sim -2$ (Рис. 3), что соответствует выбранной теоретической модели.

Как было сказано выше, всего использовано 120 записей объемных волн, по которым, соответственно, рассчитано 120 амплитудных спектров. Ввиду многочисленности их невозможно представить в данной статье в полном объеме; на рисунке 3 приведены только примеры для каждого землетрясения по разным типам волн и отдельных станций регистрации, расположенных в различных районах региона и отличающихся инженерно-геологическими свойствами подстилающих пород.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА





СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА

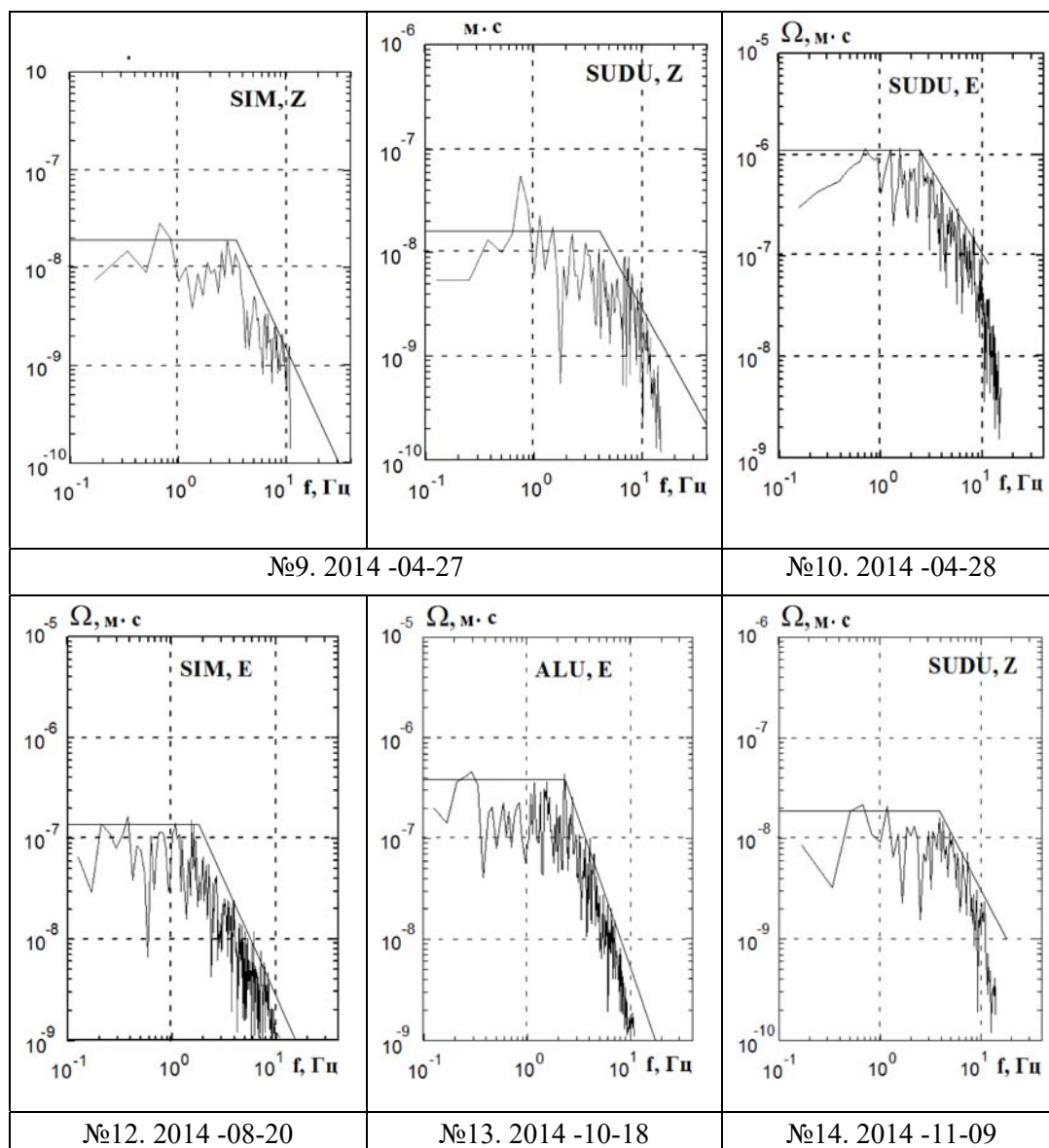


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2014 г. по записям региональных цифровых сейсмостанций и их аппроксимация в рамках теоретической модели Брюна. Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в таблице 1.

3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА

Согласно теоретической дислокационной модели Брюна [4] спектральная

плотность Ω_0 пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 , а угловая частота f_0 прямо связана с размером дислокации r_0 .

Формула для расчета M_0 по стационарному спектру имеет вид:

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

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; V – скорость распространения объемной волны; ρ – плотность пород в окрестности очага, $R_{\theta\phi}$ – направленность излучения из очага на станцию регистрации; $G(\Delta, h)$ – 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 работах [3, 5, 6] и не изменилась по сравнению с предыдущими годами.

Геометрические размеры очага 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:

$$r_0 = 2.34 \frac{V_P}{2\pi f_0} \quad (2)$$

По найденным значениям сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 с использованием формул из работ [3–5, 7, 8] определены другие динамические параметры очагов: сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ϵ , кажущееся напряжение $\eta\bar{\sigma}$, величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$, сейсмическая энергия E_s , средняя подвижка по разрыву \bar{u} (или величина дислокации), энергия образования дислокации в очаге E_u и моментная магнитуда M_w (Табл. 2). Моментная магнитуда рассчитана по индивидуальным оценкам сейсмических моментов M_0 (выраженных в *дин·см*) с использованием формулы Канамори [9]:

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

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

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

Большинство динамических параметров получено по группе независимых стационарных определений. Только для одного слабого сейсмического толчка (№11), произошедшего на Тарханкутском полуострове (район 6), динамические параметры рассчитаны по записям *S*-волны на ближайшей к очагу станции «Севастополь».

Осреднение стационарных динамических параметров (кроме радиационного трения $\Delta\sigma_r$) и вычисление их стандартных отклонений проведены, как и прежде, с учетом логнормального закона распределения величин [3]. Стационарные значения $\Delta\sigma_r$ получились знакопеременными, поэтому их среднее значение вычислено по

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА

среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\overline{\eta\sigma}$ по формуле [7]: $\Delta\sigma_r = 1/2\Delta\sigma - \overline{\eta\sigma}$. В этом случае графа в таблице 3 «стандартное отклонение» не заполнялась. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Результаты расчета стационарных и средних для землетрясения динамических параметров представлены в таблице 3. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ , км, тип использованной волны (P , S) и составляющая записи, где (N+E) – полный вектор колебаний по N+S и E-W.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Восстановленные значения динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2014 год уверенно относятся к категории надежных. Преобладающее большинство из них получено по группе станций с использованием как продольных, так и поперечных волн. Количественные параметры амплитудного стационарного спектра существенно зависят от энергии в очаге, направленности излучения на станцию регистрации, свойств глубинной среды на пути распространения сейсмических волн и под станцией регистрации, а также от ряда факторов, которые трудно учесть. Поэтому для надежных оценок очаговых параметров в работе использованы не только записи нескольких станций, но и разных типов волн. В осреднении очаговых параметров участвовало от четырех до семи стационарных определений, что обеспечило малую величину стандартного отклонения δX , показателя степени рассеяния индивидуальных оценок.

Таблица 3.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2014 год

Станция	Волна	Составляющая	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	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\dot{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^8$, Дж	M_w^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№ 1. 4 января; $t_0=7$ ч 48 мин 0.3 с; $\varphi = 46.14^\circ$, $\lambda = 36.57^\circ$; $h = 6$ км; $K_{II}=9.4$															
ALU	P	Z	234	0.041		3.2	9.43	0.58	2.1	7.0	0.3	1.59	-0.55	3.3	3.25
ALU	S	N+E	234		0.41	2.1	20.4	0.53	5.9	19.7	0.76	0.74	2.2	20.1	3.48
SEV	S	N+E	287		0.39	2.1	23.7	0.53	6.9	23.0	0.89	0.63	2.8	27.3	3.52
SIM	P	Z	233	0.1		3.25	11.4	0.57	2.66	8.9	0.37	1.31	0.02	5.1	3.31
SIM	S	N+E	233		1.41	2.1	34.9	0.53	10.1	33.8	1.31	0.43	4.63	58.9	3.63
SUDU	P	Z	186	0.22		3.1	40.2	0.60	8.11	27.0	1.18	0.37	3.68	54.2	3.67
SUDU	S	N+E	186		1.44	2.0	56.8	0.56	14.2	47.5	1.93	0.26	6.86	135.0	3.77
X- среднее значение							23.65	0.56	5.95	19.87	0.81	0.63	2.35	23.52	3.52
стандартное отклонение							0.11	0.01	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.22	0.14

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
№ 2. 2 марта. $t_0=3$ ч 34 мин 28.3 с; $\varphi = 44.30^\circ$, $\lambda = 34. 33^\circ$; $h = 28$ км; $K_{II} = 11.2$															
ALU	P	Z	43	1.5		2.75	135.0	0.89	8.3	27.7	1.8	3.51	0.64	187.0	4.02
ALU	S	N+E	43		3.5	1.85	60.3	0.76	5.9	19.6	1.1	7.88	-4.94	59.2	3.79
SEV	S	N+E	59		1.95	1.9	64.3	0.74	5.8	22.7	1.23	7.39	-3.98	73.0	3.81
SIM	P	Z	75	0.75		2.9	78.9	0.85	5.7	18.9	1.16	6.03	-3.19	74.5	3.87
SIM	S	N+E	75		8.15	1.6	164.0	0.88	10.3	34.5	2.22	2.91	2.26	282.0	4.08
SUDU	P	Z	84	0.5		2.8	115.0	0.88	7.4	24.8	1.59	4.13	-3.99	143.0	3.98
SUDU	S	N+E	84		4.5	1.8	198.0	0.79	17.8	59.4	3.4	2.4	6.51	588.0	4.13
X- среднее значение							106.38	0.83	8.05	27.48	1.65	4.47	-0.44	146.2	3.95
стандартное отклонение							0.08	0.01	0.07	0.07	0.07	0.08		0.14	0.11
№ 3. 2 марта. $t_0=18$ ч 10 мин 25.9 с; $\varphi = 44.26^\circ$, $\lambda = 34. 34^\circ$; $h = 26$ км; $K_{II} = 8.5$															
ALU	P	Z	47	0.01		5.0	0.94	0.49	0.35	1.16	0.04	2.01	-1.84	0.05	2.59
ALU	S	N+E	47		0.15	2.9	2.69	0.49	1.01	3.38	0.12	0.7	-0.19	0.46	2.89
SIM	S	N+E	79		0.15	2.5	3.13	0.57	0.76	2.52	0.1	0.6	-0.22	0.39	2.93
SUDU	S	N+E	87		0.12	2.8	5.48	0.51	1.86	6.19	0.23	0.35	0.58	1.69	3.1
X- среднее значение							2.57	0.51	0.84	2.8	0.1	0.74	-0.32	0.35	2.88
стандартное отклонение							0.16	0.02	0.15	0.15	0.16	0.16		0.32	0.14
№ 4. 17 марта. $t_0=23$ ч 13 мин 36.0 с; $\varphi = 44.43^\circ$, $\lambda = 34. 34^\circ$; $h = 19$ км; $K_{II} = 9.8$															
ALU	P	Z	28	0.15		3.6	7.06	0.65	1.14	3.81	0.18	4.25	-3.68	1.35	3.17
ALU	S	N+E	28		0.7	2.3	6.3	0.58	1.39	4.64	0.2	4.76	-4.06	1.46	3.14
SEV	S	N+E	54		0.4	2.85	9.05	0.47	3.8	12.7	0.43	3.31	-1.41	5.74	3.24
SIM	P	Z	60	0.14		3.9	9.09	0.6	1.87	6.23	0.27	3.3	-2.37	2.83	3.24
SIM	S	N+E	60		1.64	2.1	20.2	0.64	3.4	11.3	0.53	1.48	-0.21	11.5	3.47
SUDU	P	Z	73	0.1		3.8	15.7	0.61	3.0	9.97	0.44	1.91	-0.41	7.84	3.4
SUDU	S	N+E	73		0.8	2.15	24.0	0.62	4.3	14.5	0.65	1.25	0.92	17.4	3.52
X- среднее значение							11.58	0.59	2.43	8.1	0.35	2.59	-1.38	4.69	3.31
стандартное отклонение							0.09	0.02	0.09	0.09	0.08	0.09		0.16	0.13
№ 5. 25 марта. $t_0=17$ ч 4 мин 40.5 с; $\varphi = 44.69^\circ$, $\lambda = 36. 53^\circ$; $h = 13$ км; $K_{II} = 9.6$															
ALU	P	Z	169	0.012		3.5	4.21	0.67	0.63	2.1	0.1	5.05	-4.73	0.44	3.02
ALU	S	N+E	169		0.15	2.3	10.0	0.58	2.2	7.4	0.31	2.1	-1.0	3.87	3.27
SEV	S	N+E	227		0.11	2.6	9.86	0.52	3.15	10.5	0.39	2.15	-0.58	5.15	3.27
SIM	P	Z	193	0.08		3.2	15.9	0.73	1.8	6.0	0.32	1.33	-0.43	4.82	3.4
SIM	S	N+E	193		0.32	2.05	12.2	0.65	1.9	6.3	0.30	1.74	-0.79	3.87	3.33
SUDU	P	Z	123	0.06		4.0	15.3	0.58	3.4	11.3	0.48	1.39	0.31	8.67	3.39
SUDU	S	N+E	123		0.6	2.2	29.3	0.61	5.65	18.8	0.84	0.73	-2.1	27.6	3.58
X- среднее значение							12.01	0.62	2.24	7.48	0.33	1.77	-0.65	4.53	3.32
стандартное отклонение							0.1	0.02	0.11	0.11	0.11	0.1		0.2	0.12
№ 6. 29 марта. $t_0=5$ ч 41 мин 21.1 с; $\varphi = 44.44^\circ$, $\lambda = 34. 33^\circ$; $h = 19$ км; $K_{II} = 8.6$															
ALU	P	Z	28	0.06		4.0	2.82	0.58	0.63	2.1	0.09	0.95	-0.63	0.29	2.9
ALU	S	N+E	28		0.46	2.5	4.14	0.54	1.17	3.9	0.15	0.65	-0.06	0.81	3.0
SEV	S	N+E	53		0.16	2.3	3.55	0.58	0.78	2.6	0.11	0.75	-0.36	0.47	2.97
SIM	P	Z	59	0.1		3.5	6.61	0.67	0.98	3.28	0.16	0.4	-0.09	1.08	3.15

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SIM	S	N+E	59		0.43	2.15	5.43	0.62	0.98	3.26	0.15	0.49	-0.003	0.89	3.09
SUDU	P	Z	73	0.03		4.0	4.65	0.58	1.03	3.44	0.15	0.57	-0.06	0.8	3.05
SUDU	S	N+E	73		0.24	2.25	7.1	0.60	1.74	4.9	0.21	0.38	0.36	1.74	3.17
X- среднее значение							4.68	0.59	1	3.25	0.14	0.57	-0.07	0.76	3.05
стандартное отклонение							0.05	0.01	0.05	0.04	0.04	0.05		0.09	0.08
№ 7. 30 марта. $t_0=7$ ч 55 мин 59.1 с; $\varphi = 45.51^\circ$, $\lambda = 32.98^\circ$; $h = 21$ км; $K_{II}=8.2$															
SEV	S	N+E	121		0.07	2.9	3.35	0.46	1.48	4.95	0.17	0.4	0.3	0.83	2.95
SIM	P	Z	108	0.06		3.0	6.7	0.78	0.63	2.1	0.12	0.2	0.11	0.7	3.15
SIM	S	N+E	108		0.4	2.0	8.53	0.67	1.24	4.13	0.2	0.16	0.46	1.76	3.22
SUDU	S	N+E	173		0.12	2.25	8.2	0.6	1.7	5.65	0.25	0.16	0.68	2.32	3.21
X- среднее значение							6.29	0.62	1.18	3.95	0.18	0.21	0.38	1.24	3.13
стандартное отклонение							0.09	0.05	0.1	0.1	0.07	0.09	0.17	0.13	0.09
№ 8. 6 апреля. $t_0=20$ ч 47 мин 13.2 с; $\varphi = 44.30^\circ$, $\lambda = 34.28^\circ$; $h = 23$ км; $K_{II}=7.2$															
ALU	P	Z	44	0.01		4.2	0.68	0.55	0.18	0.58	0.02	0.25	-0.16	0.02	2.49
ALU	S	N+E	44		0.075	2.8	0.98	0.48	0.39	1.3	0.04	0.17	0.02	0.06	2.6
SEV	S	N+E	55		0.04	2.4	0.94	0.56	0.24	0.79	0.03	0.18	-0.06	0.04	2.6
SUDU	P	Z	87	0.008		4.0	1.49	0.58	0.33	1.11	0.05	0.11	0.05	0.08	2.72
SUDU	S	N+E	87		0.045	2.3	1.61	0.58	0.35	1.18	0.05	0.1	0.07	0.09	2.74
X- среднее значение							1.08	0.55	0.29	0.95	0.04	0.15	-0.01	0.05	2.63
стандартное отклонение							0.07	0.02	0.06	0.06	0.08	0.07		0.12	0.08
№ 9. 27 апреля. $t_0=2$ ч 51 мин 33.6 с; $\varphi = 44.23^\circ$, $\lambda = 34.33^\circ$; $h = 22$ км; $K_{II}=8.5$															
ALU	P	Z	51	0.02		5.0	1.52	0.47	0.66	2.2	0.07	1.25	-0.9	0.17	2.72
ALU	S	N+E	51		0.15	2.75	2.18	0.49	0.82	2.7	0.09	0.87	-0.46	0.3	2.83
SIM	P	Z	82	0.02		4.0	1.75	0.58	0.39	1.3	0.06	1.1	-0.88	0.11	2.77
SIM	S	N+E	82		0.25	2.85	4.19	0.47	1.76	5.9	0.2	0.45	0.43	1.23	3.02
SUDU	P	Z	90	0.018		5.0	3.44	0.47	1.49	5.0	0.17	0.55	0.2	0.86	2.96
SUDU	S	N+E	90		0.14	2.8	5.12	0.48	2.04	6.8	0.24	0.37	0.65	1.74	3.08
X- среднее значение							2.75	0.49	1.02	3.4	0.12	0.69	-0.18	0.47	2.9
стандартное отклонение							0.09	0.01	0.11	0.11	0.1	0.09		0.2	0.12
№ 10. 28 апреля. $t_0=6$ ч 30 мин 35.8 с; $\varphi = 44.62^\circ$, $\lambda = 34.47^\circ$; $h = 22$ км; $K_{II}=9.3$															
SEV	S	N+E	63		0.64	2.15	17.0	0.62	3.07	10.2	0.46	0.63	0.9	8.69	3.42
SIM	P	Z	46	0.39		3.8	20.4	0.61	3.83	13.0	0.58	0.53	1.42	13.2	3.48
SIM	S	N+E	46		1.56	2.1	16.6	0.64	2.63	8.75	0.41	0.68	0.63	6.84	3.4
SUDU	P	Z	51	0.1		4.2	11.4	0.55	2.93	9.76	0.39	0.93	0.53	5.56	3.31
SUDU	S	N+E	51		1.4	2.2	30.5	0.61	5.89	19.6	0.87	0.35	2.6	29.9	3.59
X- среднее значение							18.21	0.61	3.51	11.73	0.52	0.59	1.17	10.55	3.44
стандартное отклонение							0.07	0.01	0.06	0.06	0.06	0.07	0.13	0.13	0.08
№ 11. 30 июня. $t_0=15$ ч 4 мин 43.1 с; $\varphi = 45.85^\circ$, $\lambda = 38.81^\circ$; $h = 9$ км; $K_{II}=8.9$															
SEV	S	N+E	427		0.16	2.0	22.8	0.63	3.92	13.1	0.6	0.23	1.7	14.9	3.51
№ 12. 20 августа. $t_0=17$ ч 5 мин 27.2 с; $\varphi = 44.49^\circ$, $\lambda = 34.25^\circ$; $h = 15$ км; $K_{II}=7.9$															
ALU	P	Z	24	0.02		5.1	1.18	0.46	0.54	1.86	0.06	0.57	-0.29	0.11	2.65
ALU	S	N+E	24		0.15	3.1	1.7	0.43	0.92	3.06	0.09	0.4	0.06	0.26	2.76
SEV	S	N+E	46		0.1	3.15	1.92	0.43	1.1	3.6	0.11	0.35	0.19	0.35	2.79
SIM	P	Z	52	0.05		3.9	2.79	0.6	0.57	1.91	0.08	0.41	0.46	0.27	2.9

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SIM	S	N+E	52		0.2	2.5	2.13	0.54	0.6	2.02	0.08	0.31	-0.01	0.21	2.82
SUDU	P	Z	73	0.01		5.05	1.55	0.46	0.69	2.31	0.08	0.43	-0.08	0.18	2.73
SUDU	S	N+E	73		0.21	3.0	6.22	0.45	3.05	10.2	0.33	0.11	1.42	3.2	3.13
X- среднее значение							2.16	0.48	0.88	2.93	0.1	0.34	0.1	0.32	2.83
стандартное отклонение							0.09	0.02	0.1	0.1	0.09	0.09		0.18	0.11
№ 13. 18 октября. $t_0=15$ ч 34 мин 54.0 с; $\varphi = 42.74^\circ$, $\lambda = 35.11^\circ$; $h = 5$ км; $K_{\Pi}=10.1$															
SEV	S	N+E	232		0.3	2.05	14.8	0.55	4.0	13.3	0.53	4.05	-2.1	9.82	3.38
SIM	P	Z	255	0.3		3.3	37.6	0.56	9.15	30.5	1.25	1.59	2.9	57.3	3.65
SIM	S	N+E	255		1.2	2.0	32.5	0.56	8.15	27.5	1.1	1.84	2.2	44.1	3.61
SUDU	P	Z	240	0.25		3.1	58.9	0.6	11.9	39.5	1.73	1.02	4.9	117.0	3.78
SUDU	S	N+E	240		1.5	2.1	76.3	0.53	22.2	73.9	2.86	0.78	10.3	282.0	3.86
X- среднее значение							38.19	0.56	9.53	31.81	1.29	1.57	3.2	60.62	3.66
стандартное отклонение							0.12	0.01	0.12	0.12	0.12	0.12		0.24	0.13
№ 14. 9 ноября. $t_0=4$ ч 8 мин 13.7 с; $\varphi = 45.51^\circ$, $\lambda = 37.07^\circ$; $h = 25$ км; $K_{\Pi}=8.5$															
ALU	S	N+E	228		0.04	3.3	2.44	0.41	1.59	5.3	0.16	0.78	0.02	0.65	2.86
SEV	S	N+E	287		0.04	3.1	4.53	0.43	2.45	8.2	0.26	0.42	0.8	1.85	3.04
SUDU	P	Z	176	0.02		4.1	7.29	0.57	1.74	5.8	0.24	0.26	0.61	2.12	3.18
SUDU	S	N+E	176		0.08	3.0	5.57	0.45	2.73	9.1	0.3	0.34	1.03	2.54	3.1
X- среднее значение							4.6	0.46	2.07	6.92	0.23	0.41	0.63	1.6	3.05
стандартное отклонение							0.1	0.03	0.06	0.06	0.06	0.1	0.4	0.13	0.1

Наилучшая сходимость станционных определений получена для радиуса круговой дислокации ($\delta r_0 = 0.01 \div 0.05$), величина которого в явном виде не зависит от направленности излучения энергии из очага и условий среды под станцией регистрации. Стандартные отклонения по другим параметрам для большинства землетрясений менее $\delta X < 0.1$. Исключение составляют только очаговые параметры двух одинаковых по энергии сейсмических событий ($K_{\Pi}=8.5$): 2 марта (№3) и 9 ноября (№13), для которых степень рассеяния индивидуальных определений оказалась наибольшей: $\delta X = 0.12 \div 0.32$. Уверенно определены средние значения моментных магнитуд M_w с погрешностью не выше ± 0.14 или округленно ± 0.1 . Для магнитудных оценок это очень высокая точность.

Наибольшие значения динамических параметров (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\bar{\sigma}$, \bar{u} , E_u и M_w) получены для очага ощутимого землетрясения 2 марта с $K_{\Pi} = 11.2$, произошедшего в центральной части региона (район 2) на глубине $h = 28$ км (№2), а наименьшие – для его слабого афтершока 6 апреля с $K_{\Pi} = 7.2$ (№8). При этом отметим, что радиационное трение $\Delta\sigma$ для всех исследованных очагов зоны ощутимого землетрясения 2 марта имело отрицательное значение, указывая на сложное скольжение разрыва в очаге за счет неравномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в данной очаговой зоне. Во всем диапазоне энергий величина сброшенных напряжений не превысила $\Delta\sigma = 10^6$ Па (10 бар), а кажущихся напряжений $\eta\bar{\sigma} < 5 \cdot 10^5$ Па (5 бар).

Предварительные оценки станционных определений по данным за 2014 год показали, что динамические параметры, восстановленные по станциям «Алушта» и

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА

«Севастополь» примерно в 2–3 раза ниже значений по записям станции «Судак», а по станции «Симферополь» – результаты близки к средним значениям по группе станций. В дальнейшем предполагается на статистически значимом материале установить являются ли станционные отклонения систематическими для всех очаговых зон и глубин очагов для введения соответствующих поправок.

Проведем сравнение полученных в 2014 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами, установленными по аналоговым записям [3, 10] (Рис. 4). Сравнение, как и в предыдущие годы [11–15], проведено только для сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 , поскольку они являются главными, определяемыми непосредственно по спектрам записей сейсмических колебаний, а остальные параметры вычисляются по их значениям. Для сравнения использованы зависимости $M_0(K_{\Pi})$ и $r_0(K_{\Pi})$ из [10].

Как видно из рисунка 4, для большинства землетрясений 2014 г. средние значения M_0 и r_0 находятся в пределах доверительных областей долговременных зависимостей $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$. При этом значения M_0 были равномерно распределены относительно регрессии $M_0(K_{\Pi})$, а r_0 – в двух случаях имели наибольшие положительные отклонения δr_0 от зависимости $r_0(K_{\Pi})$. Это относится к сравнительно слабым землетрясениям 30 марта в 07ч 55мин с $K_{\Pi}=8.2$ и $h=21$ км (№7) из Северо-западного района (район 6) и 6 апреля в 20ч 47мин с $K_{\Pi}=7.2$ и $h=23$ км (№8) из центральной зоны региона (район 2).

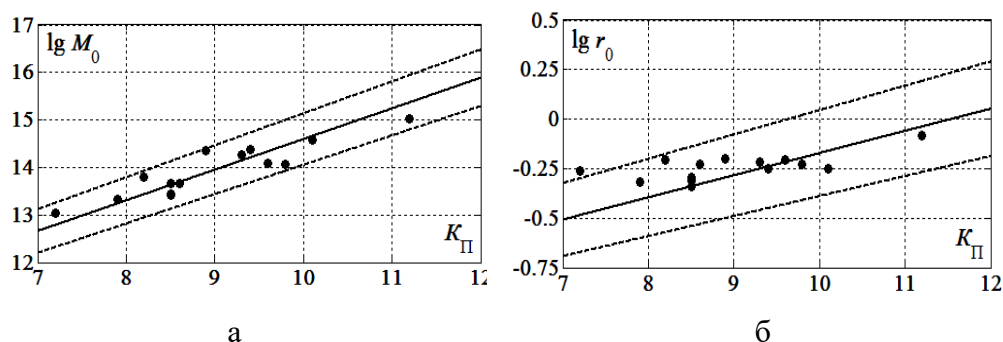


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2014 г.: а – сейсмического момента M_0 и б – радиуса круговой дислокации r_0 с долговременными зависимостями $M_0(K_{\Pi})$ и $r_0(K_{\Pi})$ [10]. Пунктиром обозначены пределы погрешностей.

Завышение значений r_0 для сейсмических событий низкого энергетического уровня может быть связано не только с естественными особенностями очагов, но с меньшей точностью определения глубин очагов и, соответственно, выбором скоростной модели среды для этих глубин. Как следует из формулы (2), размеры радиуса дислокации r_0 прямо связаны со скоростью распространения сейсмических волн. Не исключены также и погрешности, связанные с суперпозицией слабых сейсмических колебаний и микросейсмического фона, искажающего амплитудный

спектр. Эти вопросы требуют специальной детальной проработки на представительном материале.

Дополнительно можно отметить, что предварительные расчеты спектров и анализ полученных материалов по станциям «Феодосия» и «Керчь» за 2014 г. показали, что спектральная плотность и, соответственно, рассчитанный сейсмический момент по этим станциям на порядок ниже, чем среднее значение по группе других станций Крыма, а угловая частота существенно сдвинута в область низкой частоты. Без специальной проверки и установления причин таких отклонений результаты расчетов по этим станциям в данной работе не использованы и пока не публикуются.

Список литературы

1. Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Пасынков Г.Д. Оценка представительности землетрясений Крыма по материалам цифровых станций // Сейсмологический бюллетень Украины за 2009 год. Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2011. С. 65–67.
2. Свидлова В.А., Пасынков Г.Д. Сейсмичность Крыма в 2012 году // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 год. Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2013. С. 6–10.
3. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
4. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J.Geophys. Res. 1970. V.75, № 26. P. 4997–5009.
5. 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 станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 66–79.
6. 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 Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. 1985. №2. С. 60–70.
7. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
8. Кейлис-Борок В.И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Труды Геофизического Института АН СССР. 1959, № 9 (136). С. 20–42.
9. Hanks T.C., Kanamori H.A. Moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 1979. Т. 84. № 35. P. 2348–2350.
10. 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.
11. Пустовитенко Б.Г., Калинин И.В., Мержей 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.
12. Пустовитенко Б. Г., Калинин И. В., Мержей Е. А. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2010 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2010 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. С. 11–23.
13. Пустовитенко Б. Г., Калинин И. В., Мержей Е. А., Пустовитенко А. А. Очаговые параметры землетрясений Крыма 2011 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2011 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. С. 17–35.
14. Пустовитенко Б.Г., Калинин И.В., Мержей Е.А., Пустовитенко А.А. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2012 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013. С. 11–21.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2014 ГОДА

15. Пустовитенко Б.Г., Мерзей Е.А., Пустовитенко А.А., Калинюк И.В. Очаговые параметры землетрясений Крыма 2013 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ Гидрофизика», 2014. С. 12–21.

SPECTRAL AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE FOCI
OF 2014 CRIMEAN EARTHQUAKES

Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E.

*Seismology Department of S.I. Subbotin Geophysics Institute UNAS, Simferopol
E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

The spectral and dynamic source parameters ($(M_0, r_0, \Delta\sigma, \varepsilon, \overline{\eta\sigma}, \Delta, u, Eu$ и $Mw)$) of 14 Crimean earthquakes with $K_{II} = 7.2-11.2$, restored by 120 amplitude spectra of longitudinal and transverse seismic waves recorded by digital regional seismic stations have been shown. Approximation of the spectra and the source dynamic parameters calculation based on their parameters has been performed in the framework of the the Brune dislocation model. The highest values of dynamic parameters have been obtained for the perceptible earthquake on March 2 with $K_{II} = 11.2$, and the lowest have been obtained for its weak aftershock on April 6 with $K_{II} = 7.2$. Negative values of the radiation friction are characteristic of all studied sources of March 2 perceptible earthquake zone which indicates unequal distribution of the strength properties of the depth media in the focal zone. Within the total range of energies the value of the stress drop does not exceed $\Delta\sigma = 10^6$ (10 bar), and the apparent stress drop does not exceed $\overline{\eta\sigma} < 5 \cdot 10^5$ Pa (5 bar). The average values of seismic moments and circular dislocation radius within the errors of their determination match the average long-term correlations of the parameters on the earthquake energy level obtained by the analog recording. The analysis of the results has been presented.

Keywords: amplitude spectrum, Bruno model, spectral density, the angular frequency, seismic moment, dislocation radius, apparent stress drop, radiation friction.

References

1. Svidlova V.A., Sicchina Z.N., Pasinkov G.D. Evaluation of the Crimean earthquakes representativeness by the materials of the digital stations // Seismological Bulletin of Ukraine for the year 2009. The Sevastopol, SPC "Eco-Hydrophysics", 2011. P. 65–67.
2. Svidlova V.A., Pasinkov G.D. Seismicity of the Crimea in 2012 // Seismological Bulletin of Ukraine for the year 2012. The Sevastopol, SPC "Eco-Hydrophysics", 2013. P. 6–10.
3. Pustovitenko B.G., Panteleyeva T.A. Spectral and focal parameters of earthquakes of the Crimea. – Kiev: Naukova Dumka, 1990. 251 p.
4. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J.Geophys. Res. 1970. V.75, № 26. P. 4997–5009.
5. Aptekman J.Ya., Belavina Yu.F., Zakharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., and Polikarpova L.A., Chepkunas L.S. Spectra of P-waves in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. The transition from station to focal range and the calculation of dynamic source parameters // Volcanology and seismology, 1989, №. 2. P. 66–79.

6. Aptekman J.Ya., Daragan S.K., Dolgoplov V.V., Zakharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., and Polikarpova L.A., Chepkunas L.S. Spectra of P-waves in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. Harmonization of raw data and the procedure of calculating the amplitude spectra // *Volcanology and seismology*, 1985. №2. P. 60–70.
7. Kostrov B.V. Mechanics of the tectonic earthquake focus. M.: Nauka, 1975. 179 p.
8. Keilis-Borok V.I. Study of the sources, approximately equivalent to the foci of earthquakes // *Proc. Geophysical Institute of Academy of Sciences of the USSR*. 1959, № 9 (136). P. 20–42.
9. Hanks T.C., Kanamori H.A. Moment magnitude scale // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. № 35. P. 2348–2350.
10. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Kapitanova S.A., Porechnova E.I. Spatial features of focal parameters of earthquakes in the Crimea // *the Seismicity of Northern Eurasia*, Obninsk: GS RAS, 2008. – P. 238–242.
11. Pustovitenko B.G., Kalinyuk I.V., Merzhey E.A. Spectral and dynamic parameters of the foci of earthquakes of the Crimea in 2009 // *Seismological Bulletin of Ukraine for the year 2009*. Sevastopol, SPC "ECO-Hydrophysics", 2011. P. 11–23.
12. Pustovitenko B.G., Kalinyuk I.V., Merzhey E.A. Spectral and dynamic parameters of the foci of earthquakes of the Crimea in 2010 // *Seismological Bulletin of Ukraine for the year 2010*. Sevastopol, SPC "ECO-Hydrophysics", 2011. P. 11–23.
13. Pustovitenko B.G., Kalinyuk I.V., Merzhey E.A. , Pustovitenko A.A. Focal parameters of earthquakes of the Crimea in 2011 // *Seismological Bulletin of Ukraine for 2011*. The Sevastopol, SPC "ECO-Hydrophysics", 2012. P. 17–35.