

Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по данным цифровых сейсмостанций

◦ *Б. Г. Пустовитенко, Е. А. Мержей, А. А. Пустовитенко, 2013*

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 3 июня 2013 г.

Представлено членом редколлегии Ю. М. Вольфманом

Розглянуто динамічні параметри вогнищ 58 землетрусів Криму, вперше відновлені за спектрами записів регіональних цифрових сейсмостанцій. Апроксимацію спектрів зміщень і розрахунок динамічних параметрів вогнищ виконано в рамках дислокаційної моделі Бруна (ω^{-2}). Отримано задовільну узгодженість розрахункових значень сейсмічного моменту і радіуса дислокації із середніми довготривалими параметрами за даними аналогових сейсмостанцій. Визначено тенденцію просторового групування землетрусів із завищеними і заниженими значеннями вогнищевих параметрів у межах одного енергетичного рівня.

Dynamic parameters of 58 earthquakes of the Crimea, which were first restored from the spectra of regional digital seismic records have been considered. Approximation of spectra of displacement and calculation of dynamic source parameters were performed within the dislocation model of Brune (ω^{-2}). A satisfactory agreement between the calculated values of the seismic moment and the radius of the dislocation with the average long-term options for analog seismic data has been received. The tendency of spatial grouping of earthquakes with overstated and understated values of the source parameters within a single energy level has been noted.

Введение. Характер физических процессов в очагах и очаговых зонах землетрясений определен особенностями геодинамики и сейсмотектоники, а также свойствами глубинной геологической среды, вмещающей очаги.

Изучение очаговых параметров отдельных землетрясений и их совокупностей дает экспериментальные факты, независимые от той или иной гипотезы тектогенеза или принятой модели геодинамики. В связи с этим новые полученные знания об очаговых параметрах могут служить основой для проверки выдвинутых гипотез и теоретических моделей сейсмотектогенеза.

В настоящей статье рассмотрены новые данные о динамических параметрах очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона, впервые восстановленные по спектрам записей цифровых сейсмических станций.

Ранее очаговые параметры землетрясений Крыма были определены только с использованием аналоговых сейсмограмм, полученных при гальванометрическом способе регистрации сейс-

мических колебаний почвы со скоростью развертки фотозаписи 60—120 мм/мин [Пустовитенко, Пантелеева, 1990]. При этом оцифровка сейсмограмм проводилась ручным способом по "характерным" точкам, а расчет спектров — с использованием экспресс-метода, предложенного и обоснованного для практического применения в работе [Грудева и др., 1967].

После проведения методических работ разработки программного комплекса этот метод был внедрен в Крыму для массового расчета амплитудных и энергетических спектров [Пустовитенко и др., 1983] и решения обратной задачи — восстановления очаговых параметров [Пустовитенко, Пантелеева, 1990].

С помощью аналоговых сейсмостанций получены количественные параметры очагов практически всех представительных землетрясений Крыма за период 1955—2006 гг., установлены их пространственно-временные закономерности, получены корреляционные зависимости от энергетического уровня землетрясений [Пустовитенко, Пантелеева, 1990; Пустовитенко и

др., 2008 б]. Данные об очаговых параметрах землетрясений использованы для решения ряда научных и практических задач геофизики [Пустовитенко, Пантелеева, 1991; Пустовитенко и др., 2010 а и др.].

С 2000 г. в Крыму была начата реорганизация системы наблюдений путем постепенной замены аналогового способа регистрации сейсмических колебаний на цифровой. Первые цифровые сертифицированные сейсмоприемники системы SDAS [Красилов и др., 2006] были установлены на сейсмических станциях "Симферополь" и "Ялта". С 2006 по 2009 г. другие станции Крыма также были переведены на цифровые записи землетрясений короткопериодной аппаратурой MSP-III, созданной в отделе сейсмологии ИГФ НАН Украины [Пустовитенко и др., 2008 а]. Цифровой способ регистрации сейсмических колебаний отличается от гальванометрического более высокой разрешающей способностью дискретизации сейсмической записи и более широким динамическим диапазоном. 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 цифровых сейсмографов.

Для проверки степени идентичности регистрируемых волновых форм и оценки преемственности ранее полученных результатов и выводов в Крыму на протяжении определенного периода параллельно с цифровой сохранялась и аналоговая запись. Предварительные результаты сравнительного анализа синхронной регистрации сейсмических колебаний и восстановленные по ним динамические параметры очагов шести наиболее сильных землетрясений Крыма за 2001—2005 гг. описаны в работе [Пустовитенко и др., 2011 а].

В данной статье анализируется обобщенный экспериментальный материал цифровых записей землетрясений за период 2007—2011 гг. в достаточно широком энергетическом диапазоне и дается их сравнение с ранее полученными долговременными параметрами.

Характеристика исходного материала.

При отборе исходных сейсмограмм для расчета амплитудных спектров смещений использованы следующие критерии: четкость вступления объемных волн с индексами "i"; превышение полезного сигнала над фоном помех более чем

в 2 раза; надежность в оценке количественных параметров амплитудно-частотных характеристик сейсмографов. Примеры таких записей, удовлетворяющих всем условиям, представлены на рис. 1.

Кроме того, учитывался энергетический уровень землетрясений и район, где они произошли. Так, наибольший интерес представляли наименее изученные ранее структуры степного Крыма (район 6), зоны Демерджинского и Молбайского разломов (районы 3, 4). Если в целом для региона отбирались только представительные землетрясения с $K_{\Pi} > 8,0$, то для малоизученных — более низкого энергетического уровня при условии соблюдения вышеуказанных критериев отбора записей. Здесь и далее используется классификация землетрясений по энергетическому уровню K_{Π} по региональной шкале [Пустовитенко, Кульчицкий, 1974].

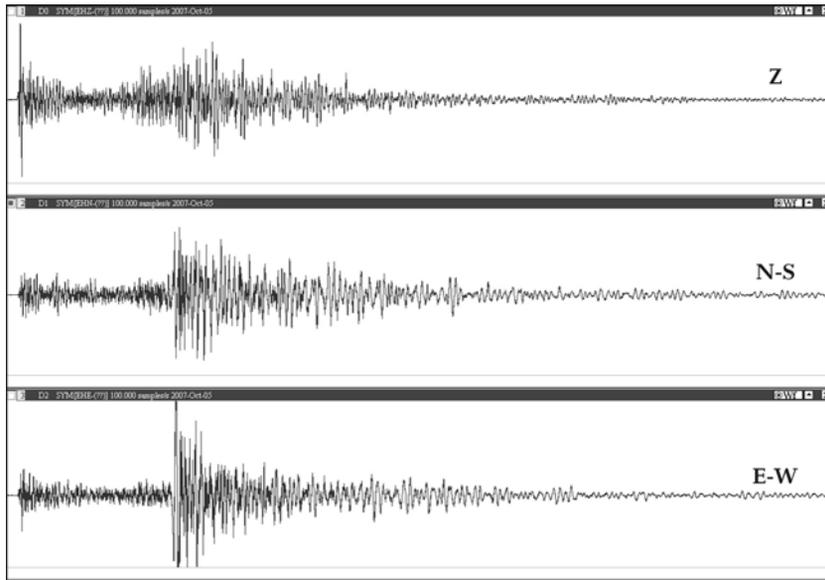
За период цифровой регистрации с 2007 по 2011 г. получено 306 амплитудных спектров, по которым восстановлены очаговые параметры для 58 землетрясений в диапазоне $K_{\Pi} = 6,2 \div 12,7$, произошедших во всех сейсмоактивных районах региона (табл. 1). Разделение региона на районы проведено условно, в основном для грубой привязки к месту возникновения землетрясений при их описании и простоты формализации базы данных [Пустовитенко и др., 1989]. Основные параметры землетрясений в табл. 1 даны по результатам обработки данных в Крыму [Сейсмологический ..., 2009—2012].

Пространственное распределение изученных землетрясений представлено на рис. 2.

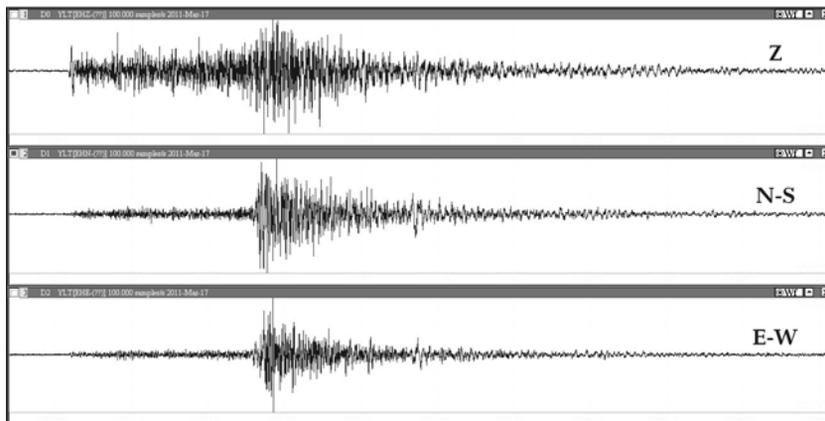
Большинство изученных землетрясений относится к Ялтинскому району (район № 2), в основном к очаговой зоне ощутимого землетрясения, произошедшего 12 апреля 2009 г. в 16 ч 31 мин 40 с, $K_{\Pi} = 11,2$, и к Керченско-Анапской группе очагов (район № 5). Для остальных сейсмоактивных районов изучено от двух до восьми землетрясений (рис. 3, а).

Использовались записи всех региональных сейсмостанций: "Судак" (SUDU), "Севастополь" (SEV), "Алушта" (ALU), "Симферополь" (SIM), "Ялта" (YAL), "Феодосия" (FEO), "Керчь" (KERU). Наибольшее количество сейсмограмм обработано по станции "Судак", расположенной на скальном основании (грунты 1-й категории по сейсмическим свойствам). В результате эта станция участвовала в 74% случаях при оценке динамических параметров очагов (рис. 3, б).

Меньше всего пригодных для анализа записей отобрано по станции "Керчь", расположен-



a



б

Рис. 1. Примеры цифровых записей землетрясений по составляющим Z, N—S, E—W: *a* — 5 октября 2007 г., $K_{\Pi} = 12,7$; станция "Симферополь"; *б* — 17 марта 2011 г., $K_{\Pi} = 10,8$, станция "Ялта".

ной на малопрочном мшанковом известняке с высоким уровнем естественного шума. Достаточно высокий процент участия в оценке динамических параметров очагов записей станций "Севастополь" (65%), "Алушта" и "Симферополь" — по 50%.

Спектры смещений. Амплитудные спектры поперечных *S*-волн в большинстве случаев рассчитывались по двум горизонтальным составляющим (N—S) и (E—W) и вычислялся полный вектор колебаний, а продольных *P*-волн — по вертикальной *Z*. Относительная длительность исследуемого участка сейсмограммы, как и при обработке аналоговых сейсмограмм [Пус-

товитенко, Пантелеева, 1990], принята равной $\tau_{1/3}$, т. е. взят интервал времени от вступления *S*- и *P*-волн до времени спада амплитуд максимальных колебаний A_{\max} на уровень $1/3 A_{\max}$. Спектры рассчитаны стандартным методом быстрого преобразования Фурье. Интерпретация спектров выполнена в рамках дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [Brune, 1970].

Спектр объемной волны в модели Бруна описывается тремя основными характеристиками: уровнем спектральной плотности $\Omega_0(x, f)$ на низких частотах, который при $f \rightarrow 0$ пропорционален скалярному сейсмическому моменту M_0 ; угловой частотой $f_0(\omega_0)$, связанной с раз-

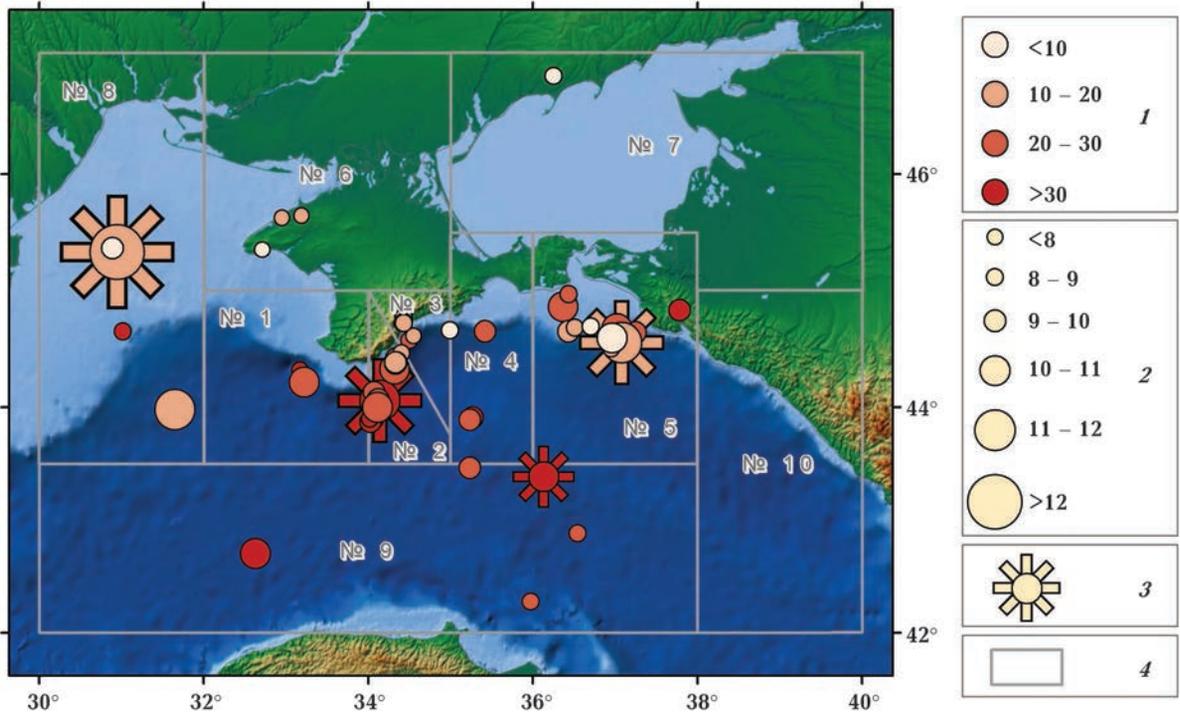


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений Крыма, для которых восстановлены очаговые параметры: 1 — глубина очагов, км, 2 — энергетический класс $K_{П}$, 3 — землетрясения с известными механизмами очагов, 4 — границы сейсмоактивных районов с указанием их номеров [Пустовитенко и др., 1989]: № 1 — Севастопольский, № 2 — Ялтинский, № 3 — Алуштинский, № 4 — Судакско-Феодосийский, № 5 — Керченско-Анапский, № 6 — Степной Крым, № 7 — Азово-Кубанский, № 8 — Северо-Западный, № 9 — Черноморская впадина, № 10 — Восточный.

мером круговой дислокации r_0 и углом наклона γ около -2 , определяющим спад Ω в области высокочастотной асимптоты. Полученные амплитудные спектры цифровых записей исследованных землетрясений Крыма уверенно аппроксимируются в билогарифмическом масштабе двумя прямыми: в длиннопериодной части спектра — прямой, параллельной оси частот, в области коротких периодов — наклонной прямой с угловым коэффициентом γ около -2 , что соответствует выбранной теоретической модели. На рис. 4 приведены примеры типичных спектров смещений для разных землетрясений Крыма по записям региональных сейсмических станций и их аппроксимация в рамках модели Бруна.

Расчет динамических параметров. Станционные спектральные характеристики Ω_0 и f_0 легли в основу расчета очаговых параметров землетрясений.

Спектр записи землетрясения на станции регистрации является суперпозицией эффектов самого источника, характеристик регистрирующего прибора, свойств глубинной среды на

пути очаг—станция, направленности излучения из очага, инженерно-геологических свойств подстилающих пород (амплитудно-частотных характеристик верхнего грунта). В рамках модели Бруна [Brune, 1970], модернизированной Т. Ханксом [Hanks, Wyss, 1972], формула для расчета скалярного сейсмического момента M_0 по станционному спектру имеет вид

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

где Ω_0 — максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; V — скорость распространения сейсмической волны; ρ — плотность пород в окрестности очага, $R_{\theta\phi}$ — поправка за направленность излучения из очага на станцию регистрации; $G(\Delta, h)$ — поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ — частотная характеристика земной коры под станцией, $S_m(f)$ — поправка за неупругое затухание в мантии. Методика учета всех этих факторов при переходе от станционного спектра к спектру источника подробно изложена в работах [Аптекман и др., 1989; Пустовитенко, Пантелеева, 1990; Пустовитенко, 2001].

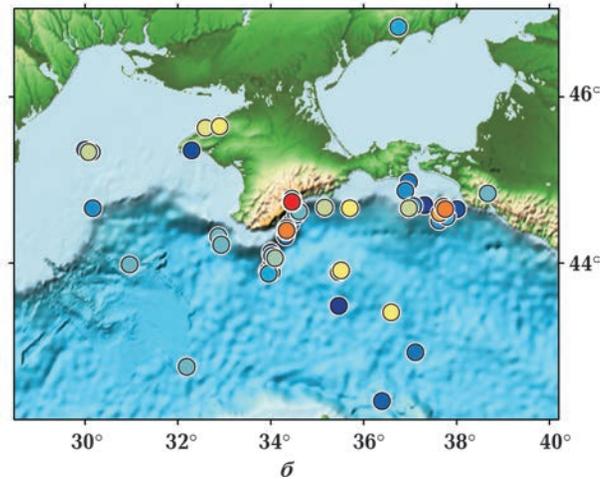
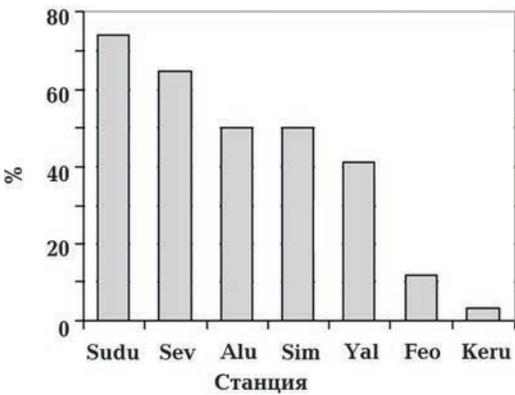
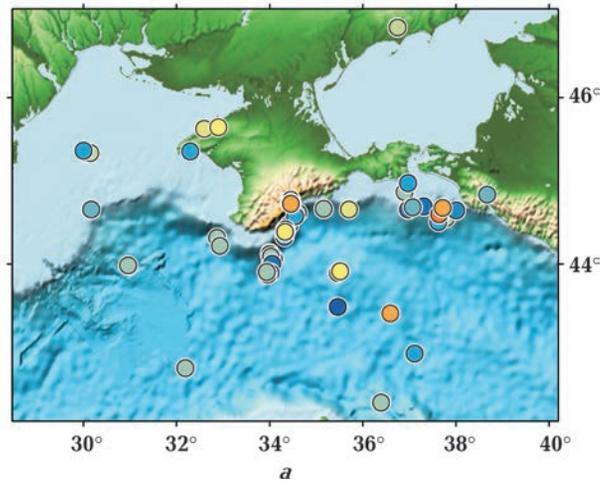
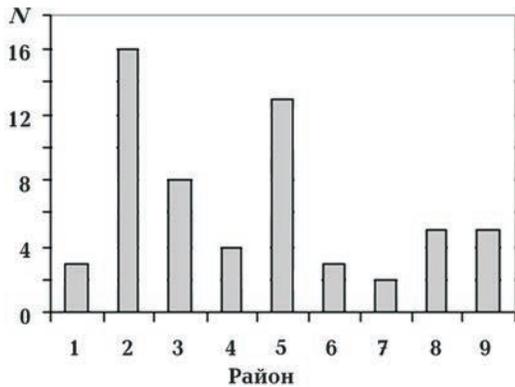


Рис. 3. Распределения количества: а — землетрясений по сейсмическим районам; б — записей сейсмических станций, использованных в оценке очаговых параметров.

Для четырех землетрясений с известным механизмом очагов [Пустовитенко, Капитанова, 2011; Пустовитенко и др., 2010 б; 2012 а, б] введена поправка за направленность излучения R_{θ} (табл. 2), для остальных принято среднее $R_{\theta\phi} = 0,4$ [Savage, 1966; Пустовитенко, Пантелеева, 1990].

Геометрические размеры очага определялись по угловой частоте f_0 амплитудного спектра смещения. Частота f_0 связана с длительностью импульса, излучаемого очагом, которая, в свою очередь, определяется размером источника, скоростью вспарывания и положением точки наблюдения по отношению к источнику. Для дислокационной модели Бруна [Brune, 1970] с разрывом в виде круга радиус дислокации r_0 вычисляется по формуле

$$r_0 = 2,34 \frac{V_P}{2\pi f_0}.$$

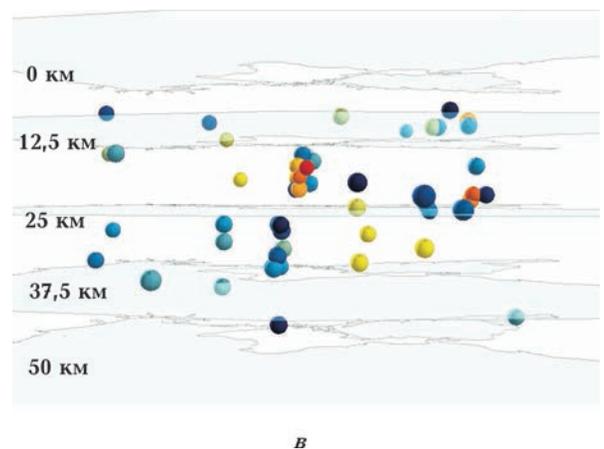


Рис. 6. Пространственное распределение $\delta 1gX$ очаговых параметров: а — средней подвижки по разрыву \bar{U} ; б — сброшенного напряжения $\Delta\sigma$; в — распределение $\delta 1g\Delta\sigma$ по глубине.

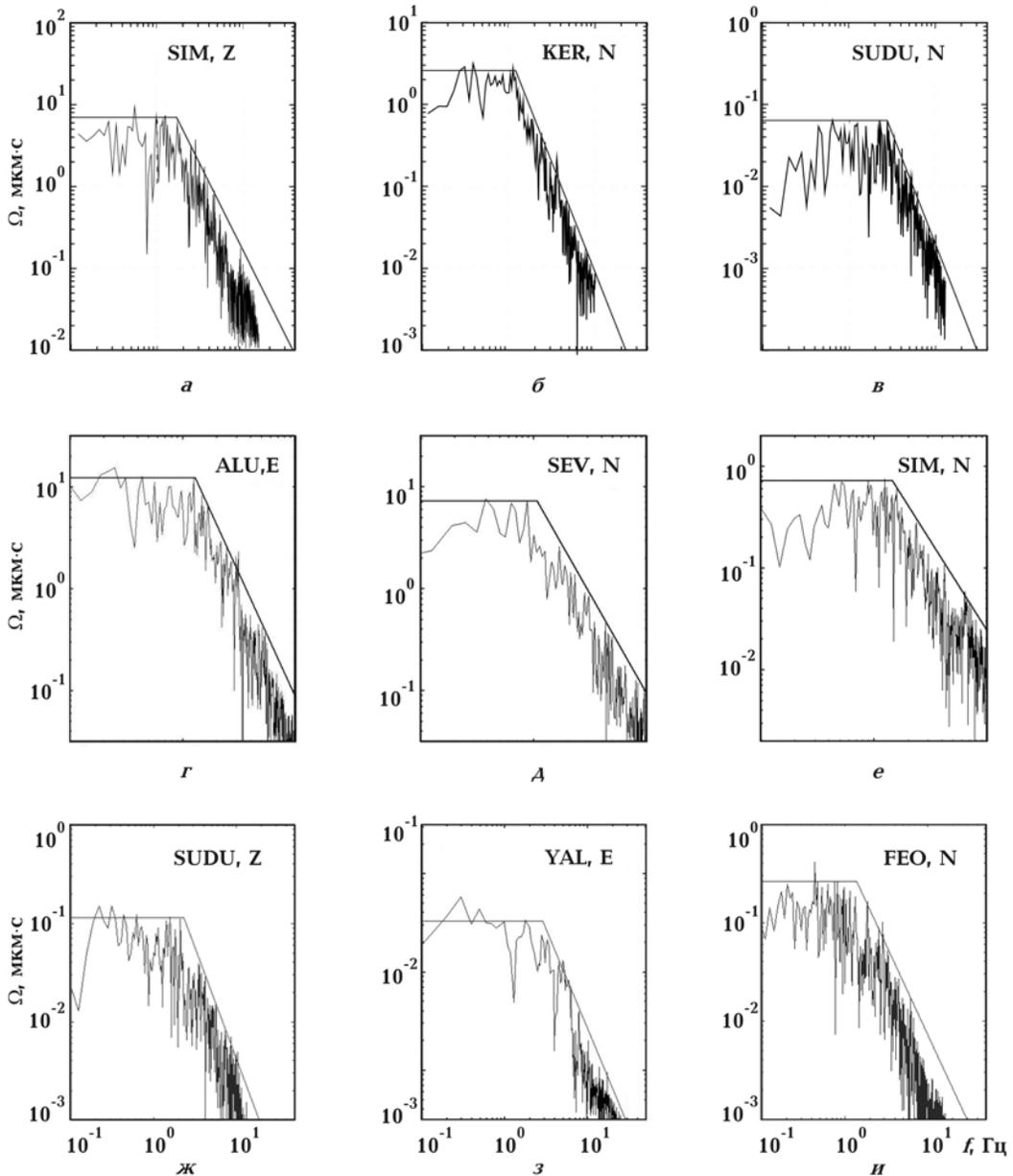


Рис. 4. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма: а — № 4, 07.05.2008; б — № 6, 24.07.2008; в — № 8, 22.09.2008; г — № 16, 12.04.2009; д — № 16, 24.04.2010; е — № 19, 18.04.2009; ж — № 30, 24.07.2010; з — № 37, 06.11.2010; и — № 38, 06.11.2010. Номера землетрясений и даты соответствуют таковым в табл. 1.

Одно из основных приложений понятия сейсмического момента для изучения геодинамики состоит в возможности оценить с его помощью средние величины сброшенных (снятых) тектонических напряжений в очаге землетрясения. Из решения статистической теории упругости для скачка смещения вдоль глубокопогруженной сдвиговой дислокации в виде круга радиуса r_0 , на котором выдерживает-

ся постоянный сброс напряжений, показана связь сейсмического момента с величиной сброшенного напряжения [Кейлис-Борок, 1959]:

$$M_0 = 16/7 \Delta\sigma r_0^3.$$

Отсюда, получаем формулу для расчета сброшенного напряжения:

$$\Delta\sigma = 7 M_0 / 16 r_0^3.$$

Т а б л и ц а 1. Основные параметры землетрясений Крыма за 2007—2011 гг., для которых восстановлены динамические параметры очагов по данным цифровых сейсмостанций

Но- мер	Дата			Время в очаге, t_0			Координаты гипоцентра			K_{Π}	Ра- йон
	год	ме- сяц	день	ч	мин	с	φ °N	λ °E	h , км		
1	2007	10	05	23	17	55,8	44,56	37,08	18	11,8	5
2	2007	11	07	00	20	20,8	44,65	37,05	23	9,6	5
3	2008	04	04	10	39	0,3	44,66	35,42	30	9,3	4
4	2008	05	07	08	00	21,1	45,34	30,95	11	12,7	8
5	2008	07	04	16	40	26,5	45,34	31,01	30	9,7	8
6	2008	07	24	14	14	11,2	44,87	36,37	25	10,1	5
7	2008	08	09	01	53	14,8	42,71	32,63	35	10,1	9
8	2008	09	22	05	47	27,2	44,84	37,78	45	9,9	5
9	2008	10	29	02	46	44,7	44,67	34,99	9	8,8	4
10	2009	02	18	9	44	13,6	43,98	31,65	16	11,1	8
11	2009	03	3	19	54	29,2	44,47	34,40	16	8,4	2
12	2009	03	15	1	28	26,6	45,37	30,89	7	9,1	8
13	2009	04	11	0	9	10,8	44,13	34,07	28	9,9	2
14	2009	04	11	5	18	45,8	44,12	34,07	45	8,7	2
15	2009	04	11	22	2	44,6	44,07	34,12	29	9,5	2
16	2009	04	12	16	31	40,2	44,06	34,14	32	11,2	2
17	2009	04	12	19	1	55,2	44,02	34,09	28	9,5	2
18	2009	04	15	7	48	37,5	44,09	34,09	35	8,7	2
19	2009	04	18	0	42	18	44,33	34,32	22	10,4	2
20	2009	05	20	7	36	14	42,89	36,54	25	8,6	9
21	2009	06	21	19	36	54,1	44,00	34,11	28	10,2	7
22	2009	11	20	6	43	32,0	44,66	31,02	35	8,7	8
23	2010	1	9	5	50	12,7	44,98	36,43	26	8,1	5
24	2010	1	21	8	00	25,8	44,78	34,43	16	8,4	2
25	2010	3	31	8	46	46,0	44,62	34,55	17	7,7	3
26	2010	4	15	20	13	44,8	44,58	34,50	21	8,1	3
27	2010	5	20	6	25	45,0	44,65	37,25	23	9,0	5
28	2010	6	20	0	4	55,9	44,70	36,70	8	8,1	5
29	2010	7	24	18	51	33,6	44,32	33,17	39	8,7	1

Но- мер	Дата			Время в очаге, t_0			Координаты гипоцентра			K_{Π}	Ра- йон
	год	ме- сяц	день	ч	мин	с	φ °N	λ °E	h , км		
30	2010	7	24	18	55	45,9	44,22	33,22	28	10,2	1
31	2010	7	25	16	10	51,6	44,22	33,22	31	9,1	1
32	2010	8	7	10	50	45,0	44,51	36,95	11	8,7	5
33	2010	8	9	18	12	45,7	46,82	36,25	9	8,7	7
34	2010	9	21	7	32	39,1	43,47	35,23	21	9,5	9
35	2010	10	18	2	9	09,8	44,66	36,43	11	9,1	5
36	2010	11	2	8	18	42,2	44,69	36,51	11	8,1	5
37	2010	11	6	10	49	24,0	43,89	34,08	33	8,5	2
38	2010	11	8	11	52	35,3	43,87	34,03	35	9,7	2
39	2010	11	8	16	10	00,2	43,90	34,02	35	8,6	2
40	2010	11	19	1	18	17,6	45,36	32,71	9	7,6	6
41	2010	12	30	23	22	52,1	42,28	35,97	23	8,6	9
42	2011	3	17	2	13	27,7	43,39	36,13	31	10,8	9
43	2011	7	10	15	33	12,1	45,63	32,95	12	7,5	6
44	2011	7	24	3	22	51,4	45,65	33,19	20	7,6	6
45	2011	8	26	14	33	32,6	43,89	35,23	25	9,4	4
46	2011	8	26	15	38	19,3	43,91	35,27	34	9,8	4
47	2011	9	9	7	46	20,5	44,39	34,34	20	9,7	2
48	2011	9	9	14	43	40,7	44,38	34,33	18	9,5	2
49	2011	9	9	14	49	28,3	44,42	34,34	22	9,3	2
50	2011	9	9	15	26	9,6	44,39	34,33	20	9,6	2
51	2011	10	25	13	0	59,5	44,6	36,96	10	10,1	5
52	2011	11	10	18	55	17,9	44,74	34,43	17	8,5	3
53	2011	11	10	21	40	25,2	44,74	34,43	18	6,2	3
54	2011	11	11	9	54	43,9	44,73	34,42	17	8,2	3
55	2011	11	11	10	37	42,8	44,73	34,44	17	7,6	3
56	2011	11	12	0	28	18,5	44,74	34,43	17	7,4	3
57	2011	11	12	5	43	3,3	44,73	34,43	17	8,3	3
58	2011	11	29	2	17	41,6	44,68	37,02	24	10,6	5

Т а б л и ц а 2. Значения поправок за направленность излучения $R_{\theta\phi}$ для P - и S -волн

Станция	№ 1, 05.10.2007		№ 4, 07.05.2008		№ 16, 12.04.2009		№ 42, 17.03.2011	
	P	S	P	S	P	S	P	S
SIM	0,052	0,31	0,37	0,79	0,13	0,3	0,05	0,48
ALU	0,124	0,38	—	—	0,2	0,41	—	—
SEV	—	0,42	—	—	0,37	—	0,093	0,31
YAL	0,19	0,44	0,27	0,83	—	—	0,083	0,34
SUDU	0,036	—	—	—	0,36	0,45	0,06	0,65
KERU	—	0,53	—	—	—	—	—	—
FEO	—	0,31	—	—	—	—	—	—

Используя уравнение из теории упругости, связывающее деформацию с напряжением по найденной величине $\Delta\sigma$, можно оценить упругую деформацию сдвига ε в окрестности очага:

$$\varepsilon = \Delta\sigma / \mu.$$

Средняя подвижка по разрыву \bar{U} (или величина дислокации) оценивается непосредственно из определения сейсмического момента как силовой характеристики очага [Аки, 1966]: $M_0 = \mu \bar{U} A$, где A — площадь дислокации радиусом r_0 .

Моментная магнитуда рассчитана по индивидуальным оценкам сейсмических моментов M_0 (выраженных в Н·м) с использованием формулы Канамори [Hanks, Kanamori, 1979]:

$$M_w = 2/3 (\lg M_0 + 7) - 10,7.$$

Большинство динамических параметров получено по $N \geq 3$ независимым станционным определениям. Только для отдельных относительно слабых и удаленных от станций регистрации сейсмических толчков динамические параметры рассчитаны по записям одной из ближайших к очаговым зонам сейсмических станций. Осреднение станционных динамических параметров выполнено с учетом логнормального закона распределения величин [Пустовитенко, Пантелеева, 1990]. Результаты расчета средних для землетрясения динамических параметров очагов представлены в табл. 3.

Наибольшие значения расчетных динамических параметров: сейсмического момента M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , \bar{U} получены для ощутимых землетрясений № 1 ($K_{\Pi} = 11,8$, $h = 11,8$ км) и № 4 ($K_{\Pi} = 12,7$, $h = 11$ км), а наименьшие — для самого слабого землетрясения 10 ноября 2011 г. ($K_{\Pi} = 6,2$), произошедшего в районе горы Демерд-

жи (№ 53). В целом можно отметить увеличение значений всех 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 (см. табл. 3). Так, для землетрясений № 23, 26, 28, 36 ($K_{\Pi} = 8,1$) средние значения сейсмического момента и радиуса круговой дислокации различаются примерно в 1,5—2 раза, сброшенного напряжения — в 2—3 раза, а упругой деформации сдвига — на порядок. Близкими по значениям получились только средние подвижки по разрыву. Еще большие различия по всем параметрам получены для землетрясений № 6, 7 и 51 ($K_{\Pi} = 10,1$): сброшенное напряжение и упругая деформация в очаге неглубокого землетрясения № 51 ($h = 10$ км) отличается от двух других ($h = 25$ и 35 км) в 4—7 раз, средняя подвижка по разрыву — в 3,5—4 раза. Такие различия очаговых параметров землетрясений одного уровня энергий естественны и могут быть объяснены как особенностями процессов в очаге каждого землетрясения и свойствами глубинной среды, вмещающий очаг, 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 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 станци-

ями регистрации, а также направленности излучения без знания механизма очагов для слабых землетрясений.

Сравнение очаговых параметров по данным цифровых и аналоговых сейсмостанций. Сравнение восстановленных очаговых параметров землетрясений Крыма по записям цифровых и аналоговых сейсмостанций удобно провести по их долговременным зависимостям от энергии землетрясений для исключения временных флуктуаций. Для этого было проведено обобщение всех динамических параметров очагов землетрясений региона за период аналоговых наблюдений с 1955 по 2007 г. в диапазоне $K_{\Pi} = 5,5 \div 13,0$. Выборка исходных данных содержала 512 пар параметров. Методом ортогональной регрессии по среднеинтервальным значениям (с отбраковкой грубых промахов) при доверительном интервале 95% — уровне значимости получены уравнения связи при

высоком коэффициенте корреляции ρ :

$$\lg M_0 = (0,588 \pm 0,034) K_{\Pi} + (8,588 \pm 0,319), \rho = 0,99, \quad (1)$$

$$\lg r_0 = (0,112 \pm 0,011) K_{\Pi} + (1,707 \pm 0,107), \rho = 0,93, \quad (2)$$

$$\lg \Delta\sigma = (0,349 \pm 0,026) K_{\Pi} + (2,338 \pm 0,243), \rho = 0,98, \quad (3)$$

$$\lg \bar{U} = (0,418 \pm 0,024) K_{\Pi} - (6,245 \pm 0,23), \rho = 0,99, \quad (4)$$

$$\lg \varepsilon = (0,346 \pm 0,028) K_{\Pi} - (8,123 \pm 0,264), \rho = 0,98. \quad (5)$$

Формулы (1) — (5) приведены для значений динамических параметров в системе СИ в соответствии с табл. 3.

Вышеперечисленные эмпирические зависимости представлены в графическом виде на рис. 5. Точками указаны только те значения динамических параметров, которые были определены по данным цифровых станций (см. табл. 3). Долговременные зависимости $\varepsilon (K_{\Pi})$ и соответственно экспериментальные данные, полученные по цифровым станциям, аналогич-

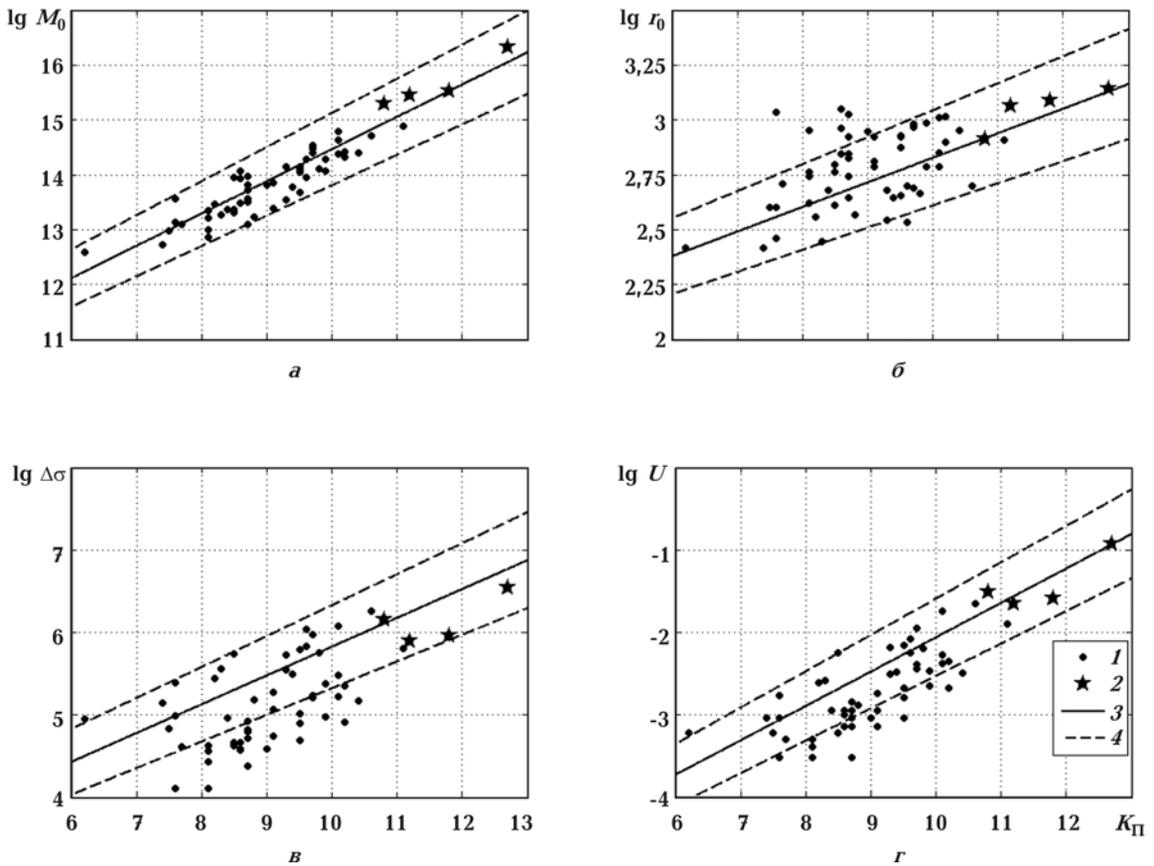


Рис. 5. Зависимости динамических параметров очагов землетрясений Крыма от энергетического класса K_{Π} : а — сейсмического момента M_0 ; б — радиуса дислокации r_0 ; в — сброшенного напряжения $\Delta\sigma$; г — средней подвижки по разрыву \bar{U} ; 1 — индивидуальные значения параметров по цифровым записям; 2 — значения параметров землетрясений, для которых определен механизм очага; 3 — долговременные зависимости (1)–(4); 4 — доверительный интервал.

Т а б л и ц а 3. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по данным цифровых сейсмостанций

Но- мер	Дата	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н · м	$r_0 \cdot 10^3$, м	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{U} \cdot 10^{-2}$, м	M_w	N
1	2007.10.05*	344	1,22	9,04	30,1	2,60	4,3	10
2	2007.11.07	8,82	0,34	10,83	0,34	0,83	3,2	1
3	2008.04.04	3,5	0,35	3,54	11,8	0,31	3,0	6
4	2008.05.07*	2165	1,39	35,2	117	11,9	4,8	4
5	2008.07.04	34,58	0,96	1,73	5,77	0,4	3,65	4
6	2008.07.24	42,4	1,03	1,69	5,64	0,42	3,7	1
7	2008.08.09	24,45	0,71	3,03	10,1	0,52	3,5	5
8	2008.09.22	11,9	0,61	2,36	7,86	0,34	3,35	2
9	2008.10.29	1,69	0,37	1,52	5,0	0,13	2,8	5
10	2009.02.18	76,2	0,81	6,36	21,2	1,24	3,9	3
11	2009.03.03	2,03	0,58	0,46	1,53	0,06	2,8	2
12	2009.03.15	7,24	0,84	0,55	1,82	0,11	3,2	3
13	2009.04.11	19,5	0,97	0,95	3,2	0,22	3,5	3
14	2009.04.11	6,55	1,06	0,24	0,40	0,03	3,2	3
15	2009.04.11	11,1	0,85	0,79	2,62	0,16	3,35	2
16	2009.04.12*	281	1,16	7,90	26,3	2,22	4,25	7
17	2009.04.12	14,0	0,84	1,05	3,48	0,21	3,4	3
18	2009.04.15	5,18	0,70	0,67	2,23	0,11	3,1	2
19	2009.04.18	25,0	0,90	1,49	5,01	0,32	3,55	4
20	2009.05.20	3,02	0,70	0,39	1,3	0,07	2,95	2
21	2009.06.21	21,2	1,04	0,81	2,71	0,21	3,5	3
22	2009.11.20	3,68	0,67	0,53	1,78	0,09	3,0	1
23	2010.01.09	1,0	0,55	0,27	0,9	0,04	2,6	1
24	2010.01.21	2,31	0,48	0,92	3,07	0,11	2,85	2
25	2010.03.31	1,23	0,51	0,41	1,38	0,05	2,7	1
26	2010.04.15	0,72	0,42	0,43	1,44	0,04	2,5	1
27	2010.05.20	6,42	0,89	0,39	1,31	0,09	3,15	2
28	2010.06.20	2,25	0,9	0,13	0,14	0,03	2,8	2
29	2010.07.24	3,14	0,55	0,835	2,79	0,11	2,9	2

Но- мер	Дата	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н · м	$r_0 \cdot 10^3$, м	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{U} \cdot 10^{-2}$, м	M_w	N
30	2010.07.24	25,9	0,79	2,27	7,53	0,44	3,55	6
31	2010.07.25	7,23	0,65	1,18	3,93	0,18	3,2	5
32	2010.08.07	1,26	0,44	0,63	2,08	0,07	2,7	2
33	2010.08.09	9,26	0,84	0,67	2,23	0,14	3,25	2
34	2010.09.21	4,76	0,75	0,5	1,69	0,09	3,1	3
35	2010.10.18	2,46	0,61	1,88	1,57	0,07	2,9	5
36	2010.11.02	1,62	0,58	0,37	1,22	0,05	2,7	2
37	2010.11.06	2,37	0,625	0,43	1,44	0,06	2,8	2
38	2010.11.08	29,93	0,93	1,61	5,38	0,36	3,6	6
39	2010.11.08	8,37	0,92	0,47	1,58	0,11	3,2	5
40	2010.11.19	3,66	1,08	0,13	42	0,03	3,0	1
41	2010.12.30	11,87	1,12	0,375	1,235	0,10	3,3	2
42	2011.03.17*	198	0,82	14,2	52,0	3,11	4,1	7
43	2011.07.10	0,96	0,40	0,68	2,26	0,06	2,6	1
44	2011.07.24	1,38	0,40	0,97	3,25	0,09	2,7	1
45	2011.08.26	5,9	0,44	3,09	6,49	0,33	3,2	4
46	2011.08.26	12,9	0,46	5,61	18,7	0,63	3,3	8
47	2011.09.09	25,0	0,49	9,4	31,2	1,11	3,5	6
48	2011.09.09	12,7	0,45	6,3	20,9	0,68	3,3	7
49	2011.09.09	14,0	0,48	5,4	18,2	0,64	3,4	7
50	2011.09.09	19,0	0,50	6,8	22,7	0,56	3,4	6
51	2011.10.25	62,1	0,61	12,0	39,9	1,78	3,8	6
52	2011.11.10	8,8	0,41	5,5	18,4	0,55	3,2	5
53	2011.11.10	0,39	0,26	0,9	3,1	0,06	2,35	2
54	2011.11.11	2,91	0,36	2,78	9,3	0,24	2,9	7
55	2011.11.11	1,35	0,29	2,45	8,15	0,17	2,7	3
56	2011.11.12	0,53	0,26	1,39	4,7	0,09	2,4	5
57	2011.11.12	1,88	0,28	3,65	11,1	0,26	2,8	4
58	2011.11.29	52,5	0,50	18,2	60,7	2,22	3,7	8

Примечание: * — землетрясения, очаговые параметры которых восстановлены с учетом механизма очага.

ны таковым для сброшенного напряжения (поскольку значения ε связаны со значениями $\Delta\sigma$ простым соотношением), потому в графическом виде они не приведены.

Как видно из рис. 5, а, б, значения сейсмического момента и радиуса круговой дислокации хорошо укладываются в 95 %-ный интервал отклонения от установленных зависимостей. За границами доверительного интервала лежат только восемь значений $\lg r_0$, четыре из которых с наибольшими отклонениями относятся к данным временного ряда второй половины 2010 г. [Пустовитенко и др., 2011 б]. Все они произошли в верхней части земной коры.

В то же время значения $\Delta\sigma$ и \bar{U} , определенные по записям цифровых станций, оказались в целом ниже, чем ожидалось в соответствии с установленными долговременными зависимостями (рис. 5, в, г). Так, значения $\Delta\sigma$ ниже ожидаемых в среднем на 1/4 порядка, а значения \bar{U} — на 1/5 порядка. Ширина интервала разброса точек в облаке значений в случае \bar{U} практически не изменилась, а для $\Delta\sigma$ заметно увеличилась. Также стоит отметить, что динамические параметры очагов всех наиболее сильных землетрясений, для которых определен механизм и учтена направленность излучения, лежат в доверительном интервале. Кроме того, для этих землетрясений с меньшей погрешностью оценены глубины очагов и, следовательно, более точно выбраны параметры моделей среды, используемые в расчетах.

Пространственные свойства динамических параметров изученных очагов землетрясений можно рассмотреть с использованием "невязок" относительно средних для Крыма долговременных корреляционных связей (формулы (1)—(5)). Под невязкой будем понимать величину $\delta \lg X = \delta \lg X_i - \delta \lg X_f$, где X_i — значение очагового параметра рассматриваемого i -го события; X_f — значение этого параметра, рассчитанное по формулам для энергетического уровня, соответствующего i -му событию из корреляционных зависимостей. Невязки $\delta \lg X$ будут положительны, если значения исследуемого параметра находятся выше зависимости $\lg X (K_{\Pi})$, и отрицательными — если ниже. За нормальные (нулевые) значения принимались отклонения $\delta \lg X = \pm 0,1$.

Ранее [Пустовитенко и др., 2008 б] было отмечено устойчивое поле распределения невязок $\delta \lg M_0$ и $\delta \lg r_0$: завышенные значения M_0 и r_0 приурочены к зоне перехода от центральной к западной части региона, а также к областям максимальных изгибов изолиний глу-

бин континентального склона, а заниженные — к глубоководной впадине Черного моря. В центральной зоне региона не выделены устойчивые группы аномальных параметров $\delta \lg M_0$ и $\delta \lg r_0$. Полученные в данной статье значения $\delta \lg M_0$ и $\delta \lg r_0$ по цифровым записям пространственно тяготеют к тем же ранее выявленным зонам, потому на их анализе авторы не останавливаются.

Наибольший интерес представляет рассмотрение пространственного группирования отклонений, выходящих за пределы доверительных коридоров статистического распределения величин сброшенного напряжения и средней подвижки по разрыву (рис. 6, см. с. 176).

Пространственная структура распределения заниженных значений подвижек по разрыву и сброшенных напряжений имеет мозаичный характер без ярко выраженного группирования. Отрицательные $\lg \bar{U}$ и $\lg \Delta\sigma$ отмечены в пределах всего региона (рис. 6, а, б). В то же время практически все значения $\lg \bar{U}$ и $\lg \Delta\sigma$, лежащие выше уровня аппроксимирующей прямой ($\delta \lg X > 0,1$), соответствуют землетрясениям с эпицентрами на материковой части в районе Демерджинского разлома [Пустовитенко и др., 1999], в акватории Черного моря в пределах Южнобережного разлома, в районе восточной части Черноморской впадины и в Анапской группе очагов (см. рис. 6, а, б). Кроме того, все завышенные значения сброшенных напряжений ($\delta \lg \Delta\sigma > 0$) относятся к землетрясениям, произошедшим в верхней части земной коры на глубине до 25 км (рис. 6, в), где прочность среды меньше, а значит, и более благоприятны условия для сброса напряжений, чем в нижних слоях литосферы.

Заключение. Проведенное исследование очаговых параметров землетрясений Крыма за период 2007—2011 гг. по записям цифровых сейсмостанций позволяет сделать заключение о соответствии значений сейсмических моментов средним долговременным зависимостям от энергетического уровня, полученным в период аналоговой записи землетрясений, и о преемственности полученных ранее закономерностей и выводов [Пустовитенко, Пантелеева, 1990; Пустовитенко и др., 2008 б]. В то же время отмечены отклонения значений радиусов дислокации, сброшенных напряжений и деформации сдвига от их долговременных параметров. Эти отклонения могут быть объяснены как применением для записи сейсмических волн более широкополосных цифровых сейсмографов, так и пространственно-временными свойствами

ми очаговых параметров землетрясений за последние пять лет. В целом, полученные новые экспериментальные данные по спектральным и динамическим параметрам землетрясений Крыма с использованием записей цифровых сейсмостанций не противоречат таковым за длительный срок аналоговой регистрации. Это дает основание при оценке прогнозных значений спектральных параметров для максимальных по энергетическому уровню землетрясений, например в задачах по моделированию расчетных акселерограмм для местных сеймотектонических условий Крыма [Пустовитенко и др., 2010а], использовать цифровые записи и долговременные корреляционные зависимости (формулы (1), (2), полученные в статье.

Цифровой способ регистрации записей землетрясений позволяет более оперативно решать обратные задачи сейсмологии, в частотности массово восстанавливать динамические параметры очагов по спектрам записей объемных волн в широком энергетическом и пространственном диапазонах. Только за последние

годы статистика по спектральным и очаговым параметрам местных землетрясений Крыма значительно пополнилась за счет применения современной цифровой аппаратуры. Объединенные данные за длительный срок наблюдений могут служить основой для использования их в дальнейших методических и научно-прикладных задачах геодинамики, сеймотектоники, инженерной сейсмологии. От физических процессов в элементарной ячейке сейсмичности (очаге землетрясения) можно перейти к исследованию общих свойств совокупностей очагов — к сейсмическому процессу в регионе. В частности, используя данные о сейсмических моментах отдельных очагов, в дальнейшем предполагается оценить их суммарный вклад в тектонические движения в рамках "сейсмического течения горных масс" [Ризниченко, 1985] и вычислить суммарную необратимую деформацию среды за счет землетрясений.

Исследования очаговых параметров местных землетрясений Крымского региона будут продолжены.

Список литературы

- 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.
- Грудева Н. П., Малиновская Л. Н., Наймарк Б. Н. Приближенное вычисление спектров сейсмических колебаний. Методы и программы для анализа сейсмических наблюдений // Вычислительная сейсмология. — Москва: Наука, 1967. — Вып. 3. — С. 52—109.
- Кейлис-Борок В. И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. — 1959. — № 9 (136). — С. 20—42.
- Красилов С. А., Коломиец М. В., Акимов А. П. Организация процесса цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Междунар. сейсмол. школы, посвященной 100-летию открытия сейсм. станций "Пулково" и "Екатеринбург". — Обнинск: ГСН РАН, 2006. — С. 77—83.
- Пустовитенко А. А., Капитанова С. А. Механизм очага землетрясения 12 апреля 2009 г. и параметры разрывов в очаговой зоне // Сейсмологический бюллетень Украины за 2009 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2011. — С. 35—39.
- Пустовитенко А. А., Пустовитенко Б. Г., Мерзей Е. А. Механизм и динамические параметры очага землетрясения 5 октября 2007 года в северо-восточной части Черного моря // Сейсмологический бюллетень Украины за 2011 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2012 а. — С. 62—70.
- Пустовитенко А. Н., Пустовитенко Б. Г., Спиртус В. Б. Расчет амплитудных и энергетических спектров землетрясений Крыма экспресс-методом // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕСН СССР (Крым — Карпаты за 1977 год). — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 94—99.
- Пустовитенко А. Н., Свидлова В. А., Пасынков Г. Д., Сафонов И. П., Шаторный Б. И. Сейсмичность

- Крыма в 2006 году // Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2008а. — С. 6—12.
- Пустовитенко Б.Г. Очаговые параметры Черноморских землетрясений 18 марта 1957 и 12 июля 1966 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 1999 год. — Симферополь: Изд. ИГ НАНУ, КЭС, 2001. — С. 96—101.
- Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мержей Е.А. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2010 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2010 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2011б — С. 11—23.
- Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мержей Е.А., Пустовитенко А.А. Очаговые параметры землетрясений Крыма 2011 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2011 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2012б. — С. 17—35.
- Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мержей Е.А., Пустовитенко А.А. Сравнительный анализ спектральных и динамических параметров очагов землетрясений юга Украины по записям цифровых и аналоговых сейсмостанций // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. — Обнинск: ГС РАН, 2011а. — С. 267—270.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. — Москва: ИФЗ АН СССР, 1974. — Т. 2. — С. 113—125.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Борисенко Л.С., Поречнова Е.И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // Геофиз. журн. — 1999. — 21, № 6. — С. 3—15.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. — Киев: Наук. думка, 1989. — 192 с.
- Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Калинюк И.В., Мержей Е.А., Пустовитенко А.А. Методология и методические основы моделирования сейсмических воздействий на высотные здания в Крыму // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). — Київ: ДП НДІБК, 2010а. — Вип. 73. — С. 316—323.
- Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Изучение напряжений в Крымском сейсмоактивном регионе // Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика. — Киев: Наук. думка, 1991. — С. 273—279.
- Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. — Киев: Наук. думка, 1990. — 251 с.
- 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 Украины за 2008 год. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2010б. — С. 20—27.
- Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Поречнова Е.И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии: Материалы Междунар. конф. — Обнинск: ГС РАН, 2008б. — С. 238—242.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии: Изб. тр. — Москва: Наука, 1985. — 408 с.
- Сейсмологический бюллетень Украины за 2007—2011г. / Отв. ред. Б.Г. Пустовитенко. — Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2009—2012.
- Aki K. Estimation of earthquake moment released energy and stress-strain drop from *G*-wave spectrum // Bul. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ. — 1966. — 44, № 1. — P. 73—88.
- Brune I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. — 1970. — 75, № 26. — P. 4997—5009.
- Hanks T.C., Kanamori H. A moment-magnitude scale // J. Geophys. Res. — 1979. — 84, № 135. — P. 2348—2350.
- Hanks T.C., Wyss M. The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters // Bul. Seismol. Soc. Amer. — 1972. — 62. — P. 561—589.
- Savage I. C. Radiation from a realistic model of faulting // Bul. Seismol. Soc. Amer. — 1966. — 56. — P. 577—593.