

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА

Б.Г. Пустовитенко, Е.И. Поречнова, И.В. Калинюк, З.Н. Сыкчина

Отдел сейсмологии Института геофизики НАН Украины,
г. Симферополь, *seismosilver@mail.ru*

Очаговые параметры землетрясений Крыма в 2005 г. восстановлены по спектрам записей объемных волн, полученных на региональных сейсмических станциях как по стандартным аналоговым, так и цифровым записям колебаний. Цифровые станции с АЦП типа SDAS и сейсмоприемниками СМ-3, изготовленные в ГС РАН [1], установлены на станциях «Симферополь» и «Ялта» с 2000 г. Цифровая запись землетрясений реализуется параллельно со стандартной аналоговой двумя каналами: короткопериодным (ЕН→ SDAS+СМ-3) и длиннопериодным (ВН→ SDAS+СКД – на станции «Ялта», +СД-1 – на станции «Симферополь»), которые регистрируют сейсмический сигнал, пропорциональный скорости, в рабочем диапазоне от 0.1–20 Гц (ЕН) и 0.01–4 Гц (ВН) с частотой опроса 100 и 20 Гц соответственно [2, 3].

В 2005 г. рассчитано пятнадцать амплитудных и энергетических спектров для четырех землетрясений Крыма (рис. 1) с K_{II} =8.7, 7.0, 11.7, 9.3 (табл. 1) в диапазоне эпицентральных расстояний Δ =18–274 км. Рассмотренные землетрясения произошли в Ялтинском (№ 2) и Керченско-Анапском (№ 3) районах региона (табл. 1).

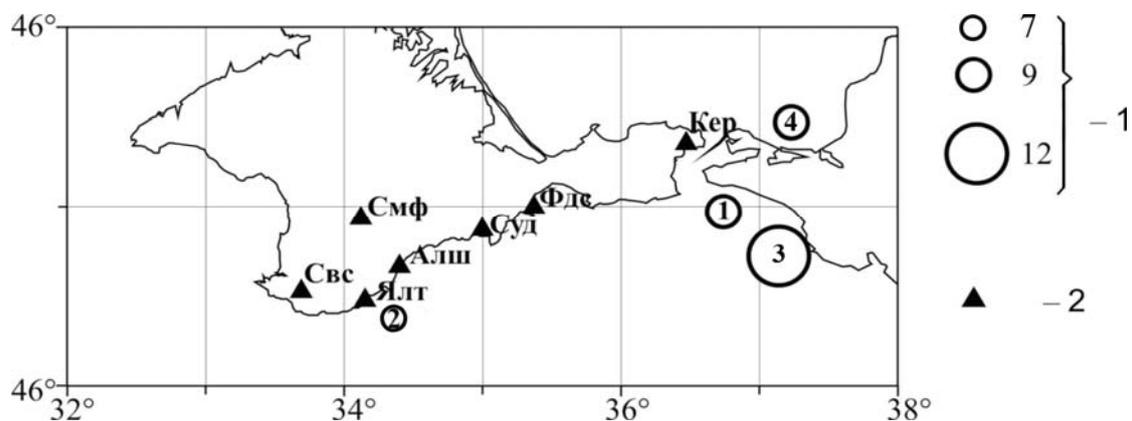


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений с рассчитанными спектрами за 2005 г.

1 – энергетический класс K_{II} ; 2 – сейсмическая станция.

Таблица 1. Список землетрясений Крыма в 2005 г., для которых рассчитаны спектры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуды				K_{II}	Район
			φ° , N	λ° , E		M_c	M_w	M_S , $MPSP^*$ [4]	M_s , m_b^* [5]		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	20.02	02 41 55.8	44.97	36.74	29		3.2			8.7	Керченско-Анапский (№ 5)
2	06.03	14.18.20.1	44.40	34.35	23		2.6			7.0	Ялтинский (№ 2)
3	13.03	01 31 22.6	44.72	37.14	6	4.2	4.4	3.9 4.6*	4.1 4.4*	11.7	Керченско-Анапский (№ 5)
4	21.09	19 08 01.7	45.47	37.23	34		3.1		4.2* 3.7*	9.3	Керченско-Анапский (№ 5)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 11, 12 соответствуют таковым в [2], в графе 8 – в наст. ст.

Аналоговые сейсмограммы со скоростью развертки записи 60 мм/мин оцифрованы по характерным точкам. Спектры рассчитаны экспресс-методом по методике [3]. Сейсмограмма землетрясения 20 февраля на станции «Керчь» была отсканирована и оцифрована с помощью программы Photoshop. Спектры по цифровым станциям получены методом БПФ по стандартной программе с учетом методических рекомендаций в [4]. При этом записи скоростей были пересчитаны в смещения грунта с учетом имеющихся АЧХ и рабочих динамических диапазонов каналов SDAS.

Интерпретация спектров и расчет динамических параметров во всех случаях выполнен в рамках дислокационной модели Брюна [5]. На рис. 2 и 3 представлены амплитудные спектры объемных волн, записанных, соответственно, аналоговой и цифровой аппаратурой, а также результаты их аппроксимации.

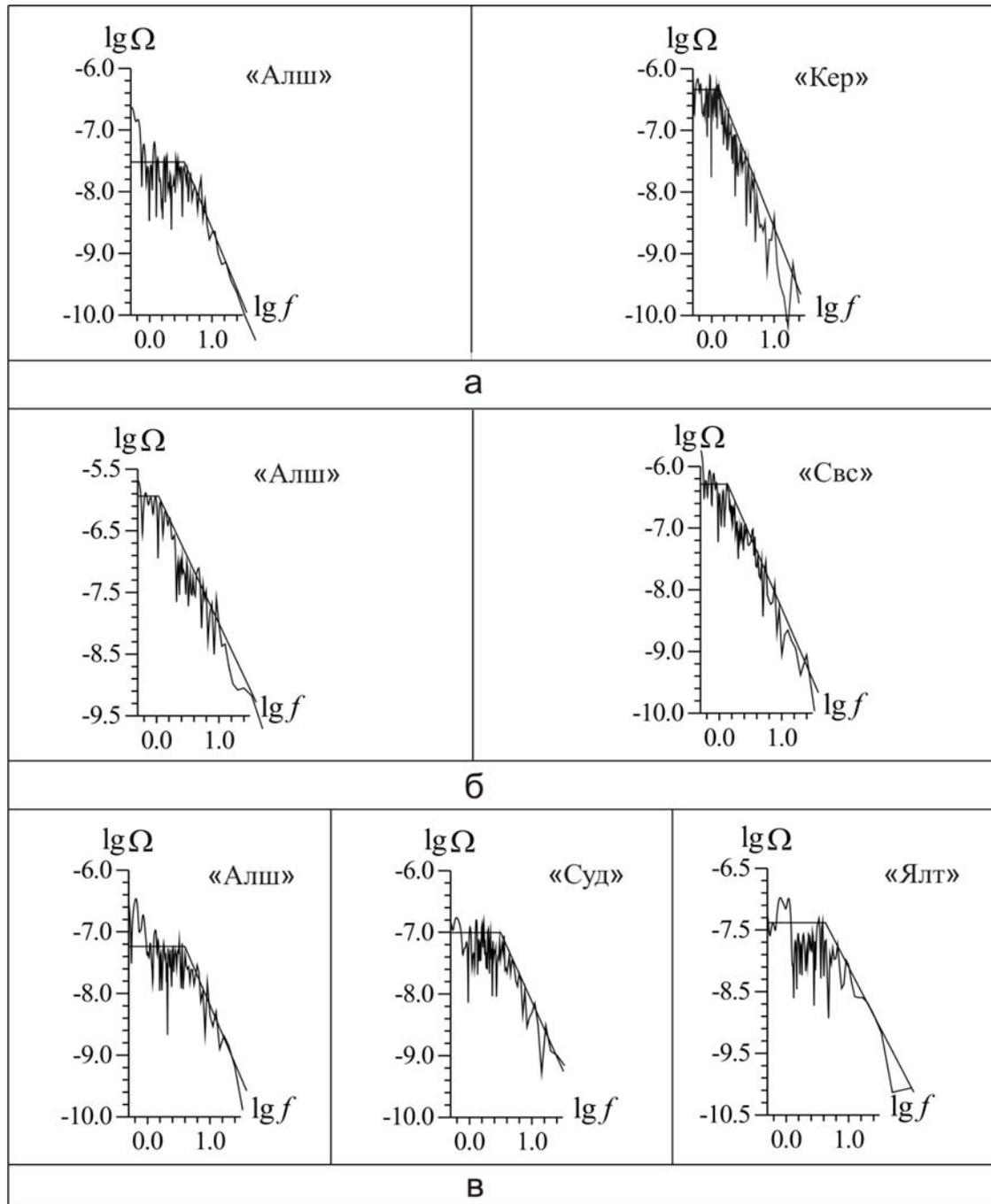


Рис. 2. Амплитудные спектры по аналоговым записям для землетрясений 20 февраля в 02^h41^m с $K_{II}=8.7$ (а), 13 марта в 01^h31^m с $K_{II}=11.7$ (б) и 21 сентября в 19^h08^m с $K_{II}=9.3$

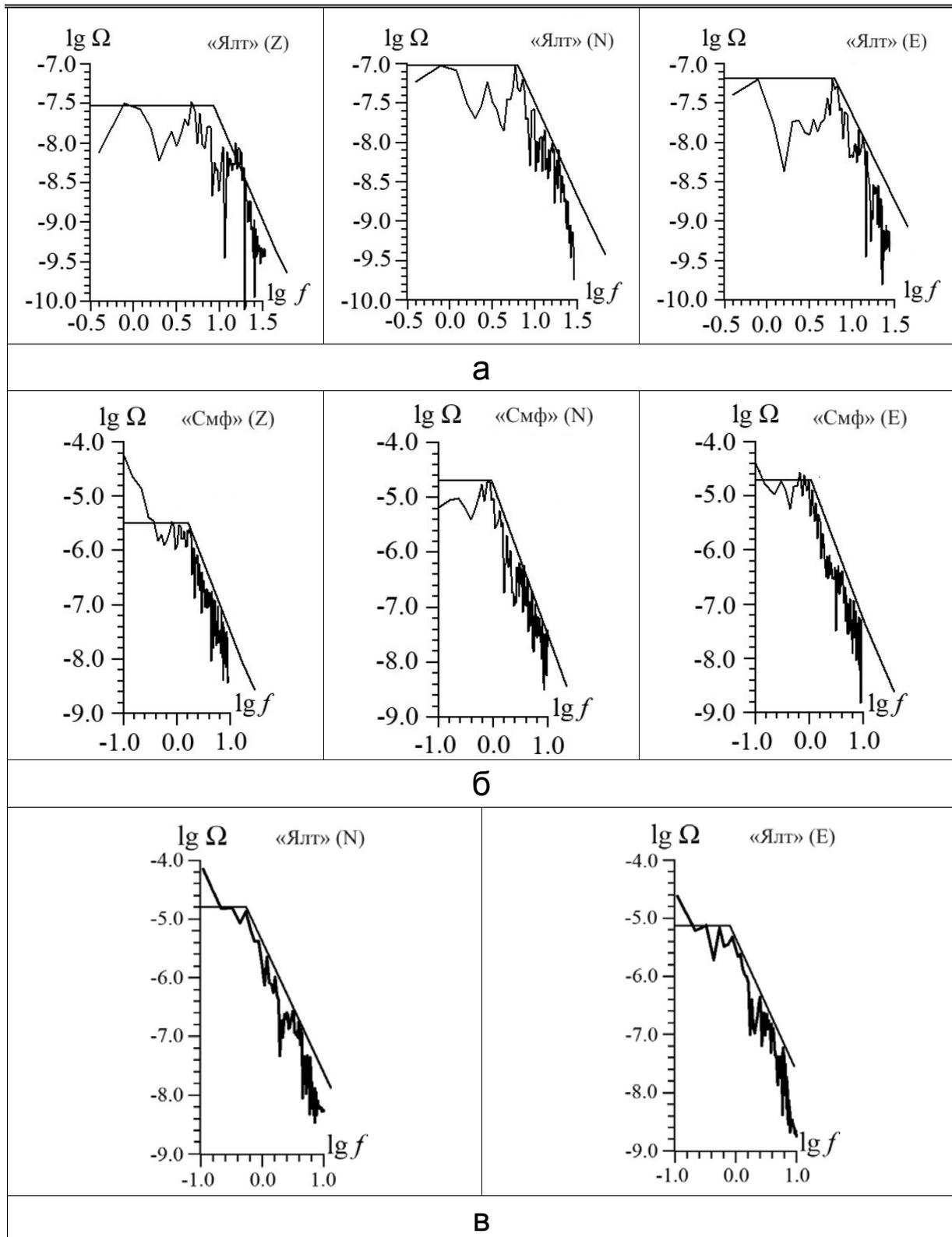


Рис. 3. Амплитудные спектры по цифровым записям для землетрясений 13 марта в 01^h31^m с $K_{II}=11.7$ (а, б) и 6 марта в 14^h18^m с $K_{II}=7.0$ (в)

Полученные амплитудные спектры достаточно хорошо удовлетворяют модели Брюна, что позволило уверенно выделить спектральные параметры: угловую частоту f_0 и спектральную плотность Ω_0 (рис. 2, 3). Характеристики амплитудных спектров f_0 и Ω_0 использованы для расчета динамических параметров очагов землетрясений [3, 4]. В табл. 2 представлены сле-

дующие параметры очагов землетрясений: Δ – эпицентральное расстояние, Ω_0 – спектральная плотность, f_0 – угловая частота, M_0 – сейсмический момент, r_0 – радиус круговой дислокации, $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение, ε – деформация сдвига, \bar{u} – средняя подвижка по разрыву. Здесь же приведены средние некорректированные (S) значения динамических параметров и моментной магнитуды M_w , рассчитанной по сейсмическому моменту M_0 . Вычисления M_w выполнены по формуле Канамори [6]:

$$M_w = \frac{2}{3} \cdot \lg M_0 - 10.7, \text{ где } M_0 \text{ в дин}\cdot\text{см.}$$

При оценке сейсмического момента для землетрясения 13 марта с известным механизмом очага [7] учитывалась расчетная поправка $R_{\theta\phi}$ за направленность излучения (табл. 2), для остальных землетрясений она была принята равной 0.4 по [3]. Спектральная плотность Ω_0 , полученная по спектру записей на двух горизонтальных составляющих, пересчитывалась в полный вектор колебаний, отмеченный как (N+E) (табл. 3).

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

Станция	Алушта	Севастополь	Ялта		Симферополь	
Волна	P	P	P	S	P	S
$R_{\theta\phi}$	0.74	0.75	0.77	0.27	0.66	0.45

Таблица 3. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2005 г.

Станция	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	M_w	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м
Землетрясение 20 февраля: $t_0=02^h41^m55.8^s$, $\varphi=44.97^\circ$, $\lambda=36.74^\circ$, $h=29$ км, $K_{II}=8.7$										
Алушта	N	186	0.06	2.0	5.2	3.1	0.69	6.9	2.3	0.11
Керчь	N	44	0.47	1.28	7.2	3.2	1.06	2.6	0.9	0.07
S					6.1	3.15	0.85	4.2	1.4	0.09
Землетрясение 6 марта: $t_0=14^h18^m20.1^s$, $\varphi=44.40^\circ$, $\lambda=34.35^\circ$, $h=23$ км, $K_{II}=7.0$										
Ялта*	N+E	18	0.097	5.9	0.56	2.5	0.23	21	7	0.11
Ялта*	Z	18	0.03	8	0.91	2.6	0.29	16	6.5	0.11
S					0.71	2.55	0.26	18	6.7	0.11
Землетрясение 13 марта: $t_0=01^h31^m22.6^s$, $\varphi=44.72^\circ$, $\lambda=37.14^\circ$, $h=6$ км, $K_{II}=11.7$										
Алушта	Z	216	1.17	1.08	136.3	4.1	1.82	0.99	3.3	0.44
Севастополь	Z	274	0.5	1.32	109.0	4.0	1.49	1.45	4.8	0.52
S					121.9	4.0	1.65	1.2	4.0	0.75
Симферополь*	Z	239	3.5	1.36	349	4.3	1.53	42.4	14.1	1.6
Симферополь*	N+E	239	28	0.8	630	4.5	1.4	100	33.7	3.4
Ялта*	N+E	237	12	0.72	716	4.5	1.55	83.9	28	3.2
S					514	4.4	1.44	70.3	23.5	2.5
Землетрясение 21 сентября: $t_0=19^h08^m01.7^s$, $\varphi=45.47^\circ$, $\lambda=37.23^\circ$, $h=34$ км, $K_{II}=9.3$										
Алушта	E	239	0.06	4.0	5.1	3.1	0.33	6.13	20.43	0.49
Судак	E	187	0.1	3.13	6.71	3.2	0.43	3.84	12.78	0.39
Ялта	E	265	0.04	4.0	3.8	3.0	0.33	4.52	15.07	0.36
S					5.1	3.1	0.36	4.74	15.79	0.41

Примечание. Знаком *отмечены данные цифровых станций.

Остановимся кратко на сравнительном анализе очаговых параметров по данным аналоговой и цифровой аппаратуры для землетрясения 13 марта 2005 г. Динамические параметры этого землетрясения ранее были определены по записям объемных волн с помощью только аналоговой аппаратуры [8] со значительными расхождениями в станционных оценках сейсмического момента M_0 . Так, по данным длиннопериодного сейсмометра СД-1 (скорость развертки записи

15 мм/мин), на станции «Симферополь» значение M_0 на 2–2.5 порядка получились выше, чем по данным короткопериодных каналов на других региональных станциях. Соответственно, разброс величин моментных магнитуд также был велик – $M_w=3.4–5.2$. Расчеты были проведены в предположении одинаковых значений направленности излучения из очага и частотных характеристик условий под всеми станциями. В настоящей работе эти недостатки устранены. Кроме того, отбракованы аналоговые записи по станциям «Симферополь» и «Керчь», оцифровка которых даже по характерным точкам отнесена к малонадежным (е).

Как отмечено выше, на цифровых сейсмических станциях «Симферополь» и «Ялта» регистрация рассматриваемого события производилась на короткопериодных (ЕН) и длиннопериодных (ВН) каналах. Пример функции смещения грунта, восстановленной с учетом АЧХ для ЕН канала, представлен на рис. 4.

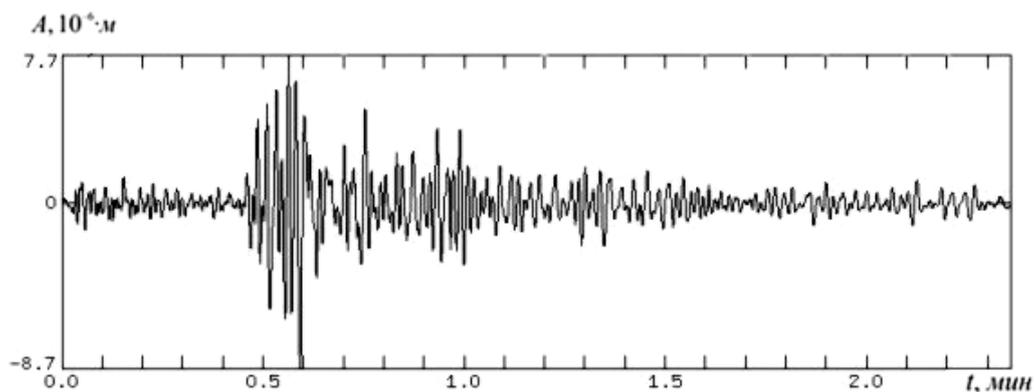


Рис. 4. Восстановленная запись смещений почвы на станции «Симферополь» (SDAS, EHN) при землетрясении 13 марта 2005 г.

Новые оценки динамических параметров рассмотренного землетрясения в табл. 3 существенно отличаются от прежних определений [12] не только количественной величиной найденных значений, но и лучшей внутренней сходимостью станционных определений. Обращает на себя внимание различие очаговых параметров, восстановленных по аналоговым и цифровым записям. Так, значение M_0 в среднем на 0.5 порядка, а $\Delta\sigma$ на 1.5 порядка получились ниже по данным станций с аналоговой регистрацией. Причины этого пока не ясны, т.к. расчет динамических параметров выполнен идентично с учетом направленности излучения, условий под станциями, одинаковых скоростях распространения волн и плотности пород в районе очага. Ошибки в параметрах частотных характеристик приборов также исключены. Вместе с тем следует отметить, что все полученные по цифровым станциям значения динамических параметров очага землетрясения 13 марта соответствуют долговременным зависимостям таковых от энергетического уровня [3], тогда как по аналоговым – существенно занижены, особенно сброшенное напряжение, равное $\Delta\sigma=1.2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, которое соответствует энергетическому классу $K_{II}=7.8$, а не $K_{II}=11.7$. Моментная магнитуда M_w , вычисленная по данным M_0 цифровых записей, получилась близкой к независимым определениям M_w на группе станций по методу тензора момента центра [9].

Это пока первые сравнения очаговых параметров по разным видам аппаратуры, которые необходимо продолжить на представительном материале. Отметим только, что регистрационные возможности станций с цифровым способом регистрации колебаний почвы гораздо шире за счет более широкополосной частотной характеристики и высокой разрешающей способности. Это особенно важно при регистрации сравнительно удаленных и сильных землетрясений, как, например, рассмотренное землетрясение 13 марта из Анапской группы очагов. В связи с этим за окончательные очаговые параметры этого землетрясения рекомендуется принять результаты по данным цифровых станций.

Обратим внимание еще на цифровую запись землетрясения, произошедшего 6 марта вблизи побережья Крыма на эпицентральной расстоянии 18 км от станции «Ялта» (рис. 5). Для этого события оказалось нетипичное соотношение амплитуд продольных и поперечных волн: $A_S/A_P=0.54$ при явном преобладании долговременных значений $A_S/A_P=4$. Соответственно, сейс-

мический момент по продольным волнам получился выше, чем по вектору поперечных колебаний при одинаковой принятой поправке за направленность излучения. В целом же все рассчитанные динамические параметры этого землетрясения (табл. 3) соответствуют долговременным значениям для данного энергетического уровня $K_{II}=7.0$ [3].

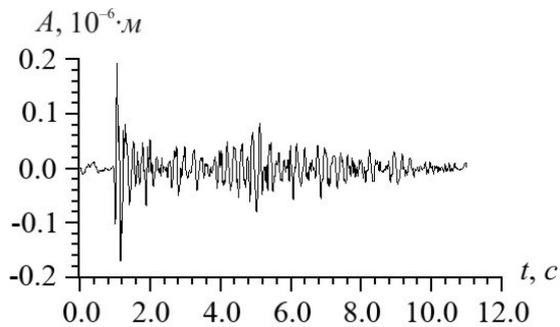


Рис. 5. Восстановленная запись смещений почвы на станции «Ялта» (SDAS, EHZ) при землетрясении 6 марта в 14^h18^m с $K_{II}=7.0$

Для землетрясений 20 февраля с $K_{II}=8.7$ и 21 сентября с $K_{II}=9.3$, обработанных по записям только аналоговых станций, значения сейсмического момента M_0 находятся в пределах погрешностей определяемых величин для данного уровня K_{II} . Вместе с тем можно отметить существенно заниженные оценки деформации сдвига ε и средней подвижки по разрыву u при высоком значении радиуса круговой дислокации r_0 для землетрясения 20 февраля.

По мере накопления экспериментальных данных по цифровым сейсмостанциям необходимо будет провести сравнительный анализ на идентичность и преемственность полученных ранее результатов и закономерностей по аналоговым записям.

Л и т е р а т у р а

1. 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 Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмической станции «Пулково» и «Екатеринбург». – Обнинск: ГСН РАН, 2006. – С. 77–83.
2. Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Козиненко Н.М. (отв. сост.). Каталог землетрясений Крыма за 2005 год ($N=29$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
3. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 249 с.
4. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры P -волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 2. – С. 66–79.
5. Brune J.N. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquake // J. Geophys. Res. – 1970. – 75. – N 26. – P. 4997–5009.
6. Hanks T.S., Kanamori H. A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – 84. – N 135. – P. 2348–2350.
7. Пустовитенко А.А. (отв. сост.). Каталог механизмов очагов землетрясений Крыма за 2005 год ($N=1$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
8. Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н. Спектры и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2005 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 год. – Симферополь: ОС ИГ НАНУ, 2007. – С. 28–31.
9. Bulletin of the International Seismological Centre for 2005. – Berkshire: ISC, 2007.