

КРИВОРОЖСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 25 декабря 2007 г.**с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$, $I_0=5$ (Украина, Днепропетровская область)****Б.Г. Пустовитенко^{1,2}, В.Е. Кульчицкий², А.А. Пустовитенко¹, А.М. Скляр¹**¹Отдел сейсмологии Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины²Крымский экспертный совет по оценке сейсмической опасности и прогнозу землетрясений, г. Симферополь, bella@seismoexpert.crimea.ua

25 декабря 2007 г. в 04^h09^m (местное время – 06^h09^m) на платформенной территории Украины в районе крупного горно-промышленного центра г. Кривой Рог (Днепропетровская область) произошло ощутимое землетрясение с интенсивностью в эпицентральной зоне $I_0=5$ баллов [1]. Землетрясение вызвало панику среди населения, поскольку ощутимые сейсмические толчки в этом районе происходят крайне редко. В соответствии с картой общего сейсмического районирования территории Украины (ОСР-2004) [2] в районе произошедшего землетрясения возможны сейсмические воздействия с интенсивностью $I=5$ баллов один раз в 500 лет, $I=6$ баллов – в 1000 лет и $I=7$ баллов – в 5000 лет (рис. 1). Наблюдаемые сейсмические воздействия от Криворожского землетрясения 2007 г. с интенсивностью в эпицентральной зоне $I=5$ баллов не превысили прогнозные расчетные значения.



Рис. 1. Фрагменты карт долговременной сейсмической опасности Украины [2] для района Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$ для периодов повторяемости 500 (а), 1000 (б) и 5000 лет (в) (звездочкой отмечено землетрясение с указанием интенсивности в эпицентре)

Инструментальные данные Криворожского землетрясения получены по записям 68 сейсмических станций, расположенных на расстояниях от 181 до 7400 км от эпицентра (рис. 2 б). Основные параметры землетрясения по данным различных сейсмологических центров, включая Крым, представлены в табл. 1, а местоположение эпицентров – на рис. 2 а.

Координаты эпицентра, определенные различными агентствами, близки между собой (рис. 2, а). Их средние значения составляют $\varphi=48.03^\circ \pm 0.03$; $\lambda=33.49^\circ \pm 0.06^\circ$. Наименьший эллипс ошибок с $a=3.3$ км, $b=2.2$ км получен в Средиземноморском центре CSEM [3] по записям 44 станций, а наибольший – в IDC по данным 13 станций.

При интерпретации волновых форм в сводной обработке в Крыму (программа WSG) были использованы только разности времен вступления объемных P - и S -волн (30 значений фаз) на близких ($\Delta < 760$ км) к эпицентру сейсмических станциях Украины, России, Молдовы, Румынии. Из обработки были исключены также записи на станциях, дающие большие невязки времен вступления волн. Из всех просчитанных вариантов наименьшие погрешности получены для глубины очага 10 км. В результате полученное в Крыму решение координат инструментального гипоцентра с $\varphi=47.99^\circ$, $\lambda=33.54^\circ$, $h=10$ км было принято как окончательное [4].

Таблица 1. Основные параметры Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. по данным Крыма и других сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Магнитуда	Источ- ник
			φ°, N	l_{\max} , км	λ°, E	l_{\min} , км	h , км	δh , км		
Крым, WSG	04 09 34.8	0.5	47.99	5	33.54	4	10		$K_p=9.7/10, MSH=3.2/6, Md=3.4/5$	[4]
Крым, GIPO-08	04 09 34.8	0.56	48.01	12	33.57	6	6	3	$MLH=3.1, Mw=3.7/3$ * h_{DP}	[5]
Макрос.			48.03		33.44		6	0.5	$M=3$	[1, 5]
MOS	04 09 32.8	0.97	48.07	7.4	33.44	5.7	18		$MPSP=4.0/7$	[6]
ISC	04 09 37.0	0.33	48.04	4.1	33.47	3.5	44	8	$m_b=3.7/8$	[3]
NEIC	04 09 36.7	0.51	48.08	6.8	33.49	4.8	44	9	$m_b=3.7/4$	[3]
CSEM	04 09 34.7	0.09	47.97	3.3	33.52	2.2	45		$m_b=3.8/3$	[3]
IDC	04 09 32.9	0.91	48.03	17.7	33.45	10.5	0		$ML=3.3/6, m_b=3.8/6$	[3]

Примечание. l_{\max} , l_{\min} – большая и малая полуоси эллипса погрешностей координат эпицентра; знаком * отмечены определения по разностям времен вступления P - и pP -волн.

Дополнительно были рассчитаны также координаты гипоцентра по программе GIPO-08, которая использует крымские региональные годографы [7] и годографы для головных волн [8]. Расчет проводился с применением техники минимизации невязок времен пробега волн (алгоритм Нелдера–Мида [9]). Для расчета привлечены данные времен вступлений P - и S -волн на 46 станциях с эпицентрными расстояниями $\Delta < 15^\circ$. Результаты этих расчетов отличаются от определений по программе WSG примерно на 2 км по широте и долготе. Очаг расположен северо-восточнее, глубина очага составляет 6 км, что на 4 км меньше прежних определений (табл. 1). Инструментальный эпицентр расположен в 10 км юго-восточнее макросейсмического (рис. 2, а).

Пространственно-инструментальные эпицентры по данным всех определений образуют вытянутую с юго-востока на северо-запад область (рис. 2 а), в центре которой находится макросейсмический эпицентр.

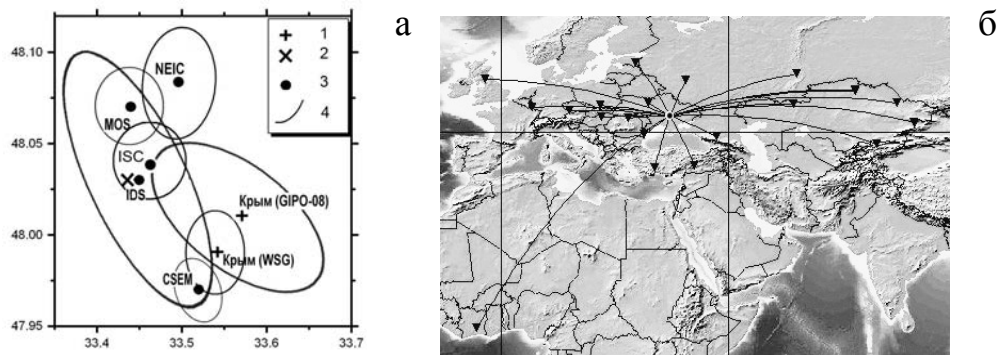


Рис. 2. Разные решения эпицентра Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. (а) и карта зарегистрировавших его сейсмических станций (б)

1, 2 – инструментальный и макросейсмический эпицентры по региональным данным; 3 – данные различных сейсмологических служб; 4 – эллипс ошибок.

Глубина очага характеризуется значительным разбросом – $h=21.5 \pm 22$ км (табл. 1), что связано с отсутствием близких ($\Delta < 100$ км) к очагу сейсмических станций. На качественном уровне можно предположить, что исследуемый очаг не мог быть расположен на глубинах $h \geq 15$ км, т.к. это противоречит быстрому спаду интенсивности сотрясений и распределению макросейсмического поля (см. рис. 5). С другой стороны, очаг не мог быть расположен в самых верхних ($h \leq 5$ км) слоях земной коры, поскольку сейсмические колебания сравнительно слабого ($K_p=9.7, MLH=3.1$) землетрясения были зарегистрированы большим числом станций на значительных (до 7400 км) расстояниях (рис. 2 б).

Для уточнения глубины очага были проанализированы волновые формы на группе станций. Волновые формы 14 записей с ВНЗ-составляющими получены из Интернет-сайтов

(<http://www.isc.ac.uk>). На стационарных сейсмических станциях Украины (Крымская сеть станций) [10] и станциях Института геофизики Национальной академии наук Украины «Степановка» ($\varphi=46.676^\circ$, $\lambda=30.899^\circ$), «Полтава» ($\varphi=49.603^\circ$, $\lambda=34.543^\circ$), «Сквира» ($\varphi=49.716^\circ$, $\lambda=29.656^\circ$) использованы трехкомпонентные записи. Интервал эпицентральных расстояний для станций, волновые формы которых использовались, составляет $\Delta=1.7-52.52^\circ$.

В соответствии с рекомендациями в [11] проводилась предварительная обработка записей с помощью цифровых фильтров. Сначала проводилась полосовая фильтрация с использованием окна Кайзера [12]. Фильтр Кайзера, в отличие от распространенного в сейсмологической практике фильтра Баттерворта, лучше подавляет эффект Гиббса. Затем выделялся спектр шума из спектра сигнала, а также проводилась фильтрация высоких частот и сглаживание фильтром Савицкого–Голея [13]. Этот фильтр был опробован на модельных примерах. Среди различных тестируемых фильтров он оказался наиболее эффективным. Выделение глубинных фаз pP проводилось с использованием спектрально-временных диаграмм (спектрограмм). Для 14 записей Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. только на 5 станциях («Арти», «Dimbakro», «Kasperske Notu», «Курчатов», «Tirgusor») удалось идентифицировать фазы, ответственные за глубинную фазу pP . На рис. 3 представлены два примера спектрограмм, на которых заметно вступление вторичной волны после момента прихода продольной волны. По всей вероятности, это может быть фаза волны pP . Начало отсчета времени на спектрограмме – момент первого вступления сейсмических волн. Вертикальная линия проведена по максимальному градиенту уровня поверхности $S(f,t)$, ближайшему к первому вступлению волны.

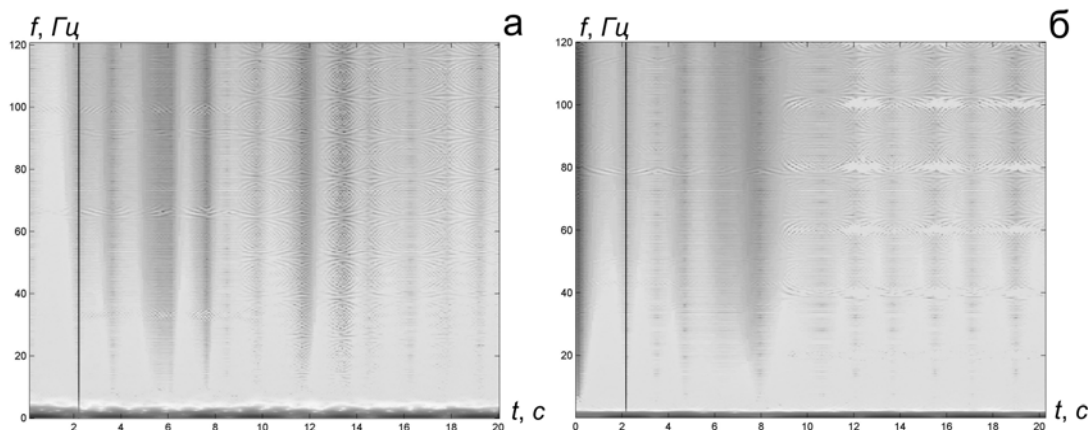


Рис. 3. Спектрограммы 20-секундных записей Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. в 04^h09^m с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$, полученные на сейсмических станциях «Tirgusor» (TIRR) (а) и «Kasperske Notu» (КНС) с $\Delta=5.02^\circ$ и 13.19° соответственно

На рис. 4 показан график зависимости разности времен вступлений выделенных на спектрограммах фаз pP - и P -волн от эпицентрального расстояния Δ° . Здесь же нанесены времена из годографа (pP -волн для глубины $h=15$ км из [8]).

Заметно, что контур выделенных фаз с минимальными временами $t_{pP}-t_P$ повторяет контур годографа. Проведя линейную интерполяцию годографов для глубин $h=0$ и 15 км, можно по временам разности фаз pP - P оценить глубину очага землетрясения (табл. 2). Среднее значение глубины по этим данным составляет $h_{pP}=9\pm 0.7$ км.

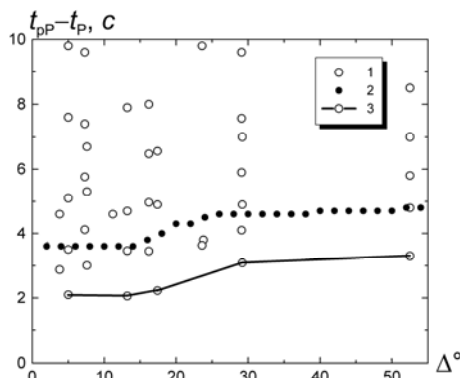


Рис. 4. Разности фаз выделенных вступлений вторичных волн относительно P -волн в зависимости от эпицентрального расстояния Δ

1 – выделенные фазы по спектрограммам; 2 – годограф разности времен $t_{pP}-t_P$ для глубины очага $h=15$ км [8]; 3 – разности времен вступлений pP - P , выделенные на спектрограммах.

Таблица 2. Глубина очага по разности времен вступлений $t_{pp}-t_p$ на спектрограммах

№	Станция		Δ°	$t_{pp}-t_p$, с	h_{pp} , км	№	Станция		Δ°	$t_{pp}-t_p$, с	h_{pp} , км
	Название	Код					Название	Код			
1	Tirgusor	TIRR	5.02	2.1	8.8	4	Курчатов	KURK	29.2	3.1	10.1
2	Kasperske Hory	KHC	13.2	2.1	8.8	5	Dimbakro	DBIC	52.5	3.3	10.3
3	Арти	ARU	17.4	2.0	8.5		Среднее				9.3

Магнитуды Криворожского землетрясения по объемным волнам m_b характеризуются хорошей сходимостью по данным обработки всех центров – $m_b=3.9\pm 0.1$. Исключение составляет только низкое значение данного типа магнитуд по записям цифровых станций Крыма – $m_b=3.0$. Причина этого пока не ясна и требует специального изучения. Определены также другие типы магнитуд: ML , Md , MSH , Mw , но ни один центр не дал среднее значение MLH или Ms по поверхностным волнам. В подробных данных бюллетеней ISC [3] и Крыма [4] магнитуда Ms указана по группе волн Релея только по двум станциям на Украине ($Ms=2.3$ – «Ялта», 3.9 – «Львов») и одной – в Казахстане ($Ms=3.5$ – «Курчатов»), расположенных на расстояниях $\Delta=3.6^\circ$, 6.4° и 29.2° соответственно. Малое число определений и значительный диапазон максимального и минимального значения Ms дали в целом большую погрешность в оценке этого типа магнитуд: $Ms=3.2\pm 0.6$. Поскольку $MLH\approx Ms$ является «опорной» для любых построений, включая прогноз M_{max} в зонах ВОЗ и расчет сейсмических воздействий, в наст. ст. был сделан также пересчет других видов магнитуд и энергетического класса K_p в MLH .

Оценка энергетического класса K_p этого землетрясения по записям сети станций выполнена по шкале Т.Г. Раутиан [14] и, соответственно, пересчет MLH произведен по стандартной формуле:

$$K_p=1.8 MLH + 4. \quad (1)$$

Оценка сейсмического момента M_0 и, соответственно, магнитуды Mw сделана по спектрам записей сейсмических станций Крыма (см. табл. 8). Пересчет других типов магнитуд в MLH осуществлен по корреляционным зависимостям из [15]:

$$\lg M_0 = (1.05\pm 0.023) MLH + (18.572\pm 0.048); \quad (2)$$

$$MLH = (1.66\pm 0.06) m_b - (3.5\pm 0.3); \quad (3)$$

$$MLH = (1.14\pm 0.06) ML - (0.92\pm 0.30); \quad (4)$$

$$MLH = (1.36\pm 0.06) Md - (1.86\pm 0.28). \quad (5)$$

Результаты расчетов MLH по уравнениям 1–5 и 7 даны в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные значения магнитуды MLH Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. с $K_p=9.7$

Исходные данные	K_p	Md	$\lg M_0$	m_b	ML	I_0	Среднее
Расчетные MLH	3.2	2.8	2.8	3.0	2.8	3.0	2.9 ± 0.1

В целом получена хорошая сходимость расчетных значений MLH с малым разбросом отклонений от среднего значения: $MLH=2.9\pm 0.1$. С учетом инструментальных определений по трем выше указанным станциям и расчетных значений в табл. 8 получена средняя величина $MLH\approx Ms=3.1\pm 0.3$, которая принята для включения в каталоги.

Макросейсмическое обследование выполнено методом анкетирования населения по специально разработанному вопроснику. Получено более 1200 надежных сведений об ощущении землетрясения. Анализ данных показал, что проявление макросейсмического эффекта от $I=5$ баллов до полного затухания воздействий ограничено городской территорией Кривого Рога и ближайших к нему населенных пунктов (рис. 5).

Следует отметить, что для г. Кривой Рог характерна значительная вытянутость в северном направлении (протяженность города с севера на юг составляет 135 км) и своеобразная застройка с компактно расположенными современными микрорайонами (Заречный, Солнечный, Восточный и др.), застроенными в основном многоэтажными зданиями, а также селами и пришахтными поселками (Лозуватка, Глееватка, Красная Балка и др.), в застройке которых преобладают одно- и двухэтажные каменные здания.

Обработка макросейсмических данных осуществлялась в соответствии со шкалой MMSK-84 [16]. В качестве основного объекта при определении интенсивности сотрясений выбран «человек в нормальном состоянии (в помещении: спящий, движущийся или занятый физическим трудом; люди вне помещения – в покое)», находившийся на первых этажах многоэтажных зданий или в одноэтажных домах. При недостатке информации по основному объекту для контроля расчетов привлекались данные по дополнительному объекту – «человек чувствительный (в помещении в спокойном состоянии)». Для каждого объекта оценивалась степень реакции d_i и выносилась на схему города масштаба 1:30 000. После этого производился расчет средней степени реакции $d_{ср.}$ для предварительно выделенных компактно расположенных микрорайонов и отдельных населенных пунктов. Переход от средней степени реакции к интенсивности сотрясений в баллах выполнен по критериям шкалы MMSK-84.

Согласно полученным результатам (табл. 4), интенсивность сотрясений в пределах изученной территории составила от 3 до 5 баллов. Изосейсты землетрясения имеют форму эллипсов, большие оси которых вытянуты в северо-западном направлении (рис. 5).

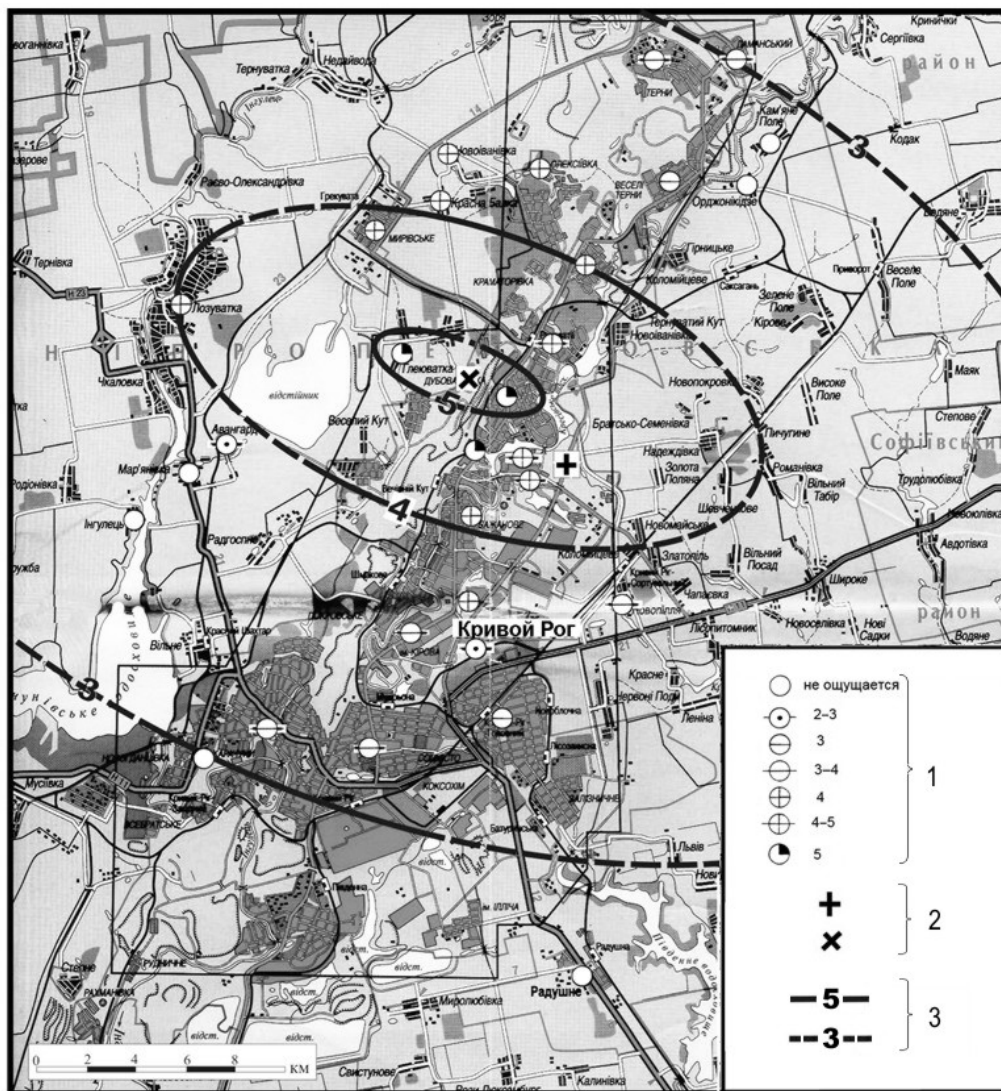


Рис. 5. Карта изосейст Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. в 04^h09^m с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$ (составили А.М. Скляр, В.С. Князева)

1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MMSK-84 [16] (значок интенсивности поставлен в центрах территорий, для которых определялась интенсивность); 2 – инструментальный и макросейсмический эпицентр; 3 – изосейста.

В зоне пятибалльных сотрясений, охватывающих площадь около $S_5=14 \text{ км}^2$, в центральной части города большинство спящих проснулись, многие испугались, почти все сумели оце-

нить длительность колебаний (от нескольких секунд до 2–3^м), несколько человек различили фазы сотрясений (один или два толчка; «сначала сильный толчок, потом сотрясения»). Землетрясение сопровождалось раскачиванием предметов и мебели, в одноэтажных зданиях осыпалась побелка, хлопали двери, выплескивалась вода из открытых сосудов.

Четырехбалльные сейсмические воздействия отмечены в селах Лозуватка, Новоивановка, Новополе, в Терновском и Заречном микрорайонах города. Площадь сотрясений S_4 составила около 200 км². Здесь землетрясение ощутили большинство опрошенных людей, некоторые стремились покинуть помещение. Отмечено раскачивание, колебание, дребезжание различных предметов, выплескивание воды из стаканов и ведер.

Таблица 4. Макросейсмические данные о Криворожском землетрясении 25 декабря 2007 г. в 04^h09^m с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$

№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E	№	Пункт	Δ , км	φ° , N	λ° , E
	<u>5 баллов</u>				16	п. Терны	14.5	48°08'32"	33°32'32"
1	п. Сухая балка	1.5	48°01'48"	33°27'40"	17	м/р Саксаганский	14.5	47°56'48"	33°24'31"
2	с. Глееватка	2.5	48°02'51"	33°25'19"	18	м/р Центральный	15	47°53'55"	33°20'07"
3	п. Фрунзе	2.5	48°00'28"	33°26'31"	19	м/р Даманский	16.5	48°08'45"	33°35'21"
	<u>4–5 баллов</u>				20	м/р Дзержинский	18	47°52'51"	33°23'22"
4	м/р Заречный	4	47°59'59"	33°28'34"		<u>3 балла</u>			
5	п. Соколовка	5	47°59'29"	33°28'48"	21	п. Веселые терны	11	48°06'02"	33°32'51"
6	п. Божедаровка	5	48°02'38"	33°29'27"	22	м/р Довгинецкий	13	47°55'38"	33°27'04"
	<u>4 балла</u>					<u>2–3 балла</u>			
7	п. Бажаново	5.5	47°59'01"	33°26'44"	23	м/р Восточный	8.5	47°56'13"	33°26'31"
8	с. Новоивановка	6.5	48°06'10"	33°26'57"	24	п. Авангард	9.5	48°00'26"	33°19'09"
9	м/р Мирровский	7	48°05'19"	33°23'42"		<u>Не ощущалось</u>			
10	м/р Закарпатский	7	48°04'09"	33°30'25"	25	с. Марьяновка	11.5	47°59'58"	33°17'37"
11	п. Красная балка	7.5	48°05'43"	33°25'37"	26	п. Орджоникидзе	13.5	48°05'54"	33°35'42"
12	м/р Солнечный	8.5	47°57'21"	33°26'53"	27	п. Ингулец	14	47°59'08"	33°16'01"
13	с. Алексеевка	8.5	48°05'43"	33°28'51"	28	с. Каменное	15	48°07'02"	33°36'41"
14	с. Лозоватка	12	48°03'40"	33°17'34"	29	м/р Карачуны	17	47°54'07"	33°17'27"
	<u>3–4 балла</u>				30	с. Радушное	23.5	47°49'23"	33°29'31"
15	с. Новополе	11.5	47°57'14"	33°31'41"					

Примечание. Принятые сокращения: п. – поселок; с – село; м/р – микрорайон.

Границы трехбалльной зоны достоверно установлены в северо-восточной и юго-западной частях исследованной территории, где они практически совпадают с границами г. Кривой Рог (рис. 5). Положение границ трехбалльной зоны на остальной части территории носит условный характер из-за отсутствия макросейсмической информации. Предположительно трехбалльным сотрясениям подверглась территория более 2000 км². В зоне трехбалльных сотрясений большинство опрошенных ощутили слабые воздействия в виде легкого раскачивания или удара, в единичных случаях люди пугались или выходили из помещений.

В целом можно отметить очень быстрый спад интенсивности с расстоянием, характерный для поверхностных очагов. Общая площадь ощутимости землетрясения составила около 2500 км² (табл. 5).

Таблица 5. Основные параметры макросейсмического поля Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. в 04^h09^m с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$

I_i , баллы	Геометрические параметры поля изосейст, км				Площадь S_i зоны, км ²
	ℓ_a	ℓ_b	$\bar{\ell}$	ℓ_a/ℓ_b	
5	7.2	2.6	4.3	2.8	14.7
4	24.2	11.2	16.5	2.2	213
3	84.4	33.8	53.4	2.5	2240

Примечание. ℓ_a , ℓ_b – большая и малая оси эллипсов; $\bar{\ell}$ – среднее геометрическое: $\bar{\ell} = \sqrt{\ell_a \cdot \ell_b}$.

По материалам макросейсмического обследования получены приближенные оценки глубины очага и магнитуды землетрясения. Для этого использовались макросейсмическая формула Блейка из [17] и уравнение Шебалина из [18]:

$$I_0 - I_i = v/2 \cdot \lg(1 + \Delta^2/h^2); \quad (6)$$

$$b \cdot M = I_0 + v \cdot \lg h - c, \quad (7)$$

где $I_0=5$; $I_i=4$; $b=1.5$; $v=3.5$; $c=3.0$; $\bar{\Delta}=11$ км – принятое авторами среднее расстояние до 4х-балльной изосейсты; h – глубина очага, M – магнитуда землетрясения.

Значения параметров очага землетрясения, рассчитанные по макросейсмическим данным с применением формул (6–7), составили: $h=6.7$ и 5.7 км; $M \sim 3.1$.

Такое же значение глубины ($h=6.4$ км) получены по формуле, не зависящей от параметров модели Блейка–Шебалина [19]:

$$h = \sqrt{\frac{\Delta_k^4 - \Delta_l^2 \Delta_i^2}{\Delta_l^2 + \Delta_i^2 - 2\Delta_k^2}},$$

где l, k, i – первая, вторая и третья изосейсты.

Таким образом, двумя способами установлено, что глубина макросейсмического гипоцентра составляет $h=6.3 \pm 0.4$ км.

О залегании глубины очага в верхнем слое земной коры свидетельствует и значение «логарифмической прочности» Q , рассчитанное по формуле $Q=MLH - \lg S_0$ [20]. При средней $MLH=3.1$ и площади первой изосейсты $S_0=14.7$ км² величина $Q=1.93$. По классификации Н.В. Шебалина очаги землетрясений с $Q < 3$ относятся к «вялым», возникающим в слое с низкими прочностными свойствами. Им также установлена тенденция уменьшения параметра Q с уменьшением глубины очага.

Очаговые параметры землетрясения, к которым относятся параметры разрывообразования, механизм очага и динамические параметры очага, восстановлены по записям волновых форм на близких и удаленных сейсмических станциях.

Параметры разрывообразования. Для исследования процессов вспарывания в очаге Криворожского землетрясения использована методика, разработанная из представления о протяженном движущемся источнике излучения [21]. Практическое использование данной методики заключается в интерпретации азимутального распределения времен запаздывания τ максимальной фазы в группе продольных волн P_{\max} относительно первого вступления P на данную станцию: $\tau = t_{P_{\max}} - t_P = f(Az)$ [22, 23]. Функции $\tau = f(Az)$ могут иметь один, два и более максимумов, что соответствует простому однонаправленному разрыву или более сложному, развивающемуся в двух и более направлениях [23]. По экстремальным параметрам азимутального годографа $\tau = f(Az)$ восстанавливаются значения азимута Az_0 , протяженности L , скорости вспарывания C и времени процесса разрывообразования T . Для построения азимутального годографа были изучены волновые формы по первичным записям на 14 сейсмических станциях Северной Евразии в диапазоне азимутов от 16° до 306° и эпицентральных расстояний от 190 до 760 км. Примеры записей и выделения времени наступления P_{\max} даны на рис. 6.

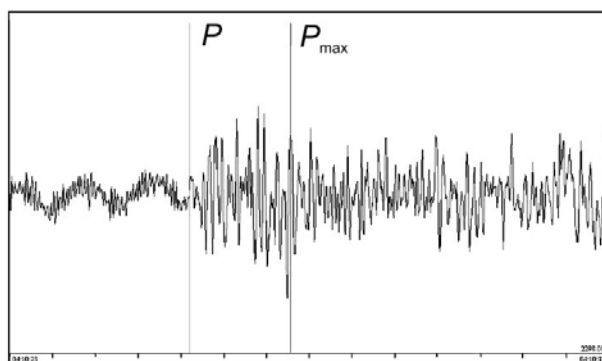


Рис. 6. Пример записи продольной волны на станции «Севастополь» (вертикальными линиями отмечены времена первого вступления P и максимальной фазы P_{\max})

Азимутальный годограф $\tau=f(Az)$ Криворожского землетрясения имел один четко выраженный максимум [24], что соответствует однонаправленному разрыву. С учетом средней скорости продольных волн в верхнем (0–10 км) слое земной коры, равной $v_p=6.3$ км/с в районе Криворожского массива [25], по формулам из [21] получена длина разрыва в очаговой зоне ($L=7.5$ км), скорость вспарывания ($C=3.1$ км/с), время процесса разрывообразования ($T=2.4$ с) и северо-западное направление разрыва (табл. 6).

Таблица 6. Параметры разрывообразования в очаге Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. в 04^h09^m с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$

Az , град.	δAz , град.	L , км	δL , км	C , км/с	δC , км/с	T , с	δT , с
330	15	7.5	0.5	3.1	0.1	2.4	0.2

Решение механизма очага получено на основе теории дислокации по стандартной методике [26]. Исходными данными служили знаки первых вступлений продольных P -волн, записанных 25 станциями на расстояниях $\Delta=250$ –3300 км в широком азимутальном окружении. Все знаки первых движений выверены по первичным данным волновых форм.

На стереографической проекции (нижняя полусфера) знаки, соответствующие волнам сжатия и разряжения, уверенно разделились нодальными плоскостями при двух несогласованных знаках на станциях вблизи нодальной плоскости $NP1$. Параметры механизма очага представлены в табл. 7, диаграмма – на рис. 7.

Таблица 7. Параметры механизма очага Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г.

Агентство	Дата, д м	t_0 , ч мин с	h , км	Магнитуды		K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Источник
				M_w	MLH		T		N		P		$NP1$			$NP2$			
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
Крым	25.12	04 09 34.8	10	3.7	3.1	9.7	52	183	38	12	5	279	219	60	135	336	52	39	[27]

В соответствии с полученным решением землетрясение произошло под действием горизонтальных ($PL_p=5^\circ$) сжимающих напряжений, ориентированных близшироотно ($AZM_p=279^\circ$). Направление растягивающих напряжений при этом было меридиональное ($AZM_T=183^\circ$). Тип подвижки в очаге – левосторонний взбросо-сдвиг с преобладанием сдвиговой компоненты. Одна из нодальных плоскостей ($NP2$) с азимутом простираения $STK_2=336^\circ$ и с падением к восток-северо-востоку близка по ориентации к направлению распространения разрыва ($330^\circ \pm 15^\circ$), восстановленному по азимутальному годографу времен запаздывания максимальных колебаний в группе продольных волн (табл. 6) и пространственному положению Ледекинского разлома (Ледекинская разломная зона [28]). Можно предположить, что по данной плоскости произошла главная подвижка, связанная с близдиагональным тектоническим нарушением, направленным с юго-востока на северо-запад.

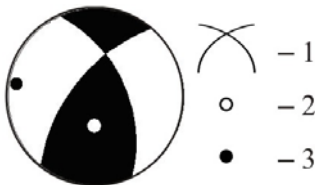


Рис. 7. Стереодиаграмма механизма очага Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$ в проекции нижней полусферы

1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно; зачернена область волн сжатия.

Динамические параметры очага землетрясения включают: M_0 – сейсмический момент; r_0 – радиус круговой дислокации; $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение; $\eta\sigma$ – кажущееся напряжение; $\Delta\sigma_r$ – радиационное трение; ε – деформацию сдвига; $\square u$ – среднюю подвижку по разрыву. Для определения этих параметров используются количественные связи, установленные между теоретическими моделями источников и основными характеристиками амплитудных спектров объемных волн.

Была использована модель Брюна [29], в рамках которой удовлетворительно описываются спектры записей землетрясений Крыма [30]. Методика интерпретации спектров в рамках данной модели и расчета динамических параметров очага по низкочастотному уровню спектра Ω_0 и угловой частоте f_0 описана в [30, 31]. Переход от стационарного спектра к очаговому осуществлялся с учетом методических рекомендаций, изложенных в работе [31]. Направленность излучения $R_{\theta\phi}$ получена из решения механизма очага [27], приведенного выше.

Динамические параметры восстановлены по амплитудным спектрам цифровых записей продольных P -волн (составляющая Z) и поперечных S -волн (составляющие N , E) на сейсмических станциях Крыма «Судак» (SUD , P и S), «Севастополь» (SEV , P и S), «Алушта» (ALU , S), а также аналоговой записи на станции «Алушта» (Алш, S). Ранее [32] динамические параметры были определены только по одной аналоговой записи станции «Алушта» (Алш, S) без учета реальной направленности излучения из очага и модели среды в зоне гипоцентра.

Расчет амплитудных спектров с использованием цифровых записей выполнен методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для аналоговой станции «Алушта» спектры записей получены экспресс-методом, описанным в [30]. Примеры спектров и их интерпретация в рамках модели Брюна [29] приведены на рис. 8 и 9. Значения Ω и f на осях даны, соответственно, в единицах: $m\cdot c$ и $Гц$, а энергетического параметра q_{max} – в $эрг/с$.

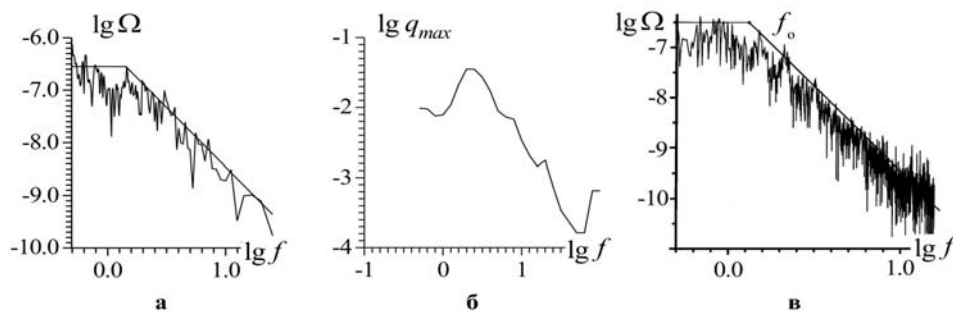


Рис. 8. Амплитудные (а, в) и энергетический (б) спектры поперечных волн S (составляющая E) по данным аналоговой (а, б) и цифровой (в) аппаратуры на станции «Алушта»

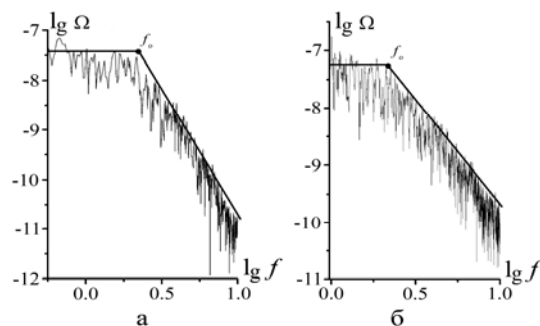


Рис. 9. Амплитудные спектры продольных волн P по цифровым записям на станциях «Судак» (а) и «Севастополь» (б)

Расчет среднего геометрического X по индивидуальным стационарным значениям и дисперсии S выполнен, исходя из логнормального закона распределения величин [30].

Как видно из табл. 8, получено хорошее согласие значений динамических параметров, восстановленных по записям различных типов волн и станций регистрации. Средняя дисперсия для всех определяемых величин не превысила значение 0.08. Наилучшая сходимость результатов отмечена для радиусов круговой дислокации: $r_0=1$ км ($S=0.01$).

Наименьший сейсмический момент $M_0=17.3\cdot 10^{13}$ $H\cdot m$ получен по P -волне (составляющая Z) на записи станции «Судак», а наибольший $M_0=46.2\cdot 10^{13}$ $H\cdot m$ – по полному вектору S -волны ($N+E$) на этой же станции. Среднее значение M_0 по шести определениям составило $33.8\cdot 10^{13}$ $H\cdot m$ с дисперсией $S=0.06$. Такой незначительный разброс M_0 мало сказался на оценке моментной магнитуды $M_w=3.7\pm 0.05$. Сброшенное и кажущееся напряжения составили,

соответственно, $\Delta\sigma=1.6\cdot 10^5$ Па (1.6 бар) и $\eta\sigma=1.9\cdot 10^5$ Па, средняя подвижка по разрыву – $\bar{u}=0.4$ м, деформация сдвига – $\varepsilon=5.3\cdot 10^{-6}$. Полученное отрицательное значение радиационного трения $\Delta\sigma_r=-1.06\cdot 10^5$ Па указывает на «шероховатость» разрыва в очаге, сложное скольжение берегов разрыва за счет неравномерного распределения прочностных свойств среды и потери энергии на излучение короткопериодных волн [33]. В целом восстановленные количественные значения очаговых параметров Криворожского землетрясения соответствуют таковым для других землетрясений (например региона Крым) эквивалентного энергетического уровня [30].

Таблица 8. Динамические параметры очага Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. в $04^{\text{h}}09^{\text{m}}$ с $K_p=9.7$, $MLH=3.1$, $M_w=3.7$

Станция	Составляющая	Δ , км	Ω_0 , мкм·с	f_0 , Гц	$R_{0\phi}$, км	M_0 , 10^{13} Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma$, 10^4 Па	$\eta\sigma\cdot 10^4$, Па	$\Delta\sigma_r\cdot 10^4$, Па	$\varepsilon\cdot 10^{-6}$	\bar{u} , 10^{-2} м	M_w
Алш	Е	354	0.28	1.43	0.58	34.5	0.91	20.4	16.9	-6.7	6.8	0.45	3.67
ALU	Е	354	0.316	1.29	0.58	39.9	1.04	15.5	15	-7.2	5.18	0.39	3.7
SUD	Z	362	0.04	2.24	0.72	17.3	1.05	6.6	34.5	-31.2	2.2	0.17	3.5
SUD	(N+E)	362	0.4	1.33	0.46	46.2	10.1	19.7	13	-3.1	6.6	0.48	3.7
SEV	Z	383	0.063	2.3	0.57	36.4	1.02	15	16.4	-8.9	5	0.37	3.67
SEV	N	383	0.316	1.41	0.67	37.0	0.95	18.8	16.2	-6.75	6.28	0.43	3.68
X – среднее геометрическое						33.8	1.0	15.04	17.7	-8.05	5.02	0.36	3.7*
S – дисперсия						0.06	0.01	0.07	0.06		0.08	0.07	

Примечание. Алш, ALU – аналоговая и цифровая запись соответственно, * – среднее арифметическое значение.

С использованием скалярного сейсмического момента M_0 для разрыва вдоль главной плоскости подвижки $NP2$ по формулам из [34] определены декартовы координаты тензора сейсмического момента и найден коэффициент Лоде–Надаи (μ), характеризующий вид напряженного состояния в очаге землетрясения [35]. Получено значение $\mu \approx 0$, что подтверждает преобладание в очаговой зоне сдвиговой компоненты напряжений [5].

Сейсмо тектонические условия района землетрясения. Криворожское землетрясение возникло в верхней части земной коры Приднепровского [36] или Среднеприднепровского [37] крупного блока Украинского щита. Его очаг приурочен к сложной зоне сочленения Криворожско-Кременчугского глубинного разлома субмеридионального направления и пересекающего его в диагональном направлении с юго-востока на северо-запад Ледекинского разлома (рис. 10 а) [28].

В этом районе, отнесенном к Криворожско-Кременчугской раннепротерозойской геосинклинальной системе [25], отмечено резкое увеличение мощности земной коры до 70 км (рис. 10 б) и знакопеременный характер тектонических движений [38]. Гипоцентр данного землетрясения был расположен в верхнем слое земной коры, осложненной системой протяженных отражающих горизонтов в кристаллической толще (рис. 10 б). Землетрясение произошло в обстановке близгоризонтального сжатия субширотной ориентации. При этом простирание nodальной плоскости $NP1$ близко к ориентации субмеридионального Криворожско-Кременчугского глубинного разлома, а $NP2$ – диагонального Ледекинского.

Интерпретация механизма очага и азимутального годографа времен запаздывания максимальных колебаний в группе продольных волн, а также ориентации первой изосейсты показала, что в очаговой зоне процесс вспарывания разрыва, вероятнее всего, развивался от начального гипоцентра на глубине 10 км вдоль Ледекинского глубинного разлома диагональной ориентации вверх до глубины $h=6$ км (макросейсмический гипоцентр), вызвав в этой части очаговой зоны максимальный макросейсмический эффект. Азимут с инструментального эпицентра на макросейсмический равен 301° , точное расстояние между ними 8.7 км. Такое соответствие между восстановленными очаговыми параметрами разрыва и данными местоположения эпицентров и глубин очагов инструментального и макросейсмического отражает реальный процесс накопления и снятия напряжений в очаговой зоне данного землетрясения. Следует также отметить, что сброс накопленных напряжений в очаговой зоне был одноактным. Следов предваряющих толчков (форшоков) и последующих (афтершоков) на сейсмограммах не установлено.

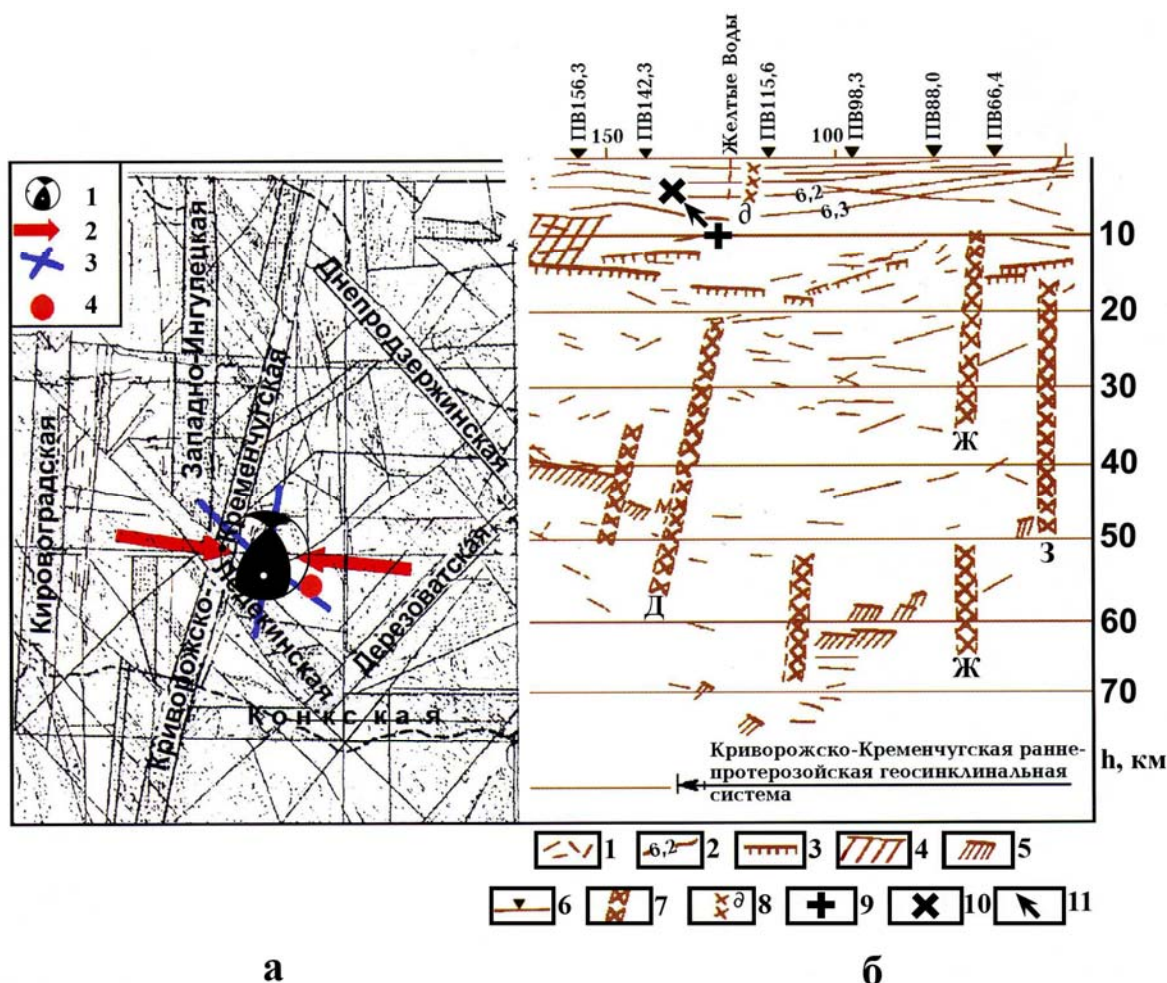


Рис. 10. Сейсмотектоническая позиция очага Криворожского землетрясения:

а – фрагмент тектонической карты Украины по [28]

1 – стереограмма механизма очага Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г.; 2 – направления осей сжатия; 3 – простирание нодальных плоскостей; 4 – эпицентр землетрясения 21.05.2001г. с $m_b=3.7$;

б – фрагмент сейсмогеологического разреза по профилю VIII Таганрог–Днепропетровск–Могилев-Подольский, Голованевск–Винница по [25]

1 – отражающие площадки; 2 – линии изоскоростей в кристаллической толще (км/с); 3 – протяженные отражающие горизонты в кристаллической толще; 4 – слой с пониженной скоростью в кристаллической толще; 5 – отражающие границы раздела М; 6 – пункты взрыва; 7 – глубинные и другие крупные разломы по данным ГСЗ (Д – Криворожско-Кременчугский; Ж – Верховцевский; З – Криничанский); 8 – разломы по геологическим данным (Д – Криворожско-Кременчугский); 9–10 – инструментальный и макросейсмический гипоцентры соответственно; 11 – направление вспарывания разрыва.

Восточная часть Украинского щита, где произошло Криворожское землетрясение, относится к промышленным районам Украины, где для добычи полезных ископаемых часто применяется метод взрывов различной мощности. Большая часть крупных промышленных взрывов, зарегистрированных удаленными сейсмическими станциями, попадает в каталоги землетрясений *ISC* [3], что может привести к ошибочным представлениям о реальной сейсмической опасности данной территории.

Только за последние 15 лет в каталоги [3] включено 8 сейсмических событий с $m_b=3.0$ – 3.9 , произошедших на расстояниях менее 100 км от Криворожского землетрясения. Переинтерпретация исходных данных, уточнение параметров гипоцентров и анализ генезиса этих восьми сейсмических событий показали, что только одно из них (21.05.2001 г.) уверенно можно интерпретировать как тектоническое землетрясение [5].

Л и т е р а т у р а

1. **Скляр А.М., Князева В.С., Останин А.М.** Макросейсмический эффект Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2007 год. – Симферополь: ИГ НАНУ, 2009. – С. 14–16.
2. **Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А.** Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности // Геофизический журнал. – 2006. – **28**. – № 3. – С. 54–75.
3. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2007.** – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2009.
4. **Козиненко Н.М.** Подробные данные о землетрясении 25 декабря 2007 г. в районе Кривого Рога (Днепропетровская область) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2007 год. – Симферополь: ИГ НАНУ, КЭС, 2009. – С. 63–65.
5. **Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А., Скляр А.М.** Инструментальные и макросейсмические данные о процессах в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. // Геофизический журнал. – 2010. – **32**. – № 2. – С. 75–97.
6. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2007 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2007–2008. – [Электронный ресурс]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2007/.
7. **Кульчицкий В.Е., Сафонова Г.П., Свидлова В.А.** Годографы сейсмических волн Крымско-Черноморских землетрясений // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым–Карпаты) за 1983 г. – Киев: Наукова думка, 1986. – С. 94–103.
8. **Kennet B.L.N.** Seismological Tables: ak135 // Research School of earth Sciences Australian national University. – Australia, Canberra, АСТ0200, 2005. – 80 с.
9. **Nelder J.A., Mead R.** A simplex method for function minimization // Comp. J. – 1965. – **7**. – P. 308–313.
10. **Свидлова В.А., Пасынков Г.Д., Пустовитенко А.А.** Крым. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
11. **Габсатарова И.П., Бабкова Е.А.** Параметры Бердянского землетрясения 31 июля 2006 г. с $MS=3.3$ (Украина, Запорожская обл.) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 год. – Симферополь: ИГ НАНУ, КЭС, 2008. – С. 18–26.
12. **Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б.** Основы цифровой обработки сигналов. – СПб.: ВНУ-Петербург, 2005. – 768 с.
13. **Дьяконов В., Абраменкова И.** MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
14. **Раутиан Т.Г.** Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
15. **Пустовитенко Б.Г.** Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма: дис. д-ра физ.-мат. наук. ИГ НАНУ. – Киев, 2003. – 305 с.
16. **Ершов И.А., Шебалин Н.В.** Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов // Прогноз сейсмических воздействий (Вопросы инженерной сейсмологии; Вып. 25). – М.: Наука, 1984. – С. 78–89.
17. **Шебалин Н.В.** Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР / Под ред. С.В. Медведева. – М.: Наука, 1968. – С. 95–111.
18. **Шебалин Н.В.** Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. – М.: Наука, 1975. – С. 87–109.
19. **Шебалин Н.В.** Опорные землетрясения и уравнения макросейсмического поля // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 24.
20. **Шебалин Н.В.** Очаги сильных землетрясений на территории СССР. – М.: Наука, 1974. – 54 с.
21. **Горбунова И.В.** Определение протяженности очага и направления разрыва по волновой картине на сейсмограмме // ДАН СССР. – 1981. – **261**. – № 4. – С. 836–839.
22. **Горбунова И.В., Бойчук А.Н., Доцев Н.И., Кальметьева З.А., Капитанова С.А., Кучай О.А., Михайлова Н.Н., Пустовитенко Б.Г., Симбирёва И.Г., Товмасын А.К.** Интерпретация очаговых волн на записях землетрясений. – М.: Наука, 1992. – 130 с.

23. **Горбунова И.В., Пустовитенко Б.Г.** Новая методология изучения сложного сейсмического разрывообразования // Геофизический журнал. – 1997. – **19**. – № 3. – С. 42–47.
24. **Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А.** Процессы в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2007 год. – Симферополь: ИГ НАНУ, КЭС, 2009. – С. 17–22.
25. **Строение земной коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы.** (Глава VII). – Киев: Наукова думка, 1978. – С. 136–147.
26. **Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И.** Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. – М.: Наука, 1972. – 198 с.
27. **Пустовитенко А.А. (отв. сост.).** Каталог механизмов очагов землетрясений Украины (Криворожское землетрясение) за 2007 г. ($N=1$). (См. Приложение к наст. сб. на CD).
28. **Єнтін В.А.** Геофізична основа тектонічної карти України масштабу 1:100 000 // Геофизический журнал. – 2005. – **27**. – № 1. – С. 74–84.
29. **Brune J.V.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – **75**. – N 26. – P. 4997–5009.
30. **Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
31. **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.
32. **Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н.** Спектры и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2007 год // Сейсмологический бюллетень Украины за 2007 год. – Симферополь: ИГ НАНУ, КЭС, 2009. – С. 11–13.
33. **Костров Б.В.** Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
34. **Аки К., Ридардс П.** Количественная сейсмология. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. – 520 с.
35. **Никитин Л.В., Юнга С.А.** Методы теоретического определения тектонических деформаций и напряжений в сейсмоактивных областях // Физика Земли. – 1977. – № 11. – С. 54–67.
36. **Трипольский А.А., Шаров Н.В.** Литосфера докембрийских щитов Северного полушария Земли по сейсмическим данным // Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. – 159 с.
37. **Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Кутас Р.И.** Глубинное строение Украинского щита // Геофизический журнал. – 2002. – № 6. – С. 36–48.
38. **Палієнко В.П., Спиця Р.О., Кендзера О.В., Омельченко В.Д., Бондар А.Л., Засць І.М.** Сучасні рухи земної кори на території України: проблеми тектонічної інтерпретації та картографування // Геоінформатика. – 2004. – № 1. – С. 66–73.