

## Инструментальные и макросейсмические данные о процессах в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г.

© Б. Г. Пустовитенко<sup>1</sup>, В. Е. Кульчицкий<sup>2</sup>, А. А. Пустовитенко<sup>1</sup>,  
А. М. Скляр<sup>1</sup>, 2010

<sup>1</sup> Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

<sup>2</sup> КРП "Крымский экспертный совет по оценке  
сейсмической опасности и прогнозу землетрясений",  
Симферополь, Украина

Поступила 7 сентября 2009 г.

*Представлено членом редколлегии А. В. Кензерой*

Наведено результати дослідження кінематичних і динамічних характеристик сейсмічних хвиль і вогнища відчутного Криворізького землетрусу 25.12.2007 р. Подано уточнені дані стосовно глибини гіпоцентру землетрусу й розподілу інтенсивностей дивігтіння. Уперше для землетрусу території Українського щита відновлено вогнищеві параметри: механізм вогнища, динамічні характеристики, компоненти тензора сейсмічного моменту, параметри розривоутворення. Показано, що деформування середовища у вогнищевій зоні було зсувним, ковзання берегів розриву — "шорсткуватим", розривоутворення відбувалося знизу догори у північно-західному напрямку. Проведено ідентифікацію сейсмічних подій за останні 15 років у районі Криворізького землетрусу. Сформульовано завдання підвищення рівня показовості землетрусів у східній частині України.

In this paper the results of the studies of kinematical and dynamic characteristics of seismic waves and source for tangible Krivorozhsky earthquake on 25.12.2007 are presented. The refined data about the depth of the earthquake hypocenter and shaking intensity distribution are quoted. For the first time for the earthquake of the territory of the Ukrainian Shield focus parameters are restored, namely: source mechanism, dynamic characteristics, seismic moment tensor components, parameters of tearing process. It is shown, that deformation of medium in focal zone was shearing, the sliding of rupture bands was "rough", the tearing process developed as directed from the bottom upward to the northwestern direction.. Identification of seismic events for the last 15 years around Krivorozhsky earthquake has been carried out. The problems of improvement the earthquake representative estimate for the eastern part of Ukraine have been formulated.

**Общие сведения о землетрясении.** Ранним утром 25 декабря 2007 г. в 04 ч 09 мин (местное время 06 ч 09 мин) на платформенной части Украины в районе крупного горно-промышленного центра г. Кривой Рог Днепропетровской области произошло ощутимое землетрясение с интенсивностью в эпицентральной зоне  $I = 5$  баллов [Скляр и др., 2009]. Землетрясение вызвало панику среди населения, обеспокоенность органов местной вла-

сти и повышенный интерес средств массовой информации. В первые дни после землетрясения возникли разные гипотезы относительно генезиса сейсмического толчка: искусственный источник (горный удар, мощный промышленный взрыв), индуцированное землетрясение (за счет разработок месторождений) или природное тектоническое землетрясение. Детальное исследование источника сейсмических колебаний показало (доказало) его

природное происхождение за счет естественных сейсмотектонических процессов, протекающих в данном районе.

Землетрясение с магнитудой  $M_{LH} = 3,1$  и  $M_W = 3,7$  произошло в пределах крупного домена с прогнозируемой магнитудой  $M_{LH} = 3,5$  по общей схеме линеаментно-доменной модели зон возникновения очагов землетрясений [Уломов, 1999; Пустовитенко и др., 2006]. Прогнозная суммарная сейсмическая опасность для данной территории от всех сейсмотектонических структур (включая данный домен) для разных периодов повторяемости отображена на новых картах общего сейсмического районирования Украины (ОСР-2004) [Пустовитенко и др., 2006]. В соответствии с ОСР-2004 в районе произошедшего 25.12.2007 г. землетрясения 1 раз в 500 лет возможны сейсмические воздействия с интенсивностью  $I = 5$  баллов, 1 раз в 1000 лет с  $I = 6$  баллов и 1 раз в 5000 лет с  $I = 7$  баллов с вероятностью превышения расчетных интенсивностей соответственно 0,90, 0,95 и 0,99 в течение 50 лет (рис. 1). Наблюденные сейсмические воздействия от Криворожского землетрясения с интенсивностью в эпицентральной зоне 5 баллов не превысили прогнозные расчетные значения.

Анализ геолого-геофизической обстановки в районе Криворожского землетрясения дан в работе [Кутас и др., 2009].

Цель настоящего исследования — уточнение основных и очаговых параметров данного землетрясения по инструментальным записям на сейсмических станциях и по результатам макросейсмического обследования территории, а также их совместная интерпретация. Особое внимание уделено восстановлению физических параметров очага, уточнению глубины гипоцентра и проблемам изучения сейсмичности района произошедшего землетрясения.

**Инструментальные данные.** Криворожское землетрясение было инструментально зарегистрировано 68 сейсмическими станциями на расстояниях до 7400 км ( $66,9^\circ$ ) и обработано во многих сейсмологических международных центрах.

Основные параметры землетрясения по данным восьми центров обработки данных, включая Крым, представлены в табл. 1, а местоположение эпицентров — на рис. 2.

**Координаты эпицентра**, определенные различными агентствами, близки между собой (в пределах погрешностей их определения — эллипса ошибок) и их средние значе-

ния составляют:  $\varphi = 48,04^\circ \pm 0,03^\circ$ ;  $\lambda = 33,49^\circ \pm 0,06^\circ$ . Наименьший эллипс ошибок (3,3—3,2 км) получен в Средиземноморском центре CSEM по записям 44 станций, а наибольший — при оперативной обработке в Бухаресте (BUC) и по крымской программе GPO-08. Исключив из осреднения результаты оперативной обработки (BUC, GSRA, EMSC) получим мало отличающиеся параметры среднего эпицентра  $\varphi = 48,03^\circ \pm 0,03^\circ$ ;  $\lambda = 33,50^\circ \pm 0,04^\circ$ . Исключение из рассмотрения дополнительно данных с наибольшими эллипсами ошибок (IDC, Крым\*\*\*) также практически не повлияло на средние значения:  $\varphi = 48,03^\circ \pm 0,05^\circ$ ;  $\lambda = 33,49^\circ \pm 0,03^\circ$ .

При интерпретации волновых форм и сводной обработке в Крыму (программа WSG) были использованы только разности времен вступлений объемных  $P$ - и  $S$ -волн (30 значений фаз) на близких к эпицентру сейсмостанциях Украины, Молдовы, Румынии, России до расстояния 760 км. 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 полученные в Крыму координаты инструментального гипоцентра ( $\varphi = 47,99^\circ$ ;  $\lambda = 33,54^\circ$ ;  $h = 10$  км) были приняты за окончательные и помещены в каталог и подробные данные [Козиненко, 2009]. Эти параметры всего на  $0,02^\circ$  отличаются от данных центра обработки CSEM.

При выполнении данной работы дополнительно были рассчитаны координаты гипоцентра по программе GPO-08, которая использует крымские региональные годографы [Кульчицкий и др., 1986] и годографы для головных волн [Kennet, 2005]. Расчет проводился с применением техники минимизации невязок времен пробега волн (алгоритм Нелдера — Мида). Для расчета привлечены данные времен вступлений  $P$ - и  $S$ -волн на 46 станциях с эпицентрными расстояниями менее  $15^\circ$ . Результаты расчетов координат гипоцентра отличаются от прежних определений крымской сети: по широте и долготе примерно на 2 км, очаг расположен северо-восточнее, глубина очага составляет 6 км, что на 4 км меньше прежних определений (см. табл. 1), эпицентр расположен в 10 км восточнее макросейсмического (см. рис. 2). Пространственно инструментальные эпицентры по данным всех определений образуют область, вытянутую в направлении юго-восток — северо-запад, в

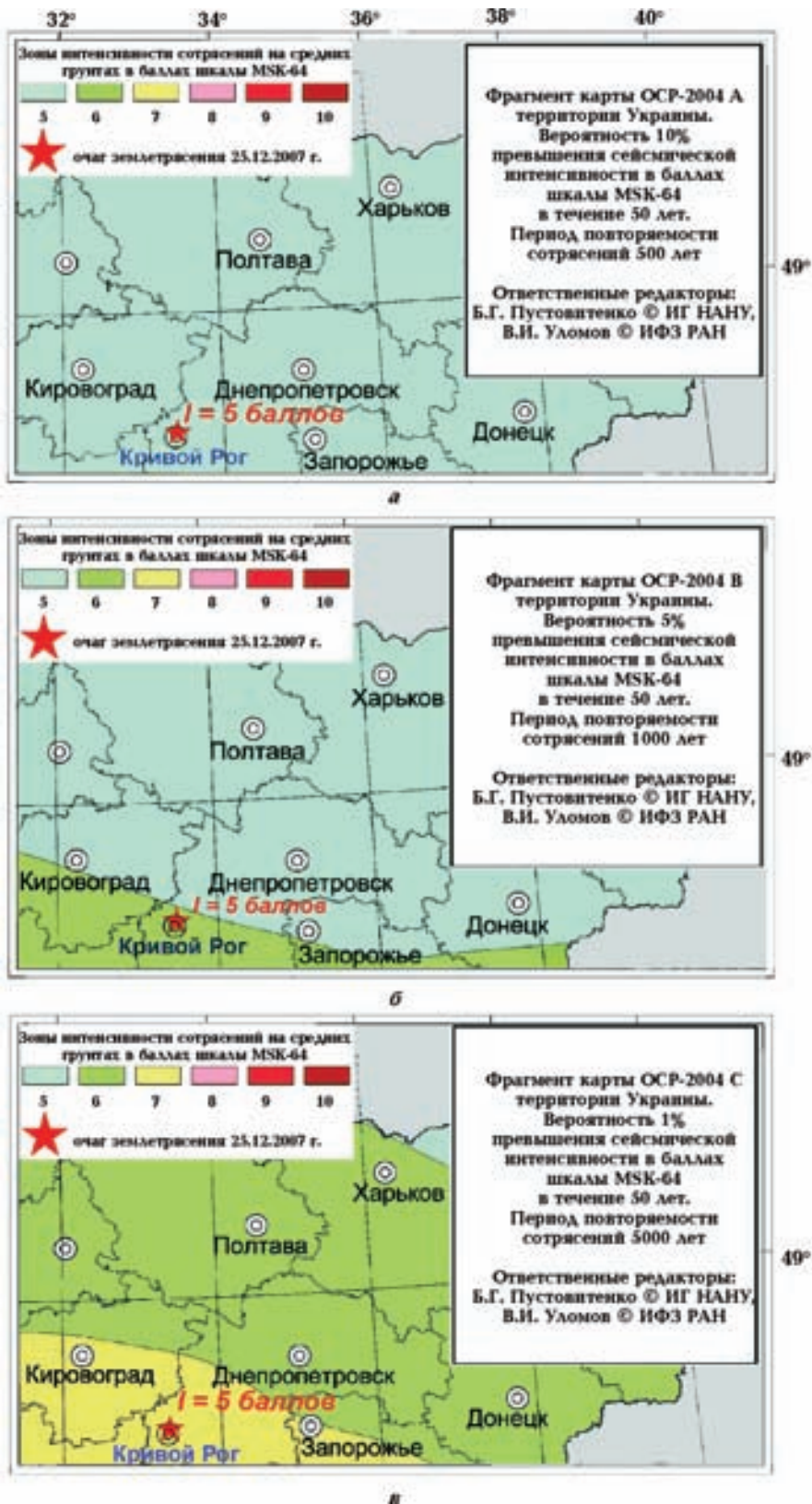


Рис. 1. Долговременная сейсмическая опасность района землетрясения 25.12.2007 г. для периодов повторяемости: а — 500 лет, б — 1000 лет, в — 5000 лет [Пустовитенко и др., 2006]. Звездочкой отмечен эпицентр произошедшего землетрясения с указанием интенсивности в эпицентре.

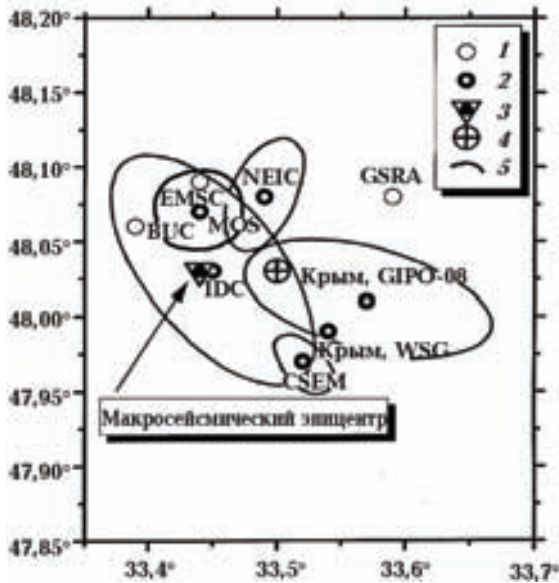


Рис. 2. Карта-схема положения эпицентров Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г., определенных в различных сейсмологических агентствах: 1 — оперативные данные, 2 — данные по системам наблюдений и региональной интерпретации, 3 — по макросейсмической информации, 4 — среднее геометрическое положение эпицентра, 5 — эллипсы погрешностей.

центре которой находится макросейсмический эпицентр и инструментальный эпицентр, полученный методом усреднения координат различных агентств. Расчет значений координат некоего среднего геометрического эпицентра выполнен нами из соображений демонстрации устойчивости в оценке его местоположения. Формально эти параметры можно было внести в каталог, если бы во всех определениях участвовали одни и те же исходные данные и одинаковые методики обработки и интерпретации. Поскольку это не так, то за основную версию (окончательную) приняты данные сводной обработки в Крыму (WSG), полученные в основном по группе близких станций с широким азимутальным окружением и тщательной обработкой волновых форм (выбирались только пары четких времен вступлений *P*- и *S*-волн). Время в очаге принято по графику Вадати.

**Глубина очага.** Отмечен значительный разброс данных в определении глубины очага:  $h = 23,7 \pm 22$  км. Даже если исключить из рассмотрения результаты агентства BUC (с максимальной глубиной очага  $h = 63$  км), полученные оперативно по 8 станциям, то разброс отклонений также останется соизмеримым с глубиной очага  $h = 18 \pm 17,5$  км. При



Рис. 3. Географическое расположение сетей сейсмических станций, данные которых использованы в настоящей работе. Сплошными линиями обозначены кратчайшие расстояния до эпицентра по поверхности земной сферы.

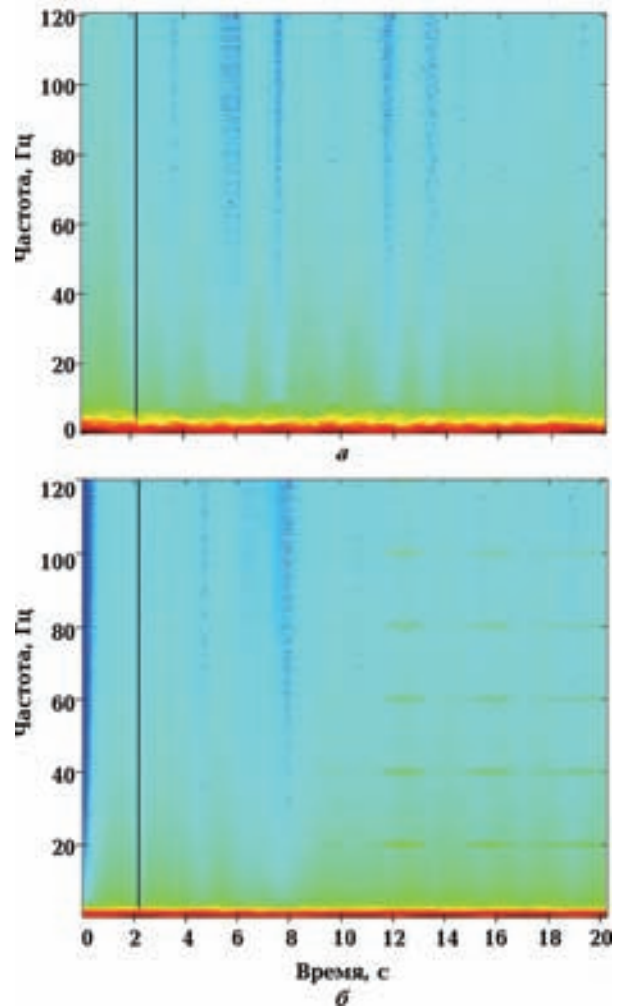


Рис. 4. Спектрограммы 20-секундных записей Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г., полученные на сейсмических станциях: а — TIRR ( $\Delta = 5,02^\circ$ ), б — KHC ( $\Delta = 13,19^\circ$ ).

этом значение средней глубины гипоцентра несколько уменьшится. Такой разброс и неопределенность в оценке глубины очага связаны, прежде всего, с отсутствием близких к очагу сейсмостанций ( $\Delta < 100$  км), наиболее чувствительных к глубине [Гусев, 1979]. На качественном уровне было высказано предположение [Пустовитенко и др., 2009], что очаг не мог быть расположен на большой глубине ( $h > 15$  км), так как это противоречит быстрому спаду интенсивности сотрясений и распределению макросейсмического поля. Кроме того, очаг не мог быть расположен в самых верхних слоях земной коры ( $h \leq 5$  км), поскольку сейсмические колебания сравнительно слабого землетрясения были зарегистрированы большим числом сейсмостанций на значительных расстояниях почти до 7500 км.

Для уточнения глубины очага в рамках данной работы были проанализированы волновые формы на группе станций. Волновые формы 14 записей (ВНЗ-составляющие) получены из Интернет (<http://www.isc.ac.uk>) и на сейсмических станциях Украины (Крымская сеть станций, станции "Степановка", "Полтава", "Сквира"), представленных трехкомпонентными записями. Интервал эпицентральных расстояний для станций, волновые формы которых использовались, составляет от 1,7° до 52° (рис. 3).

В соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [Габсатарова и др., 2008], проводилась предварительная обработка записей с помощью цифровых фильтров. Сначала проводилась полосовая фильтрация с использованием окна Кайзера [Солонина и

**Т а б л и ц а 1. Основные параметры Криворожского землетрясения 25.12.2007 г. по данным различных сейсмологических агентств и макросейсмическим данным**

Время в очаге, $t_0$	Координаты эпицентра		$h$ , км	Эллипс ошибок		Магнитуды		Количество фаз	Источник
	ч, мин, с	$\varphi$ , °N		$\lambda$ , °E	Az°	$l_{\max} - l_{\min}$ , км	$m_b(n)$ [ $K_p$ ]		
04 09 37,4*	48,06	33,39	63	68	49,4—11		2,9 ( $M_L$ ) 3,8 ( $M_S$ )	8	BUC
04 09 36,2*	48,08	33,59	—	—	—	3,9 (5)	—	11	GSRA (MSK)
04 09 30,8*	48,09	33,44	2	157	8,6—5,9	3,9	—	19	EMSC
04 09 32,9	48,03	33,45	0	152	17,7—10,5	3,8 (6)	3,3 ( $M_L$ )	13	IDC
04 09 36,7	48,08	33,49	44	214	6,8—4,8	3,7 (4)	—	39	NEIC
04 09 34,7	47,97	33,52	45	137	3,3—2,2	3,8 (3)	—	44	CSEM
04 09 32,8	48,07	33,44	18	91	7,4—5,7	4,0 (7)	—	39	MOS
04 09 34,8	47,99	33,54	10	—	4—14**	3,0 (6) [9,7]	3,2 ( $M_{SH}$ ) 3,4 ( $M_D$ ) 3,7 ( $M_W$ )	30	Крым*** Крым****
04 09 34,8	48,01	33,57	6	280	20—10	—	—	68	—
04 09	48,03	33,44	5	—	—	—	3,0	—	Макро*****

*Прмечание:* \* — оперативная информация, \*\* — диапазон разброса значений эпицентральных расстояний до группы станций относительно эпицентра, \*\*\* — обработка по стандартной программе WSG, \*\*\*\* — обработка по региональной программе GPO-08, \*\*\*\*\* — гипоцентр землетрясения по макросейсмическим данным.

др., 2005]. Фильтр Кайзера, в отличие от распространенного в сейсмологической практике фильтра Баттерворта, имеет большие возможности получить спектральную характеристику с хорошей минимизацией эффекта Гиббса. Затем выделялся спектр шума из спектра сигнала. Для этого из спектра части записи "сигнал—шум" вычитался спектр шума и проводилась фильтрация высоких частот и сглаживание фильтром Савицкого — Голея [Дьяконов, Абраменкова, 2002]. Этот фильтр был опробован на модельных примерах и среди различных тестируемых фильтров оказался наиболее эффективным. Выделение глубинных фаз  $pP$  проводилось с использованием двух методов: анализа кепстра и спектрограмм. Неэффективным для выделения фаз оказался кепстральный метод. Более информативны спектрально-временные диаграммы (спектрограммы) — средство визуализации сигнала на плоскости функции преобразования  $S(f, t)$ , где  $f$  — частота (ордината),  $t$  — время (абсцисса),  $S$  — спектр мощности, отображаемый на спектрограмме в виде цветовой гаммы, где большие амплитуды  $S$  выделены более яркими цветами. Расчет спектрограмм основан на алгоритме так называемого "оконного преобразования Фурье", когда в интеграл преобразования Фурье в качестве дополнительного множителя добавляется "оконная" функция, выполняющая роль фильтрационного множителя. Это означает, что вдоль записи, в некотором заданном интервале времени и частот, рассчитывается спектр. Затем вся процедура повторяется со сдвигом вдоль записи. Появление фаз на записи отображается на спектрограмме вертикальными полосами более насыщенного цвета, соответствующими резкому изменению значений спектральных амплитуд. В нашем случае в качестве оконной функции используется окно Кайзера.

Для 14 записей землетрясения 25 декабря 2007 г. только на 5 станциях ARU, DBIC, KHC, KURK, TIRR удалось идентифицировать фазу, ближайшую к первому вступлению. На рис. 4 представлено два примера фрагментов спектрограмм, на которых заметно вступление вторичной волны после момента прихода продольной волны. По всей вероятности, это может быть фаза волны  $pP$ . Начало отсчета времени — момент первого вступления сейсмических волн. Вертикальная линия проведена по максимальному градиенту уровня поверхности  $S(f, t)$ , ближайшему к первому вступлению волны.

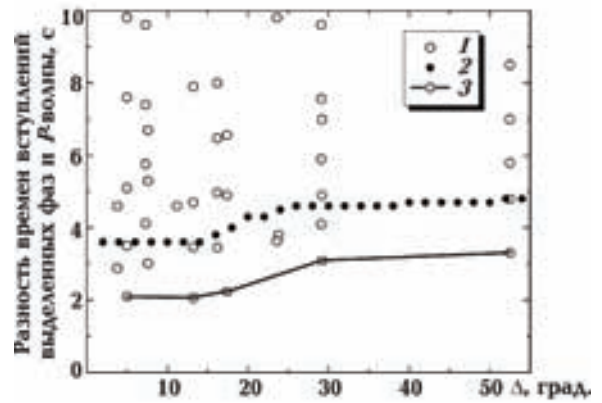


Рис. 5. Разности фаз выделенных вступлений вторичных волн относительно  $P$ -волны в зависимости от эпицентрального расстояния  $\Delta$ : 1 — выделенные фазы по спектрограммам, 2 — годограф разности времен вступлений волн  $pP$  и  $P$  для глубины очага 15 км [Kennet, 2005], 3 — разности времен вступлений фаз и  $P$ -волны, выделенные на спектрограммах.

Если построить график в координатах "разность времен вступлений выделенных фаз и  $P$ -волны — эпицентральное расстояние  $\Delta$ ", то можно заметить (рис. 5), что фазы с минимальными временами повторяют контур годографа  $pP$ - $P$  для 15 км [Kennet, 2005]. Это дает повод предположить, что выделенные фазы с минимальными временами относятся к фа-

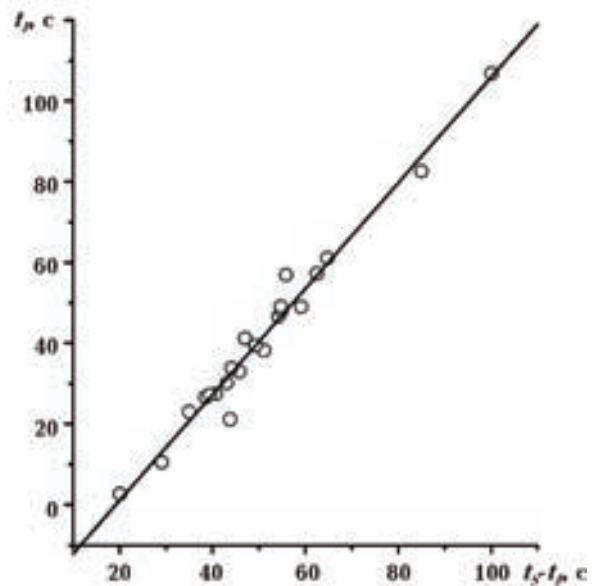


Рис. 6. График Вадати для Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г.

**Т а б л и ц а 2. Времена вступлений предполагаемой глубинной фазы  $pP$ -волны, выделенные по спектрограммам**

Сейсмические станции	$\Delta$ , град	$pP$ - $P$ , с	$h$ , км
TIRR	5,02	2,1	8,8
KHC	13,2	2,1	8,8
ARU	17,4	2,0	8,5
KURK	29,2	3,1	10,1
DBIC	52,5	3,3	10,3
Среднее значение глубины			9,3

зам вступлений  $pP$ -волн. Проведя линейную интерполяцию годографа получим, что выделенным фазам  $pP$  соответствует средняя глубина очага порядка 9 км (табл. 2).

Таким образом, можно с уверенностью считать, что глубина очага составляет не более 15 км и, по всей вероятности, заключена в пределах от 5 до 15 км. Этим выводам не противоречат и независимые макросейсмические оценки (см. ниже). Взяв за основу определения по глубинным фазам, примем глубину очага  $h = 9 \pm 4$  км (табл. 3).

Для проверки соответствия первичной кинематической информации и табличных годографов [Kennet, 2005] был построен график Вадати (рис. 6), по которому определялось время в очаге, затем были рассчитаны времена пробега волн и сравнивались с табличными годографами для различных глубин. График Вадати построен в интервале эпицентральных расстояний от 181 до 849 км по данным 23 сейсмических станций. Время в очаге по графику Вадати составляет 04 ч 09 мин 34,8 с, что не отличается от обработки по Крымской сети станций (см. табл. 1). Если сопоставить рассчитанные времена пробега, исходя из полученного нами значения времени в очаге 34,8 с, то наименьшие средние невязки соответствуют годографу для 11 км, среднеквадратичные невязки — годографу для 12 км.

Таким образом, среднее значение глубины составляет  $h = 10 \pm 1$  км по всем дополнительным методам. Вместе с тем опыт работ по интерпретации сейсмических записей и оценки глубин очагов показывает, что погрешность  $\Delta h = \pm 1$  км это только внутренняя сходимость результатов, а не реальная точность, которая гораздо больше и может достигать половины определяемой величины.

Принимая во внимание все перечисленные факторы и новые определения, примем за окончательную оценку глубины очага Криворожского землетрясения 2007 г. среднее значение, равное  $10 \pm 5$  км.

**Магнитуды.** Все центры обработки данных оценили значение магнитуд по объемным волнам  $m_b$  с хорошей сходимостью результатов:  $m_b = 3,9 \pm 0,1$ . Исключение составляет только определение данного типа магнитуд по записям цифровых станций Крыма с  $m_b = 3,0$ . Причина этого пока не ясна и требует специального изучения. Определены также другие типы магнитуд:  $m_s, M_L, M_D, M_{SH}, M_W$ , но ни один центр не дал значение  $M_{LH}(M_S)$  по поверхностным волнам. В подробных данных бюллетеней ISC и Крыма [Козиненко, 2009] указаны  $M_{LH}(M_S)$  по группе волн Рэлея только по трем станциям:  $M_S = 3,5$  — KURK (Курчатов, Казахстан),  $M_S = 3,9$  — LVV (Львов) и  $M_S = 2,3$  — YLT (Ялта), расположенных на расстояниях соот-

**Т а б л и ц а 3. Расчетные значения магнитуд  $M_{LH}$**

Исходные данные	$K_p$	$K_D$	$M_W$	$\lg M_0$	$m_b$	$M_L$	$I_0$	Среднее
Расчетные $M_{LH}$	3,2	2,8	2,8	2,8	3,0	2,8	3,0	$2,9 \pm 0,1$

ветственно  $29,2^\circ$ ,  $6,4^\circ$  и  $3,6^\circ$ . Малое число определений и значительный диапазон максимального и минимального значения  $M_S$  дали в целом большую погрешность в оценке этого типа магнитуд:  $M_S = 3,2 \pm 0,6$ . Поскольку  $M_{LH}$  является "опорной" для любых построений, включая прогноз  $M_{\max}$  в зонах ВОЗ и расчет воздействий, авторы сделали также перерасчет  $M_{LH}(M_S)$  из других видов магнитуд и энергетического класса  $K_p$ . Оценка энергетического класса  $K_p$  этого землетрясения по записям сети станций выполнена по шкале Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1960] и соответственно перерасчет  $M_{LH}$  произведен по стандартной формуле:

$$K_p = 1,8 M_{LH} + 4.$$

Оценка сейсмического момента  $M_0$  и соответственно магнитуды  $M_w$  сделана только в рамках данной работы (см. ниже). Пересчет всех типов магнитуд в  $M_{LH}$  осуществлен по корреляционным зависимостям из работы [Пустовитенко, 2003]. Результаты расчетных значений  $M_{LH}$  даны в табл. 3.

В целом получена хорошая сходимость расчетных значений  $M_{LH}$  с малым разбросом отклонений от среднего значения:  $M_{LH} = 2,9 \pm 0,1$ . С учетом инструментальных определений (по трем вышеуказанным станциям) и расчетных значений получим среднюю величину  $M_{LH}(M_S) = 3,1 \pm 0,3$ , которую можно принять для включения в каталоги.

**Макросейсмические данные.** Сбор сведений о характере распределения макросейсмического эффекта выполнен сотрудниками Отдела сейсмологии Института геофизики НАН Украины в период с 20 по 25 апреля 2008 г. путем анкетирования населения по специально разработанному вопроснику. Всего получено более 1200 надежных сведений об ощущаемости землетрясения. Предварительный анализ полученных данных показал, что проявление макросейсмического эффекта (от 5 баллов до полного затухания) ограничено территорией г. Кривой Рог и ближайших населенных пунктов.

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 (Лозоватка, Глееватка, Красная Балка и

др.), в застройке которых преобладают одно- и двухэтажные каменные здания.

Обработка макросейсмических данных осуществлялась в соответствии с признаками шкалы MSK-84 [Ершов, Шебалин, 1984]. 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 — "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 ( $d_{cp}$ ) для предварительно выделенных компактно расположенных микрорайонов и отдельных населенных пунктов. Переход от средней степени реакции к интенсивности сотрясений в баллах выполнен по критериям шкалы MSK-84.

Согласно полученным результатам (табл. 4) интенсивность сотрясений в пределах изученной территории составила от 3 до 5 баллов (рис. 7).

В зоне пятибалльных сотрясений, охватывающих площадь около 14 км<sup>2</sup>, в центральной части города большинство спящих проснулись, многие испугались, почти все сумели оценить длительность колебаний (от нескольких секунд до 2—3 мин), 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 Лозоватка, Новоивановка, Новополе, в Терновском и Заречном микрорайонах г. Кривой Рог. Здесь землетрясение ощутили большинство опрошенных, некоторые стремились покинуть помещение. Многие определили продолжительность землетрясения (от 1,5 до 20 мин). Отмечено раскачивание, колебание, дребезжание различных предметов, выплескивание воды из стачанов и ведер.

Границы трехбалльной зоны достоверно установлены в северо-восточной и юго-запад-



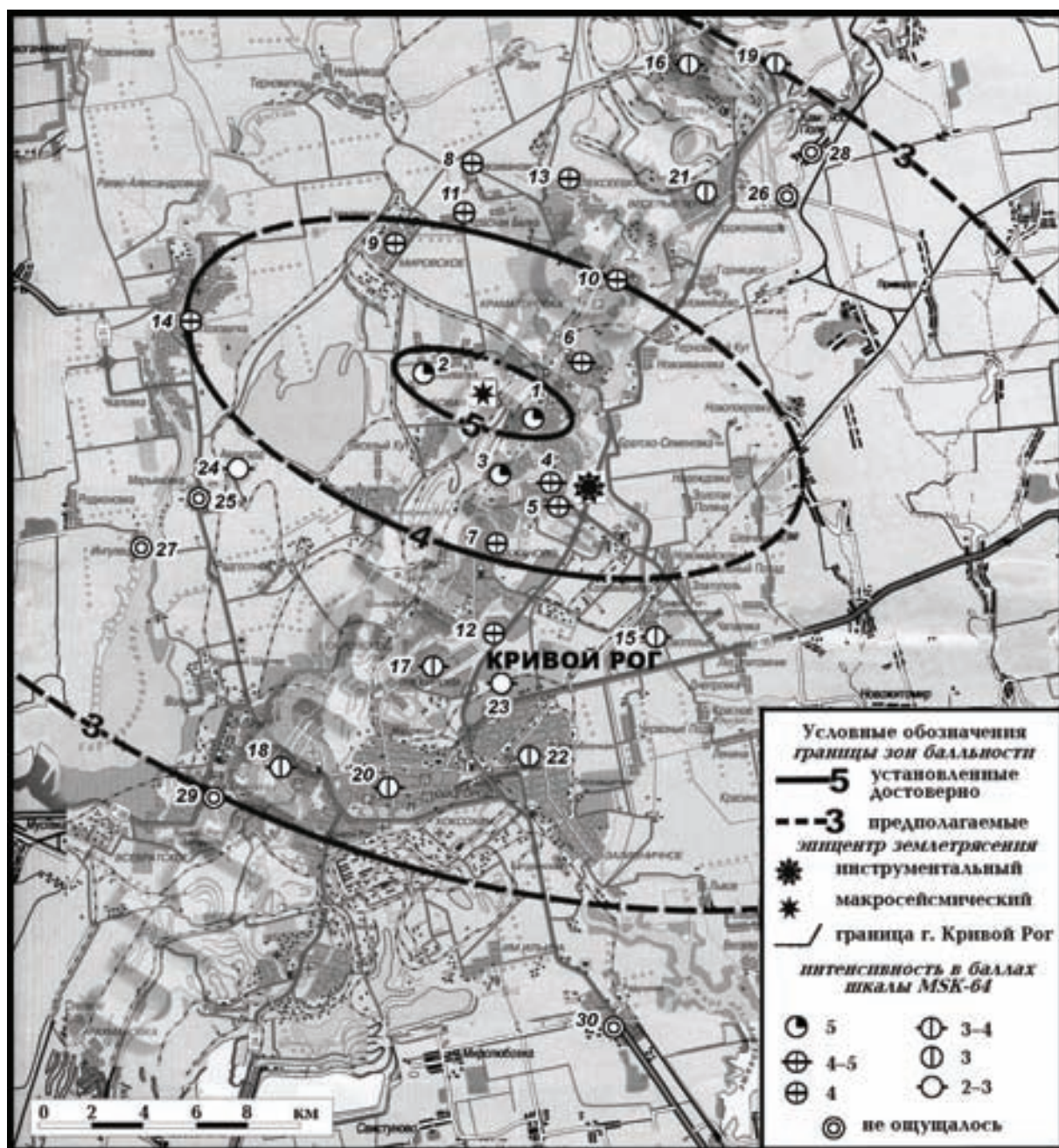


Рис. 7. Схема распределения макросейсмического эффекта Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. Составили: Скляр А.М., Князева В.С. Значок интенсивности соответствует центру территории, для которой определялась интенсивность сотрясений.

ной частях исследованной территории, где они практически совпадают с границами города. Положение границ трехбалльной зоны на остальной части территории носит условный характер из-за отсутствия макросейсмической информации. В зоне трехбалльных сотрясений большинство опрошенных ощутили слабые воздействия в виде легкого раскачива-

ния или удара, в единичных случаях люди пугались или выходили из помещений.

По материалам макросейсмического обследования получены приближенные оценки глубины очага и магнитуды землетрясения. Использовались модифицированные уравнения макросейсмического поля Блейка — Шебалина [Шебалин, 1975]:

**Т а б л и ц а 4. Интенсивности сотрясений в районах г. Кривой Рог при землетрясении 25.12.2007 г.**

Название района	Расстояние до макросейсмического эпицентра, км	Азимут	Название района	Расстояние до макросейсмического эпицентра, км	Азимут
5 баллов			3—4 балла		
п. Сухая Балка	1,5	107	с. Новополие	11,5	144
с. Глееватка	2,5	297	п. Терны	14,5	36
п. Фрунзе	2,5	138	м/р Саксаганский	14,5	194
4—5 баллов			м/р Центральный	15	196
м/р Заречный	4	150	м/р Даманский	16,5	40
п. Соколовка	5	148	м/р Дзержинский	18	189
п. Божедаровка	5	73	3 балла		
4 балла			п. Веселые Терны	11	47
п. Бажаново	5,5	177	м/р Довгинецкий	13	172
с. Новоивановка	6,5	356	2—3 балла		
м/р Мировский	7	330	м/р Восточный	8,5	178
м/р Закарпатский	7	52	п. Авангард	9,5	254
п. Красная Балка	7,5	5	Не ощущалось		
м/р Солнечный	8,5	176	с. Марьяновка	11,5	251
с. Алексеевка	8,5	29	п. Орджоникидзе	13,5	56
с. Лозоватка	12	288	п. Ингулец	14	247
—	—	—	с. Каменное	15	53
—	—	—	м/р Карачуны	17	215
—	—	—	с. Радушное	23,5	169

$$I_i - I_0 = v / 2 \lg (1 + \Delta^2 / h^2),$$

$$bM = I_0 + v \lg (h) - c,$$

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

где  $I_0 = 5$ ;  $I_i = 4$ ;  $b = 1,5$ ;  $v = 3,5$ ;  $c = 3,0$ ;  $\Delta$  — среднее расстояние до  $i$ -й изосейсты (нами принято  $\Delta = 11$  км),  $h$  — глубина очага,  $M$  — магнитуда землетрясения.

Значения параметров очага землетрясения, рассчитанные по макросейсмическим данным, составили в среднем:  $h = 5,5$  км,  $M \sim 3,0$ .

Примерно такие же значения глубины ( $h = 6,4$  км) получены по формуле, не зависящей от параметров модели Блейка — Шебалина [Новый ..., 1977]:

где  $l, k, i$  — первая, вторая и третья изосейсты.

Таким образом, двумя способами установлено, что глубина макросейсмического гипоцентра составляет  $h = 6 \pm 0,5$  км.

**Очаговые параметры землетрясения. Параметры разрывообразования.** Для исследования процессов вспарывания в очаге Криворожского землетрясения использована методика, разработанная из представления о протяженном движущемся источнике излучения

[Горбунова, 1981]. Практическое использование данной методики заключается в интерпретации азимутального распределения (азимутального годографа) времен запаздывания  $\tau$  максимальной фазы в группе продольных волн  $P_{\max}$  относительно первого вступления  $P$  на данную станцию  $\tau = tP_{\max} - tP = f(Az)$  [Горбунова и др., 1992; Горбунова, Пустовитенко, 1997]. 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 [Горбунова, Пустовитенко, 1997]. По экстремальным параметрам годографа  $\tau_{\max}$  восстанавливаются значения азимута  $Az_0$ , протяженности  $L$ , скорости вспарывания  $C$  и время процесса разрывообразования  $T$ .

Для построения азимутального годографа были изучены волновые формы по записям на 14 сейсмических станциях Северной Евразии в диапазоне азимутов от 16 до 306 градусов и эпицентральных расстояний от 190 до 760 км. Примеры записей и выделения времени  $P_{\max}$  даны в работе [Пустовитенко и др., 2009].

Все доступные сейсмограммы были просмотрены и заново проинтерпретированы с единых позиций определения времен вступления фаз и волновых групп. Часть сейсмограмм оказалась недоступной, в этом случае фазы  $P_{\max}$  были взяты из соответствующих сейсмологических бюллетеней.

Для исследуемого землетрясения экспериментальные значения  $\tau$  достаточно гладко описываются огибающей кривой (рис. 8). На графике  $\tau(Az)$  видна только одна точка с отклонением от аппроксимирующей функции с большим значением  $\tau$  для данного уровня магнитуд, которая была исключена из рассмотрения. Азимутальный годограф  $\tau = f(Az)$  Криворожского землетрясения имеет один четко выраженный максимум, что соответствует однонаправленному разрыву. Экстремальные параметры годографа: максимальное  $\tau_{\max} = 3,6$  с в азимуте  $Az = 150 \pm 15^\circ$ , минимальное  $\tau_{\min} = 1,2$  с. С учетом средней скорости распространения продольных волн в верхнем слое зем-

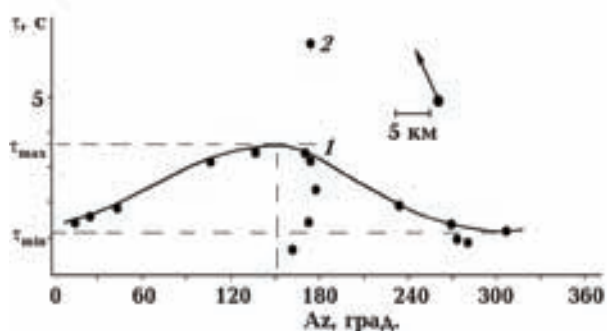


Рис. 8. Азимутальное распределение времен запаздывания продольных волн ( $\tau$ ) Криворожского землетрясения 25.12.2007 г. Точки 1 и 2 относятся к двум вариантам времен запаздывания  $\tau$  на записях сейсмостанции "Алушта". Справа стрелкой показано положение разрыва на горизонтальной поверхности в указанном масштабе.

ной горы (до 10 км) равной  $V_p = 6,3$  км/с в районе Криворожского массива [Строение ..., 1978] по формулам из работы [Горбунова, 1981] получим длину 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 направления разрыва в  $Az = 330 \pm 15^\circ$  (см. табл. 4).

**Решение механизма очага** получено на основе теории дислокации [Введенская, 1969] по стандартной методике [Балакина и др., 1972]. Исходными данными служили знаки первых вступлений продольных волн  $P$ , записанных 25 станциями на расстояниях от 250 до 3300 км в широком азимутальном окружении.

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. Диаграмма механизма очага и его параметры представлены на рис. 9 и в табл. 6.

В соответствии с полученным решением, землетрясение произошло под действием горизонтальных сжимающих напряжений ( $PL = 5^\circ$ ), ориентированных близширно в азимуте  $279^\circ$ . Направление растягивающих напря-

**Т а б л и ц а 5. Параметры разрывообразования в очаге Криворожского землетрясения 25.12.2007 г.**

$Az^\circ$	$L$ , км	$C$ , км/с	$T$ , с
$(330 \pm 15)$	7,5	3,1	2,4

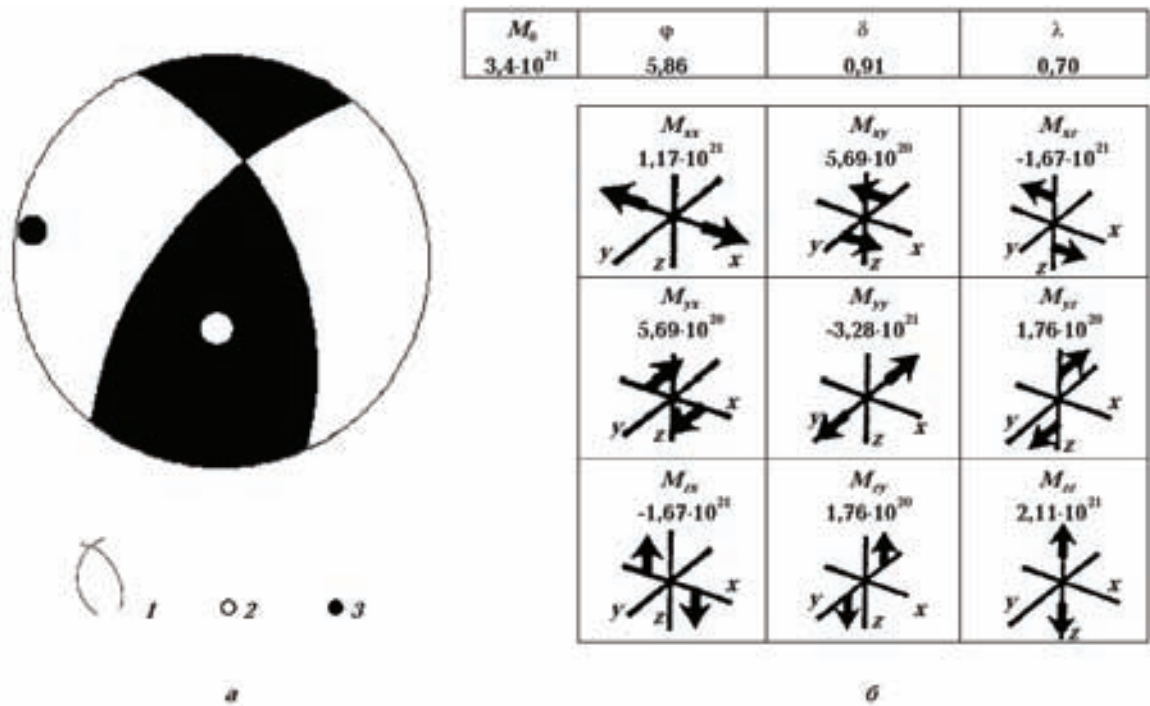


Рис. 9. Механизм очага Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. (а): 1 — нодальные линии; 2, 3 — оси главных напряжений  $T$  и  $P$  соответственно; зачерчены области волн сжатия; декартовы координаты и величины тензора сейсмического момента (б).

жений при этом было меридиональное ( $AZM = 181^\circ$ ). Тип подвижки в очаге — левосторонний взбросо-сдвиг. Одна из нодальных плоскостей с азимутом простираения  $336^\circ$  и с падением к восток-северо-востоку близка по ориентации к направлению распространения разрыва ( $330 \pm 15^\circ$ ), восстановленному по азимутальному годографу времен запаздывания максимальных колебаний в группе продольных волн (табл. 5) и пространственному положению Ледекинского разлома (Ледекинская разломная зона [Снтин, 2005]). Можно предположить, что по данной плоскости произошла главная подвижка, связанная с тектоническим нарушением близдиагонального юго-восточного — северо-западного направления.

Декартовы координаты тензора сейсмического момента найдены для разрыва вдоль главной плоскости подвижки, характеризуемого углами простираения  $\varphi$ , уклона  $\lambda$  и падения  $\delta$ , а также скалярным сейсмическим моментом  $M_0$ , по формулам из работы [Аки, Ричардс, 1983]. Углам  $\varphi$ ,  $\lambda$  и  $\delta$  в данном случае соответствуют параметры STK, RAKE и DP главной нодальной плоскости механизма очага исследуемого землетрясения. Далее по компонентам тензора сейсмического момента были вычислены собственные значения тензора  $M_{01}$ ,  $M_{02}$ ,  $M_{03}$  и найден коэффициент Лоде — Надаи ( $\mu$ ), характеризующий вид напряженного состояния в очаге землетрясения [Никитин, Юнга, 1977]. Получено значение  $\mu \approx 0$ ,

**Т а б л и ц а 6.** Параметры механизма очага Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г.

Нодальные плоскости						Оси главных напряжений					
NP1			NP2			P		N		T	
STK	DP	RAKE	STK	DP	RAKE	AZM	PL	AZM	PL	AZM	PL
219	60	114	336	52	40	279	5	12	38	181	45

что соответствует преобладанию в очаговой зоне сдвиговой компоненты напряжений.

**Динамические параметры очага землетрясения** восстановлены по записям волновых форм на близких и удаленных сейсмических станциях. К динамическим параметрам очага относятся:  $M_0$  — сейсмический момент,  $r_0$  — радиус круговой дислокации,  $\Delta\sigma$  — сброшенное напряжение,  $\eta\bar{\sigma}$  — кажущееся напряжение,  $\Delta\sigma_r$  — радиационное трение,  $\varepsilon$  — деформация сдвига,  $u$  — средняя подвижка по разрыву.

Для определения этих параметров используются количественные связи, установленные между теоретическими моделями источников и основными характеристиками амплитудных спектров объемных волн.

Нами использована модель Брюна [Brune, 1970], в рамках которой удовлетворительно описываются спектры записей землетрясений Крыма [Пустовитенко, Пантелеева, 1990]. Методика интерпретации спектров в рамках данной модели и расчета динамических параметров очага по низкочастотному уровню спектра  $\Omega_0$  и угловой частоте  $f_0$  описана в работах [Аптекман и др., 1985; 1989; Пустовитенко, Пантелеева, 1990]. Переход от станционного спек-

ра к очаговому осуществлялся с учетом методических рекомендаций [Аптекман и др., 1989].

Для восстановления динамических параметров использованы амплитудные спектры записей продольных  $P$  (составляющая  $Z$ ) и поперечных волн  $S$  (составляющие  $E-W$  и  $N-S$ ) на сейсмостанциях Крыма: "Судак" ( $SUD, P$  и  $S$ ), "Севастополь" ( $SEV, P$  и  $S$ ), "Алушта" ( $ALU, S$ ).

Ранее динамические параметры были определены только по одной аналоговой записи на сейсмостанции "Алушта" (Алш,  $S$ ) без учета реальной направленности излучения из очага и модели среды в зоне гипоцентра [Поречнова, Сыкчина, 2009]. В настоящей работе в связи с решением механизма очага стало возможным восстановить направленность излучения из очага  $R_{\theta\phi}$  [Stein, Wyssession, 2003] на станцию регистрации и уточнить динамические параметры, а также значение моментной магнитуды  $M_w$  [Kanamori, 1978] с учетом модели среды в районе гипоцентра (табл. 7).

Расчет амплитудных спектров с использованием цифровых записей выполнен методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для аналоговой станции "Алушта" спектры записей получены экспресс-методом, описанным в работах [Пустовитенко и др., 1984; Пусто-

**Т а б л и ц а 7 . Динамические параметры очага землетрясения 25 декабря 2007 г.**

Станция	Составляющая	$\Delta$ , км	$\Omega_0^*$ , с	$f_0$ , Гц	$R_{\theta\phi}$	$M_0 \cdot 10^{13}$ , Н·м	$r_0$ , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$ , Па	$\eta\bar{\sigma} \cdot 10^5$ , Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$ , Па	$u \cdot 10^{-2}$ , м	$M_w$
Алш	E-W	354	0,28	1,43	0,58	34,5	0,91	20,4	16,9	-6,7	6,8	0,45	3,67
ALU	E-W	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	E-W, N-S	362	0,4	1,33	0,46	46,2	1,01	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-S	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 арифметическое		—	—	—	—	35,2	1,0	16	18,7	-10,6	5,34	0,38	3,65
S — погрешность		—	—	—	—	6,2	0,04	3,5	5,3	6,8	1,22	0,07	0,05
X* — среднее геометрическое		—	—	—	—	33,8	1,0	15,04	17,7	-8,05	5,02	0,36	—
S* — дисперсия		—	—	—	—	0,06	0,01	0,07	0,06	—	0,08	0,07	—

Примечание: Алш — аналоговая запись.

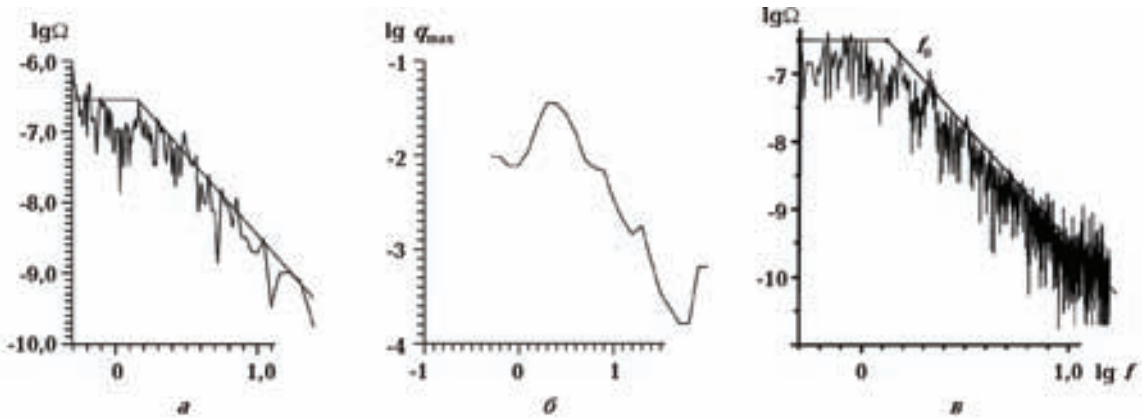


Рис. 10. Амплитудные (а, в) и энергетические (б) спектры поперечных S-волн (составляющая E-W) по данным аналоговой (а, б) и цифровой (в) записям на сейсмостанции "Алушта".

вitenко, Пантелеева, 1990]. Примеры спектров и их интерпретация в рамках модели Брюна приведены на рис. 10, 11.

Усреднение значений динамических параметров выполнено двумя способами: нахождением среднего арифметического  $X$  с погрешностью  $S$  и среднего геометрического  $X^*$  с дисперсией  $S^*$  (исходя из логнормального за-

кона распределения величин), как принято в работе [Пустовитенко, Пантелеева, 1990].

Как видно из табл. 7, получено хорошее согласие в значениях динамических параметров, восстановленных по записям различных типов волн и станций регистрации. Средняя дисперсия для всех определяемых величин не превысила значение 0,08. Наилучшая схо-

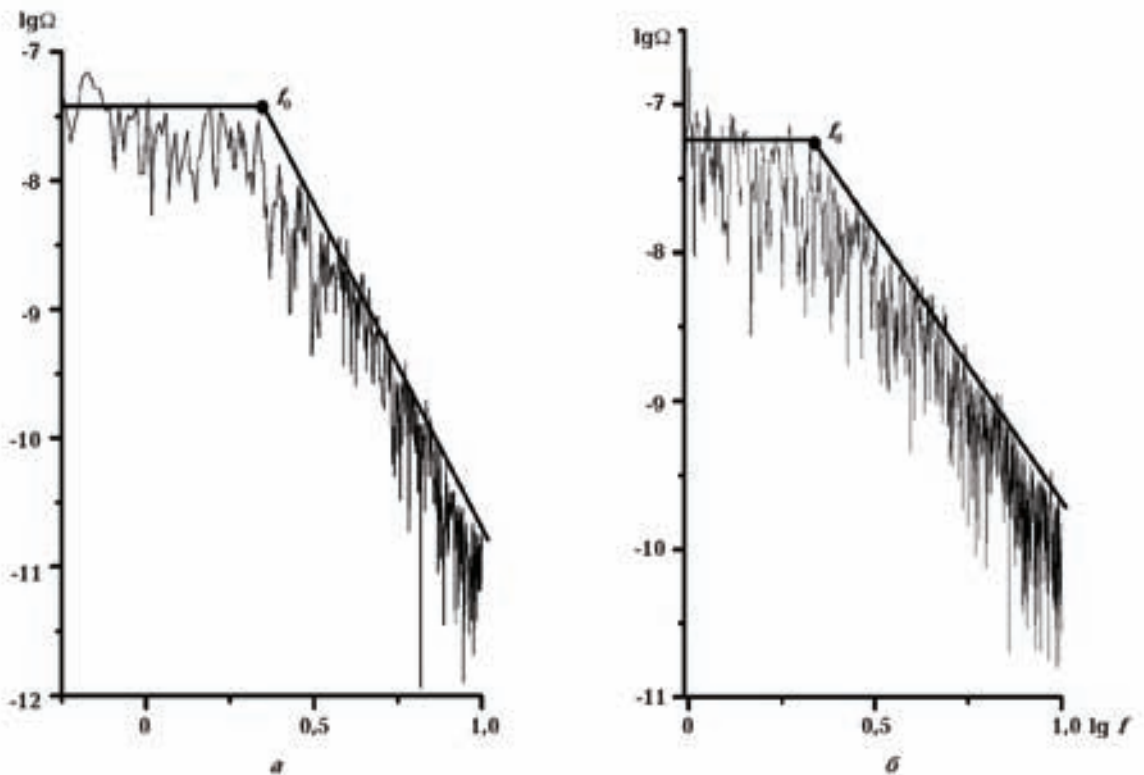


Рис. 11. Амплитудные спектры продольных P-волн по цифровым записям на станциях: а — "Судак" (SUD) и б — "Севастополь" (SEV).

димось результатов отмечена для радиусов круговой дислокации:  $r_0 = 1$  км ( $1 \pm 0,04$ ).

Наименьший сейсмический момент  $M_0 = 17,3 \cdot 10^{20}$  дин · см ( $17,3 \cdot 10^{13}$  Н · м) получен по продольной волне (Z) на записи станции "Судак", а наибольший — по полному вектору S-волны (E-W, N-S), на этой же станции. Среднее значение  $M_0$  по шести определениям составило  $(35,2 \pm 6,2) \cdot 10^{13}$  Н · м или  $33,8 \cdot 10^{13}$  Н · м с дисперсией  $S = 0,06$ . Такой незначительный разброс в параметрах  $M_0$  практически мало сказался на оценке моментной магнитуды  $M_w = 3,7 \pm 0,05$ . При землетрясении сброшенное и кажущиеся напряжения составили соответственно  $\Delta\sigma = 16 \cdot 10^5$  Па и  $\eta\bar{\sigma} = 19 \cdot 10^5$  Па, средняя подвижка по разрыву  $u = 0,4$  см, деформация сдвига  $\epsilon = 5,3 \cdot 10^{-6}$ . Полученное отрицательное значение радиационного трения  $\Delta\sigma_r = -10,6 \cdot 10^5$  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 [Костров, 1975]. В целом восстановленные количественные значения очаговых параметров Криворожского землетрясения соответствуют таковым для других землетрясений (например, региона Крыма) эквивалентного энергетического уровня [Пустовитенко, Пантелеева, 1990].

**Сейсмо тектонические условия района землетрясения.** Землетрясение возникло в верхней части земной коры Приднепровского [Трипольский, Шаров, 2004] или Среднеприднепровского [Старостенко и др., 2002] крупного блока Украинского щита и приурочено к сложной зоне пересечения Криворожско-Кременчугского глубинного разлома субмеридионального направления и пересекающего его в диагональном направлении (юго-восток — северо-запад) Ледекинского (рис. 12, а) [Єнтін, 2005]. В этом районе, отнесенном к Криворожско-Кременчугской раннепротерозойской геосинклинальной системе [Строение ..., 1978], отмечено резкое увеличение мощности земной коры до 70 км и знакопеременный характер тектонических движений [Палієнко та ін., 2004]. Гипоцентр данного землетрясения был расположен в верхнем слое земной коры, осложненной системой протяженных отражающих горизонтов в кристаллической толще (рис. 12, б). Землетрясение произошло в обстановке близгоризонтального сжатия субширотной ориентации. При этом простирание нодальной плоскости NP1

близко к ориентации субмеридионального Криворожско-Кременчугского глубинного разлома, а NP2 — к ориентации диагонального Ледекинского.

Интерпретация механизма очага и азимутального годографа времен запаздывания максимальных колебаний в группе продольных волн и 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 снизу вверх до глубины  $h = 6$  км (макросейсмический гипоцентр), вызвав в этой части очаговой зоны максимальный макросейсмический эффект. Азимут с инструментального эпицентра на макросейсмический равен  $301^\circ$ , точное расстояние между ними  $0,8^\circ$  (или 8,7 км). Такое соответствие между восстановленными очаговыми параметрами разрыва и данными местоположения эпицентров и глубин очагов инструментального и макросейсмического возможно не случайно, а отражает реальный процесс накопления и снятия напряжений в очаговой зоне данного землетрясения.

**Проблемы изучения сейсмичности платформенной территории.** Формально территория Криворожского землетрясения не входит в границы сейсмоактивных регионов Украины: Крымско-Черноморского и Карпатского со своей сетью станций, сводной обработкой и службой срочных донесений. В связи с этими редко происходящие сейсмические события на платформенной территории остаются "бесхозными", информация о сейсмических колебаниях, записанных на отдельных станциях, остается в журналах обработки, комплексно не интерпретируется и не публикуется в официальных изданиях "Сейсмологический бюллетень Украины" и "Землетрясения Северной Евразии". В результате часть сейсмических событий либо априори относится к "промышленным взрывам на юге Украины" либо к сомнительным землетрясениям с большими ошибками в определении координат гипоцентров по данным в основном удаленных сейсмостанций.

В табл. 8 приведена выборка из каталогов ISC за последние 15 лет в пределах координат: по широте  $47,5$ — $49^\circ$  и долготы  $32,5$ — $34,0^\circ$  (в радиусе менее 100 км от эпицентра Криворожского землетрясения). Видно, что все сейсмические события по данным ISC обработаны по удаленным станциям (на расстояниях бо-

**Т а б л и ц а 8. Каталог сейсмических событий в районе г. Кривой Рог по данным ISC и обработки в Крыму (настоящая статья)**

Дата			Время в очаге, $t_0$				Координаты			Эллипс ошибок		Магнитуды		Количество станций (фаз)	Расстояние min — max (град)	Источники данных (интерпретация)
Год	Месяц	День	ч	мин	с	$\Delta t$	$\varphi$ °N	$\lambda$ °E	$h$ , км	$Az^\circ$	$I_{\max} - I_{\min}$ , км ( $\delta\varphi - \delta\lambda$ )	$m_b$ ( $K_p$ )	$M_L$ ( $M_D$ )			
1996	04	05	08	59	42	—	48,39	32,55	0	—	—	3,0	3,4	4(5)	13,6—21,5	ISC
1996	04	05	08	59	25,9	0,9	48,30	32,60	0	—	(0,1—0,3)	(9,7)	(3,0)	9(13)	2,82—21,6	Крым, (взрыв)
1996	05	24	08	59	38	1,94	47,78	33,02	33	90	53—17	3,3	4,0	5(5)	3,84—67,1	ISC
1996	05	24	08	59	40,9	1	47,90	33,0	0	—	(0,1—0,4)	8,8	3,0	6(9)	2,93—13,6	Крым, (взрыв?)
2000	12	09	12	20	19	0,62	48,29	33,5	10	90	9—7	3,9	3,7	17(17)	3,3—66,7	ISC
2000	12	09	12	20	25,0 <sup>1</sup>	0,9	47,70	33,20	0	345	(0,2—0,2)	(10,8)	3,6	19(29)	1,86—14	Крым <sup>1</sup> Крым <sup>2</sup> Крым <sup>3</sup> (землетрясение?)
			12	20	19 <sup>2</sup>	(48,15)	(33,47)	0	12(24)		2,9—14,9					
			12	20	17,7 <sup>3</sup>	48,44	33,54	8	19(28)		3,2—22					
2001	05	21	01	53	51	3,83	48,08	33,63	0	43	111—20	3,7	3,4	7(7)	7,5—66,9	ISC
2001	05	21	01	53	52,7	1,0	47,86	33,35	0	210	(0,1—0,3)	(9,6)	(3,1)	15(23)	2,54—17	Крым <sup>1</sup> Крым <sup>2</sup> Крым <sup>3</sup> (землетрясение)
					52	4,3	47,91	33,80	0		10(20)			3,12—7,4		
					57,6	4,3	47,93	33,82	24		10(16)			3,0—14,0		
2002	02	12	12	12	56	2,23	48,01	33,52	0	87	81—25	3,7	3,8	7(7)	14,1—66,95	ISC
2002	02	12	12	12	42,5	1	48,80	33,90	0	—	(0,1—0,5)	(10,5)	(3,2)	10(13)	2,95—13,5	Крым <sup>1</sup> (взрыв)
2006	01	27	11	00	28	5,09	48,8	33,26	0	6	65—33	3,3	3,0	3(4)	3,2—21,1	ISC
2006	01	27	11	00	34,3	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	Крым, (взрыв)
2008	02	11	03	30	32,1	—	47,82	33,44	0	—	—	—	—	12(24)	8,2—10,5	ISC (BEO)
2008	02	11	03	30	56,12	0,79	51,63	6,84	10	151	11,7—6,2	—	2,5(3)	25	0,33—8,3	NEIS, (землетрясение в Германии)
2008	02	11	03	31	30,1	0,62	45,62	26,6	117	—	4,3—4,8	3,8	(4,8)	22(33)	0,23—5	BUC, (землетрясение в зоне Вранча)
2008	05	23	08	00	56,3	0,96	47,73	33,14	0	25	18—13	3,5	3,4	8(10)	3,9—67,1	ISC
2008	05	23	08	00	59,6	—	47,60	33,50	0	—	(0,5—0,5)	1,8 (8,8)	(3,1)	3(4)	2,9—3,1	Крым, (взрыв)

Примечание. В источнике данных разные способы обработки в Крыму отмечены: 1 — ручная (засечки), 2 — WSG, 3 — GIPO-08.



лее 300 км) с ошибками в географических координатах, достигающими  $1^\circ$ , и неопределенностью в глубине очага. Обращает на себя внимание упорядоченность времени возникновения событий: преобладает дневное время между 8—12 ч (по Гринвичу) или 11—14 ч по местному времени — время, когда по устному сообщению сотрудников МЧС г. Криво-

го Рога производятся промышленные взрывы большой мощности (несколько сотен тонн). Вместе с тем тектонические землетрясения также происходят и могут происходить в любое время суток, в том числе и в дневное. Одно ночное событие 21 мая 2001 г. (01 ч 53 мин) имеет наибольшие размеры эллипса ошибок ( $110 \times 20$  км) в определении коорди-

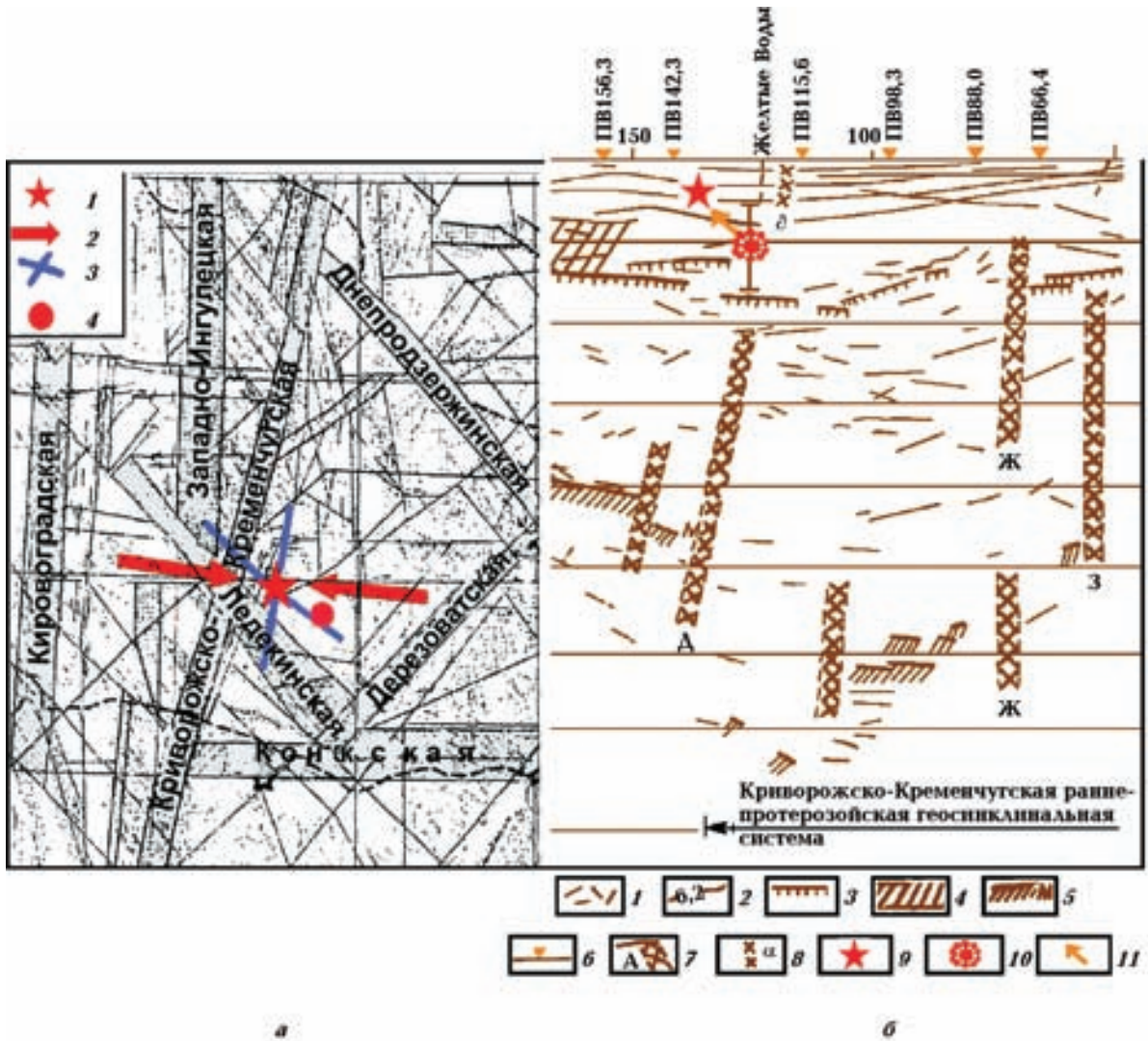


Рис. 12. Сейсотектоническая позиция очага Криворожского землетрясения: *a* — фрагмент тектонической карты Украины по работе [Єнтін, 2005] (1 — эпицентр Криворожского землетрясения 25.12.2007 г., 2 — направления осей сжатия, 3 — пространственное положение нодальных плоскостей, 4 — эпицентр землетрясения 2001 г.); *б* — фрагмент сейсмогеологического разреза по профилю VIII Таганрог — Днепропетровск — Могилев-Подольский, Голованевск — Винница по работе [Строение ..., 1978] (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 (∂ — Криворожско-Кременчугский), 9, 10 — макросейсмический и инструментальный гипоцентры соответственно, 11 — направление вспарывания разрыва.

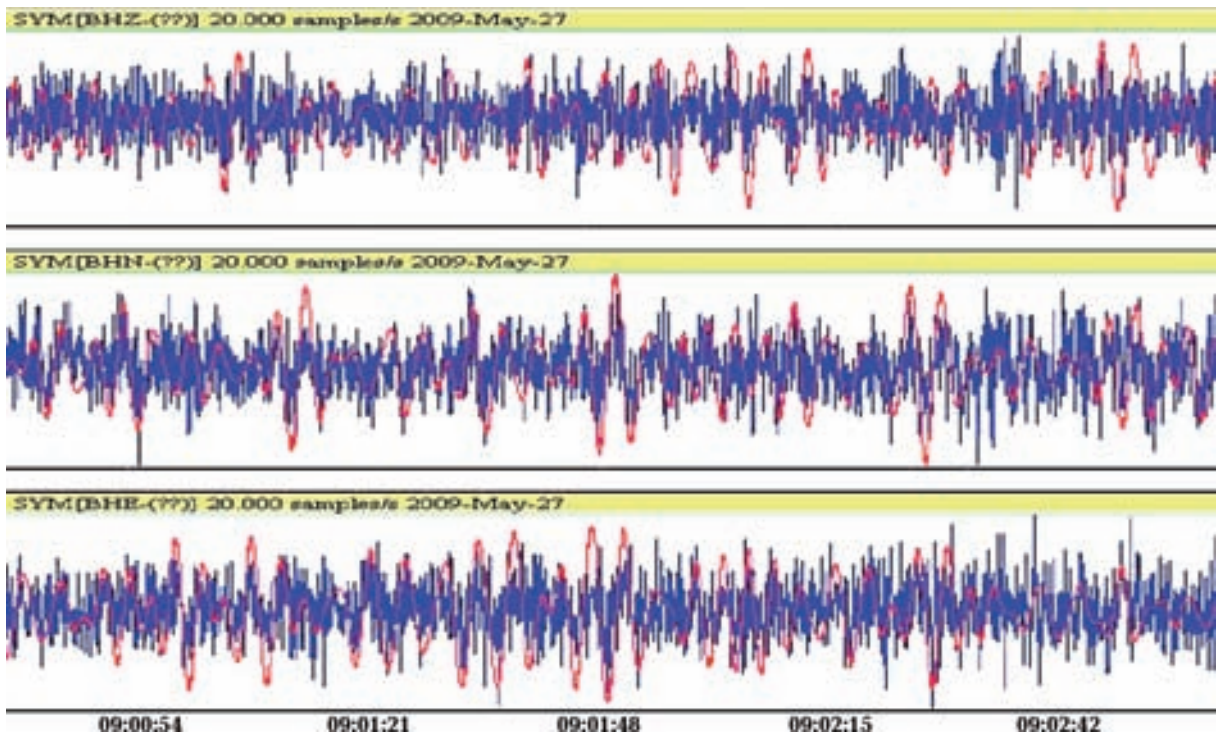


Рис. 13. Пример записи взрыва 27 мая 2009 г. в районе г. Кривой Рог (синяя линия). Запись получена на цифровой станции "Симферополь". Красная линия — запись отфильтрованная полосовым фильтром Баттерворта 3-го порядка в интервале частот 0,2—0,4 Гц.

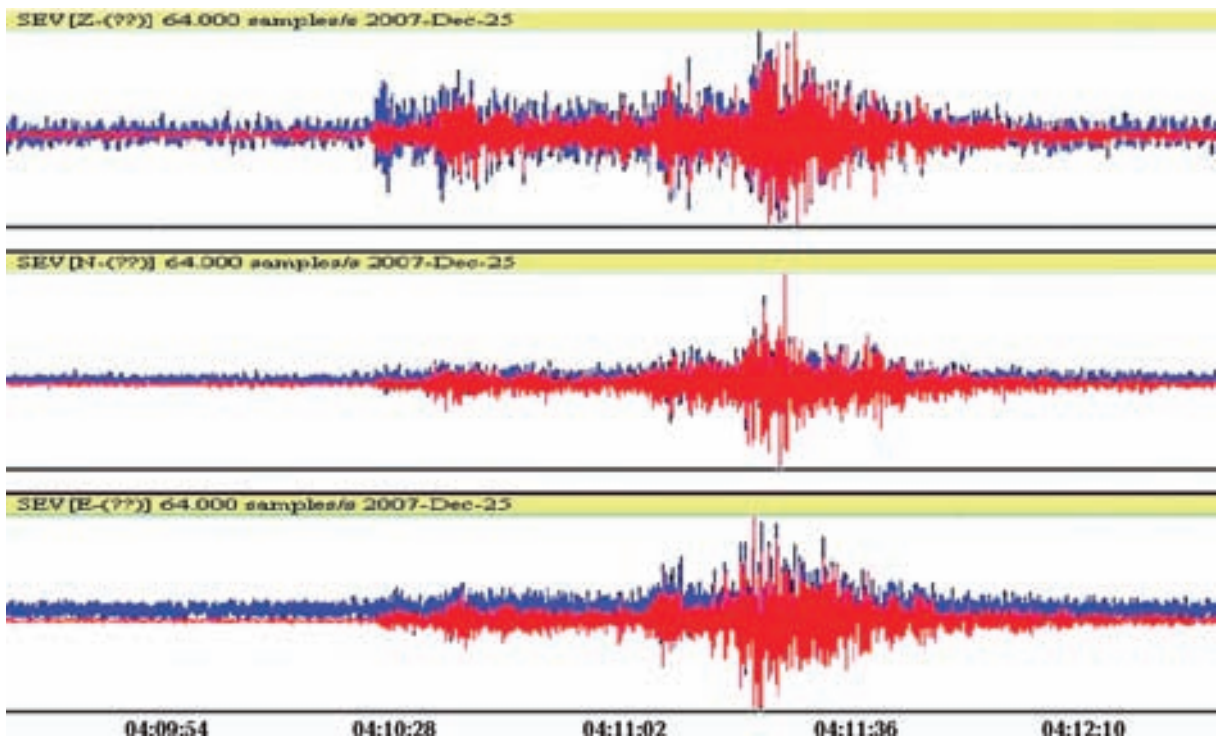


Рис. 14. Пример записи землетрясения 25 декабря 2007 г. на станции "Севастополь" (синяя линия). Красная кривая — запись, отфильтрованная полосовым фильтром Баттерворта 3-го порядка в интервале частот 0,7—5 Гц.

нат гипоцентра и его местоположение вообще неопределенное — оно могло произойти совершенно в другом регионе и в другой тектонической структуре.

В связи с этим взятая информация из международных источников без уточнения координат очага может быть проинтерпретирована как повышенная местная сейсмическая активность. В самом деле, если формально следовать табл. 8, то за последние 12 лет только в районе Криворожского землетрясения произошло девять землетрясений в диапазоне магнитуд  $m_b = 3,0 \div 3,9$  из них шесть аналогичных событию 25.12.2007 г. Таким образом, ощутимые землетрясения в данном районе могли происходить с периодичностью 1 раз в 2—3 года, что не всегда отмечается даже в сейсмоактивном Крымско-Черноморском регионе. Так ли это? Если все отмеченные сейсмические события относятся к землетрясениям, то мы имеем дело с наличием в данном месте крупной сейсмогенерирующей структуры, а если большая часть из них — это промышленные взрывы, то каталоги землетрясений Украины явно "засорены" искусственными событиями и мы имеем дело с ложным представлением о повышенной сейсмической активности, а следовательно, и степени сейсмической опасности.

Для уточнения параметров сейсмических событий, указанных в табл. 8, и уточнения их генезиса проведен дополнительный сбор, переинтерпретация записей и сводная обработка с привлечением ближайших станций (Крым, Карпаты, Молдова, Россия). Результаты приведены в табл. 8 с указанием в графе источник данных — "Крым".

Сведения об ощущаемости имеются только для сейсмического события 9 декабря 2000 г. По данным МЧС Днепропетровской области Украины (на основе единичных звонков жителей г. Кривой Рога и г. Днепропетровска) "... днем 9 декабря примерно в 15 ч 30 мин были отмечены ощутимые толчки на верхних этажах зданий". Интенсивность сотрясений, по-видимому, не превысила  $I = 3 \div 4$  балла. Специальное обследование и опрос населения не проводились. В сводных рукописных бюллетенях Крыма сейсмические события 05.04.1996 г., 24.05.1996 г., 12.02.2002 г. и 27.01.2006 г. отмечены как промышленные взрывы на юге Украины и потому не опубликованы. В сейсмологическую базу данных события 09.12.2000 г. и 12.02.2002 г. были помещены по ISC с пометкой "землетрясение?".

На сейсмограммах Крымской сети станций взрывы имеют характерную запись в виде вторяющихся растянутых цугов колебаний с усилением в группе поверхностных волн. Пример записи такого взрыва (масса ВВ 540 тонн по данным МЧС) 27 мая 2009 г. дан на рис. 13. Для сравнения на рис. 14 приведена запись Криворожского землетрясения 2007 г., полученная на цифровой станции "Севастополь".

В данном примере землетрясение и взрыв различаются по наличию на записи четко выделяемых фаз волн  $P$  и  $S$ . При этом следует отметить, что во многих других случаях идентификация сейсмических событий оказывается невозможной из-за подобия динамических характеристик колебаний, возбуждаемых землетрясениями и взрывами.

Из рассмотренных и заново обработанных восьми сейсмических событий (см. табл. 8) четыре (5 апреля 1996 г., 12 декабря 2002 г., 27 января 2006 г. и 23 мая 2008 г.) нами отнесены к установленным промышленным взрывам; одно (24 мая 1996 г.) — к возможным взрывам ("взрыв?"), одно (9 декабря 2000 г.) — к возможным землетрясениям ("землетрясение?") и только 21 мая 2001 г. — к землетрясениям. Его эпицентр по уточненным данным расположен на расстоянии 19 км юго-восточнее местоположения Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. (см. рис. 12, а). Наиболее сложной оказалась ситуация с сейсмическим событием 11 февраля 2008 г. Судя по времени в очаге мы имеем дело с возможной накладкой нескольких событий, одно из которых произошло в Германии с  $M_D = 3$ , а другое — в Румынии с  $M_D = 4,8$  (зона Вранча) с разницей во времени около 34 с. В ISC по данным агентства ВЕО с привлечением только далеких станций даются ошибочно параметры землетрясения района юга Украины. Следует отметить, что времена вступления сейсмических волн для станций, использованных для обработки в ВЕО, также участвовали для определения гипоцентров землетрясений в агентстве ВUC и NEIS. Волновая картина на сейсмограммах сейсмостанций Крыма типичная для землетрясений зоны Вранча и следов других сейсмических событий юга Украины в это время не отмечено.

Таким образом, из всех переинтерпретированных событий пока только одно (21 мая 2001 г.) можно уверенно отнести к естественному тектоническому землетрясению. По двум другим (24 мая 1996 г. и 9 декабря 2000 г.) вопрос об их идентификации остается откры-

тым. Задача распознавания и разделения естественных и искусственных источников достаточно сложная, требующая специального мониторинга в горнопромышленных районах и доступа к первичной оперативной информации о производимых взрывных работах. Ее решение возможно только на основе создания на территории платформенной части Украины региональной сети высокочувствительных сейсмических станций.

**Заключение.** Впервые для территории Украинского щита детально изучены инструментальные и макросейсмические данные об ощущаемом землетрясении 25 декабря 2007 г. в районе г. Кривой Рог и наиболее полно восстановлены кинематические и динамические параметры его очага и очаговой зоны. Для характеристики (на качественном уровне) сейсмической активности данного района переинтерпретированы имеющиеся данные о сейсмических событиях за последние 20 лет в радиусе до 100 км относительно эпицентра Криворожского землетрясения. Проведенное исследование позволило получить следующие новые результаты и выводы:

1. На основе изучения инструментальных записей волновых форм и макросейсмического поля Криворожского землетрясения уточнены параметры его гипоцентра и магнитудный уровень. За окончательную версию основных параметров землетрясения для включения его в каталог Украины предложено принять следующие данные:  $t_0 = 04 \text{ ч } 09 \text{ мин } 34,8 \text{ с}$ ;  $\varphi = 47,99^\circ \pm 0,05^\circ$ ;  $\lambda = 33,54^\circ \pm 0,05^\circ$ ;  $h = (10 \pm 5) \text{ км}$ ;  $K_p = 9,7$ ;  $m_b = 3,9$ ;  $M_{LH} = 3,1$ ;  $M_W = 3,7$ ,  $I_0 = 5$  баллов.

2. Очаг землетрясения 25 декабря 2007 г. приурочен к верхним слоям земной коры ( $h = 10 \text{ км}$ ) сложной зоны сочленения разновозрастных и разнонаправленных разрывных нарушений: Криворожско-Кременчугского и Ледекинского.

3. Землетрясение возникло в результате длительного действия близгоризонтальных сил сжатия, ориентированных близширотно. Деформирование среды в очаговой зоне происходило в основном вдоль оси сжатия.

4. Тип подвижки в очаге — левосторонний взбросо-сдвиг по наиболее вероятной крутопадающей плоскости разрыва, ориентированной вдоль Ледекинского разлома диагональной ориентации.

5. Процесс вспарывания разрыва в очаге протекал снизу вверх от гипоцентра с глубины 10 км до 6 км (макросейсмический гипоцентр), вызвав в этой части эпицентральной

зоны наибольший макросейсмический эффект с интенсивностью  $I = 5$  баллов.

6. Разрывообразование развивалось с юго-востока на юго-запад вдоль Ледекинского разлома со скоростью 3 км/с. Общая протяженность зоны разгрузки составила около 8 км.

7. Во время землетрясения были сброшены напряжения величиной  $16 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Скольжение по разрыву было осложнено неравномерным распределением прочностных свойств среды, на что указывает отрицательное значение радиационного трения  $\Delta\sigma_r = -10,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

8. Для смещения берегов разрыва на величину  $u = 0,4 \text{ см}$  была совершена работа, эквивалентная сейсмическому моменту  $M_0 = 34 \times 10^{13} \text{ Н} \cdot \text{м}$ . При этом радиус круговой дислокации составил 1 км. Общий вклад в сеймотектоническую деформацию среды за счет землетрясения составил  $\epsilon = 5,3 \cdot 10^{-6}$ .

9. Сброс накопленных напряжений был одноактным. Следов предваряющих толчков (форшоков) и последующих афтершоков на сейсмограммах не установлено. Одноактные землетрясения, как правило, возникают в однородном поле напряжений, в среде с достаточно высокими прочностными свойствами [Mogi, 1963].

10. Из восьми дополнительно изученных сейсмических событий района Криворожского землетрясения только одно 21 мая 2001 г. уверенно интерпретировано как тектоническое землетрясение. Его очаг также возможно связан с диагональной Ледекинской разломной зоной.

11. Учитывая практическую значимость уточнения сейсмической опасности густонаселенной, промышленной и горнодобывающей территории, уникальность (редкость) ощутимых землетрясений на Восточно-Европейской платформе, в частности в пределах Украинского щита, исследования по переинтерпретации всех инструментально зарегистрированных сейсмических событий, выявлению диагностических параметров (дискриминантов) и идентификации происхождения сейсмических колебаний (разделение на естественные и искусственные источники) должны быть продолжены, став специальной научной темой исследования для корректного сеймотектонического обоснования возможного генезиса сейсмичности данного района.

12. Ощутимое землетрясение 25.12.2007 г. вновь напомнило о давно стоящей проблеме инструментального изучения сейсмичности на

платформенной территории Украины сетью региональных сейсмических станций. Эффективность и оптимальность сейсмического мониторинга этой территории на уровне магнитуд  $M_{LH} = 2$  ( $K = 8$ ) была впервые предложена в 1993 г. [Пустовитенко и др., 1993] и далее с учетом современных условий уточнялась [Пустовитенко, Кульчицкий, 2009; Кульчицкий, Пустовитенко, 2008]. В соответствии с законом повторяемости землетрясений Восточно-Европейской платформы [Ананьин, 1990] только за последние 20 лет на исследуемой территории помимо двух установленных тектонических землетрясений с  $M_{LH} = 3$  могло произойти еще восемь более слабых с  $M_{LH} = 2$  и примерно около 40 с  $M_{LH} = 1$ , которые суще-

ствующая в Украине система наблюдений не способна регистрировать. Для слабоактивного региона это невосполнимые потери первичной сейсмологической информации. В связи с этим особо актуальной по-прежнему остается задача создания эффективного высокочувствительного сейсмического мониторинга на платформенной части территории Украины с локальными кустами сейсмостанций в районах активного освоения земных недр для снижения порога представительности землетрясений.

*Авторы благодарны Н. М. Козиненко за помощь в подборе и обработке экспериментального материала по сейсмическим событиям района г. Кривой Рог.*

### Список литературы

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1. — Москва: Мир, 1983. — 520 с.
- Ананьин И. В. Сейсмичность и закономерности проявления землетрясений на Восточно-Европейской платформе и в прилегающих областях: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Москва, 1990. — 66 с.
- 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.
- Аптекман Ж. Я., Дараган С. К., Долгополов В. В., Захарова А. И., Зобин В. М., Коган С. Я., Корчагина О. А., Москвина А. Г., Поликарпова Л. А., Чепкунас Л. С. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. — 1985. — № 2. — С. 60—70.
- Балакина Л. А., Введенская А. В., Голубева Н. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. — Москва: Наука, 1972. — 198 с.
- Введенская А. В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокации. — Москва: Наука, 1969. — 260 с.
- Габсатарова И. П., Бабкова Е. А. Параметры Бердянского землетрясения 31 июля 2006 г. с  $M_s = 3,3$  (Украина, Запорожская обл.) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 г. — Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2008. — С. 18—26.
- Горбунова И. В. Определение протяженности очага и направления разрыва по волновой картине на сейсмограмме // Докл. АН СССР. — 1981. — 261, № 4. — С. 836—839.
- Горбунова И. В., Бойчук А. Н., Доцев Н. И., Кальметьева З. А., Капитанова С. А., Кучай О. А., Михайлова Н. Н., Пустовитенко Б. Г., Симбирева И. Г., Товмасын А. К. Интерпретация очаговых волн на записях землетрясений. — Москва: Наука, 1992. — 130 с.
- Горбунова И. В., Пустовитенко Б. Г. Новая методология изучения сложного сейсмического разрывообразования // Геофиз. журн. — 1997. — 19, № 3. — С. 42—47.
- Гусев А. А. Определение гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. — 1979. — № 1. — С. 82—96.
- Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. — Санкт-Петербург: Питер, 2002. — 608 с.

- Ершов И. А., Шебалин Н. В. Проблема конст-  
рукции шкалы интенсивности землетрясений  
с позиций сейсмологов // Прогноз сейсми-  
ческих воздействий. Вопросы инженерной  
сейсмологии. — Москва: Наука, 1984. — Вып.  
25. — С. 78—96.
- Єнтін В. А. Геофізична основа тектонічної кар-  
ти України масштабу 1 : 100 000 // Геофиз.  
журн. — 2005. — 27, № 1. — С. 74—84.
- Козиненко Н. М. Подробные данные о земле-  
трясении 25 декабря 2007 г. в районе Криво-  
го Рога (Днепропетровская область) // Сейс-  
мологический бюллетень Украины за 2007 год.  
— Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика",  
2009. — С. 63—65.
- Костров Б. В. Механика очага тектонического  
землетрясения. — Москва: Наука, 1975. — 179 с.
- Кульчицкий В. Е., Сафонова Г. П., Свидлова В. А.  
Годографы сейсмических волн Крымско-Чер-  
номорских землетрясений // Сейсмологичес-  
кий бюллетень Западной территориальной зо-  
ны ЕССН СССР (Крым — Карпаты) за 1983 г.  
— Киев: Наук. думка, 1986. — С. 94—103.
- Кульчицкий В. Е., Пустовитенко Б. Г. Пробле-  
мы повышения эффективности сейсмическо-  
го мониторинга юга Украины // Геофізичні тех-  
нології прогнозування та моніторингу геоло-  
гічного середовища: Матер. наук. конф. (Львів,  
6—10 жовт. 2008 р.). — Львів, 2008. — С. 47—  
48.
- Кутас В. В., Омельченко В. Д., Дрогицкая Г. М.,  
Калитова И. А. Криворожское землетрясение  
25 декабря 2007 г. // Геофиз. журн. — 2009.  
— 31, № 1. — С. 42—52.
- Никитин Л. В., Юнга С. А. Методы теоретичес-  
кого определения тектонических деформаций  
и напряжений в сейсмоактивных областях //  
Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1977. — № 11.  
— С. 54—67.
- Новый каталог сильных землетрясений на тер-  
ритории СССР (с древнейших времен до 1975 г.)  
/ Отв. ред. Н. В. Кондорская, Н. В. Шебалин.  
— Москва: Наука, 1977. — 535 с.
- Палієнко В. П., Спиця Р. О., Кендзера О. В., Омель-  
ченко В. Д., Бондар А. Л., Заяць І. М. Сучасні  
рухи земної кори на території України: проб-  
леми тектонічної інтерпретації та картогра-  
фування // Геоінформатика. — 2004. — № 1.  
— С. 66—73.
- Поречнова Е. И., Сыкчина З. Н. Спектры и дина-  
мические параметры очагов землетрясений  
Крыма за 2007 год // Сейсмологический бюл-  
летень Украины за 2007 год. — Севастополь:  
НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2009. — С. 11—  
13.
- Пустовитенко А. Н., Пустовитенко Б. Г., Спир-  
тус В. Б. Расчет амплитудных и энергетичес-  
ких спектров местных землетрясений экс-  
пресс-методом // Методы определения сейс-  
мической опасности. — Кишинев: Штиинца,  
1984. — С. 120—128.
- Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Капи-  
танова С. А. Процессы в очаговой зоне Кри-  
ворожского землетрясения 25 декабря 2007 г.  
// Сейсмологический бюллетень Украины за  
2007 год. — Севастополь: НПЦ "Экоси-Гид-  
рофизика", 2009. — С. 17—22.
- Пустовитенко Б. Г. Сейсмические процессы в  
Черноморском регионе и сейсмическая опас-  
ность Крыма: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат.  
наук. — Киев, 2003. — 36 с.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Пусто-  
витенко А. А. Новые карты общего сейсми-  
ческого районирования территории Украины.  
Особенности модели долговременной сейс-  
мической опасности // Геофиз. журн. — 2006.  
— 28, № 3. — С. 54—75.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Пусто-  
витенко А. А. Состояние и перспективы раз-  
вития сети сейсмических станций западной  
зоны ЕССН СССР // Сейсмологические и гео-  
термические исследования на западе СССР.  
— Минск: Навука і техника, 1993. — С. 22—  
34.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е. Пробле-  
мы эффективности сейсмического монито-  
ринга в горнопромышленных районах Укра-  
ины // Геоінформаційний моніторинг навко-  
лишнього середовища, GPS- і GIS-технології:  
XIV Міжнар. наук.-техн. симпозіум, Алушта,  
8—13 вересня 2009 р. — Львів: Львівська по-  
літехніка, 2009. — С. 77—79.
- Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектраль-  
ные и очаговые параметры землетрясений  
Крыма. — Киев: Наук. думка, 1990. — 251 с.
- Раутиан Т. Г. Затухание сейсмических волн и  
энергия землетрясений // Методы детально-  
го изучения сейсмичности: Тр. ИФЗ. — Мос-  
ква: Изд-во АН СССР, 1960. — С. 75—114.
- Скляр А. М., Князева В. С., Останин А. М. Мак-  
росейсмический эффект Криворожского зем-  
летрясения 25 декабря 2007 г. // Сейсмоло-  
гический бюллетень Украины за 2007 год.

- Севастополь: НПЦ "Экоси-Гидрофизика", 2009. — С. 14—16.
- Солонина А.И., Улахович Д.А., Арбузов С.М., Соловьева Е.Б.* Основы цифровой обработки сигналов. — Санкт-Петербург: ВНУ-Петербург, 2005. — 768 с.
- Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Кутас Р.И.* Глубинное строение Украинского щита // Геофиз. журн. — 2002. — **24**, № 6. — С. 36—48.
- Строение земной коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы* / Под ред. В.Б. Соллогуба, А. Гутерха, Д. Просена. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 136—147.
- Трипольский А.А., Шаров Н.В.* Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. — Петрозаводск: Изд. КНЦ РАН, 2004. — 159 с.
- Уломов В.И.* Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вестн. ОГГН РАН. — 1999. — № 1. — С. 1—32.
- Шебалин Н.В.* Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы оп-  
ределения сейсмической интенсивности. — Москва: Наука, 1975. — С. 87—109.
- Brune I.V.* Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. — 1970. — **75**, № 26. — P. 4997—5009.
- Bulletin of the International Seismological Center (ISC) Newbury — Berkshire, 1996—2008.*
- Kanamori H.* Quantification of great earthquakes // Tectonophysics. — 1978. — **49**, № 3/4. — P. 207—210.
- Kennet B.L.N.* Seismological Tables: ak135 // Research School of earth Sciences Australian national University. — Australia; Canberra: ACT 0200, 2005. — С. 80.
- Mogi K.* Some discussions on aftershock, foreshock and earthquake swarm — the fracture of a some-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena // Bull. Earth. Res. Inst. Univ. Tokyo. — 1963. — **41**, pt. 3. — P. 615—640.
- Stein S., Wysession M.* An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure. — Oxford: Blackwell Publishing, 2003. — 498 p.