

КРИВОРОЖСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 25 ДЕКАБРЯ 2007 г. ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

И. П. Габсатарова*, А. В. Кендзера**, Л. И. Надежка*, Ю. В. Лесовой**, С. П. Пивоваров*

*Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия

**Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила в редакцию 15 сентября 2011 г.

Аннотация. В работе представлены результаты инструментальной обработки землетрясения 25.12.2007 г., произошедшего в районе Кривого Рога. Рассмотрены регистрационные возможности сети сейсмических станций, расположенных на Восточно-Европейской платформе. Построен механизм очага.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмичность, магнитуда.

Abstract. The results of the earthquake instrumentation 25.12.2007 occurred in the area of Krivoy Rog. Considered the possibility of registration network of seismic stations located on Vostochno-European platform. Built focal mechanism.

Key words: earthquake, seismicity, magnitude

Введение

За последние двадцать лет на территории Юго-Западного сегмента Восточно-Европейской платформы, включающего Украинский щит (УЩ), Воронежский кристаллический массив (ВКМ) и Днепровско-Донецкую впадину (ДДВ), произошло шесть ощутимых землетрясений с магнитудой больше 3. Это землетрясения 24.05.1996 г. $M = 3,3$; 09.12.2000 г. $M = 3,9$; 21.05.2001 г. $M = 3,7$; 25.12.2007 г. $M = 3,7$ в Криворожско-Кременчугской зоне разломов, 31.03.2000 г. $M = 3,2$ в Хоперском мегаблоке ВКМ; 31.07.2006 г. $M = 3,3$ в Запорожской области УЩ. Эти землетрясения зарегистрированы большим числом станций, расположенных на разных эпицентральных расстояниях.

В настоящей статье представлен анализ записей волновых форм Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. Оно произошло практически в центре платформенной части Украины, в районе с высоким уровнем урбанизации, имело магнитуду $M \sim 4$ и ощущалось в эпицентре силой до 4 баллов по шкале MSK-64. Землетрясение вызвало большой интерес у сейсмологов, так как произошло на платформенной территории, характеризующейся слабой сейсмичностью. Регистрация землетрясения сейсмическими станциями Украины, Белоруссии и России, расположенных на региональных расстояниях, позволила использовать эти данные для дальнейших исследований, связанных с выявлени-

ем неоднородностей строения земной коры в юго-западной части Восточно-Европейской платформы, включающей зону сочленения Украинского щита и Воронежского кристаллического массива.

Волновые формы землетрясения

На основе анализа записей волновых форм получены параметры Криворожского землетрясения в ряде центров (табл. 1).

Различные центры использовали для получения параметров различные сети станций:

– в службе срочных донесений ГС РАН эпицентр найден по данным 18 станций, достаточно хорошо окружавших эпицентр и удаленных на расстояния от 3 до 67 градусов;

– в бюллетене Международного центра данных IDC (Вена, Австрия) использовались данные 12 станции на расстояниях 3.85 до 66.94 градуса, по которым были выделены в основном первые вступления продольных волн;

– в Американском Национальном центре данных о землетрясениях – NEIC использована более представительная выборка из 39 станций с расстояниями от 3.17 до 66.84 градуса.

Авторами настоящей статьи для проведения уточненной локации использовались данные 48 станций, ближайшие из которых показаны на рис. 1, с расстояниями от 1.76 до 66.90, по значительной части были собраны волновые формы с записью землетрясения. Всего было выделено 96 сейсмических фаз, как первых вступлений, так и последующих вторичных фаз.

© Габсатарова И. П., Кендзера А. В., Надежка Л. И., Лесовой Ю. В., Пивоваров С. П., 2011

Таблица 1

Основные параметры гипоцентра Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. по данным различных центров и служб

Центр	Время в очаге h-m-s (GMT)	φ, N, град.	λ, E, град.	Глу- бина, км	Эллипс ошибок			mb/N	Ms/N	M _L
					Большая полуось	Малая полуось	AZ			
ГС РАН- ССД	04:09:36,2	48,06	33,57	33				3,9/5		
NEIC, США	04:09:36,71± 1,1 s	48,084	33,486	43,8	6,8	4,8	214	3,7/4		
IDC, Австрия, Вена	04:09:32.93± 1,05 s	48,0297	33,4529	0f	17,7	10,5	152	3,8/6	3,6/2	3,3/6
Крымский бюллетень – WSG:	04 09 34,6 ± 2 сек	47,79°N ± 0,15	33,38°E ± 0,15	0						K = 9,5 ± 0,6
Крымский бюллетень – ручная обра- ботка	04 09 34,6 ± 0,6	47,90°± 0,2	33,40°± 0,2	0						M _b = 2,9 M _{SH} = 3,2
ГС РАН Уточнение	04:09:34,94± 0,8	48.029± 1,8км	33.437± 1,7км	16±4	4,1	3,7	33			50 ст. – 118 сейсмичес- ких фаз



Рис. 1. Ближайшие станции, участвующие в локации Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г.

Нужно отметить, что исследуемое землетрясение, несмотря на то, что зарегистрировано представительной сетью станций, имело проблемы в выделении и интерпретации в группе продольных волн. Для их выделения порой не помогала полосовая фильтрация, незначительное улучшение было и при применении поляризационной фильтрации [1].

Для более надежного определения глубины очага землетрясения по данным такой довольно удалённой сети сейсмических станций необходимо использование глубинных фаз. Все имеющиеся волновые формы были рассмотрены. На записях трех станций были обнаружены глубинные фазы: TIRR (Румыния) – Δ = 5.0°, ARU (Арти, Урал, Россия) – Δ = 17.3°, BRVK, BVAR (Боровое и Боровое

сейсмогруппа, Казахстан) – $\Delta = 23^\circ$. Выделены вторичные фазы, при интерпретации которых как рР, средняя глубина для землетрясений составила 17–18 км. Выделенные фазы были использованы совместно со всеми другими при локации. Для более уверенного обнаружения и интерпре-

тации глубинных фаз применялся метод кепстрального анализа фрагмента записи в группе Р-волн [2, 3].

Однако, как показывают результаты локации с использованием глубинных фаз и без них, параметры очага достаточно близки (табл. 2).

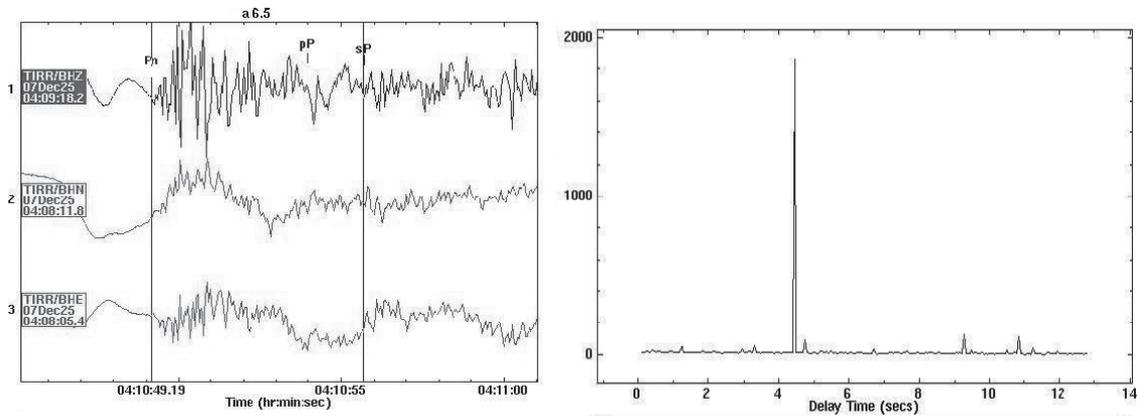


Рис. 2. Фрагмент записи Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. на станции Tirusor – TIRR с последующими глубинными фазами и кепстр 13-секундного фрагмента записи группы Р-волн с выделенной глубинной фазой через 4.5 с, соответствующей глубине 18 км

Таблица 2

Уточненные параметры гипоцентра Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г.

Используемые данные	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр						Характеристика сети			
			φ° , N	$\delta\varphi$, км	λ° , E	$\delta\lambda$, км	h , м	δh , км	N сейсм. фаз	Min dist $^\circ$	Max dist $^\circ$	GAP $^\circ$
Все выделенные фазы без глубинных фаз	04:09:35.36	0.8	48.047	± 1.8	33.421	± 1.7	18	6	115	1.76	66.8	40
Все фазы + + глубинные	04:09:34.94	0.6	48.029	± 1.8	33.437	± 1.7	16	4	118	1.76	66.8	40

Для определения механизма очага рассмотрены особенности волновой картины в пяти различных азимутах и на различных расстояниях.

1. 14–50 $^\circ$: по записям станций POL – Полтава, Украина; OBN – Обнинск, MHV – Михнево, (GEOPHON), LPSR, VRS, VRHR, VORD, VPUM – станции Воронежской локальной сети, Россия;

2. 120–140 $^\circ$: по записям станций ANN – Анапа; DOMR – Домбай, Россия;

3. 220–235 $^\circ$: по записям станций ODE – Одесса, TIRR – Tirusor, Румыния,

4. 270–290 $^\circ$: по записям станций NOD HOF MOF KSV LVV RAF MEF TRPA;

5. 305–335 $^\circ$: по записям станций SKV AKASG; MNK – Минск, NAR – Нарочь, Беларусь (записи любезно предоставлены по обмену из Центра Геофизического мониторинга НАН Белоруссии).

1. Для записей азимутального створа BAZ = 14–50 $^\circ$, как видно из рис. 3, характерно преобладание

по амплитудам записей Sn волн в частотном диапазоне 1–5 Гц на расстояниях от 1.76 до 7.5 градусов. Каналовые волны Lg незначительно выделяются на фоне группы этих волн лишь в диапазоне частот 0.4–1.2 Гц. Вступления продольных волн Pn слабы, но все же, как правило, отчетливо выделяются на фоне помех при применении полосовой фильтрации, волны P_g, выходящие во вторичные вступления на расстояниях более 2 градусов, практически не выделяются.

В отдельных случаях (рис. 4) для выделения вступлений применялась поляризационная фильтрация. Она основывалась на пересчете сигнала в направлении на заданный источник с помощью известного азимута на источник и угла выхода сейсмического луча. При правильном подборе параметров поляризационного фильтра можно получить довольно отчетливое вступление волны, неоднозначно выделяемое при полосовой фильтрации.

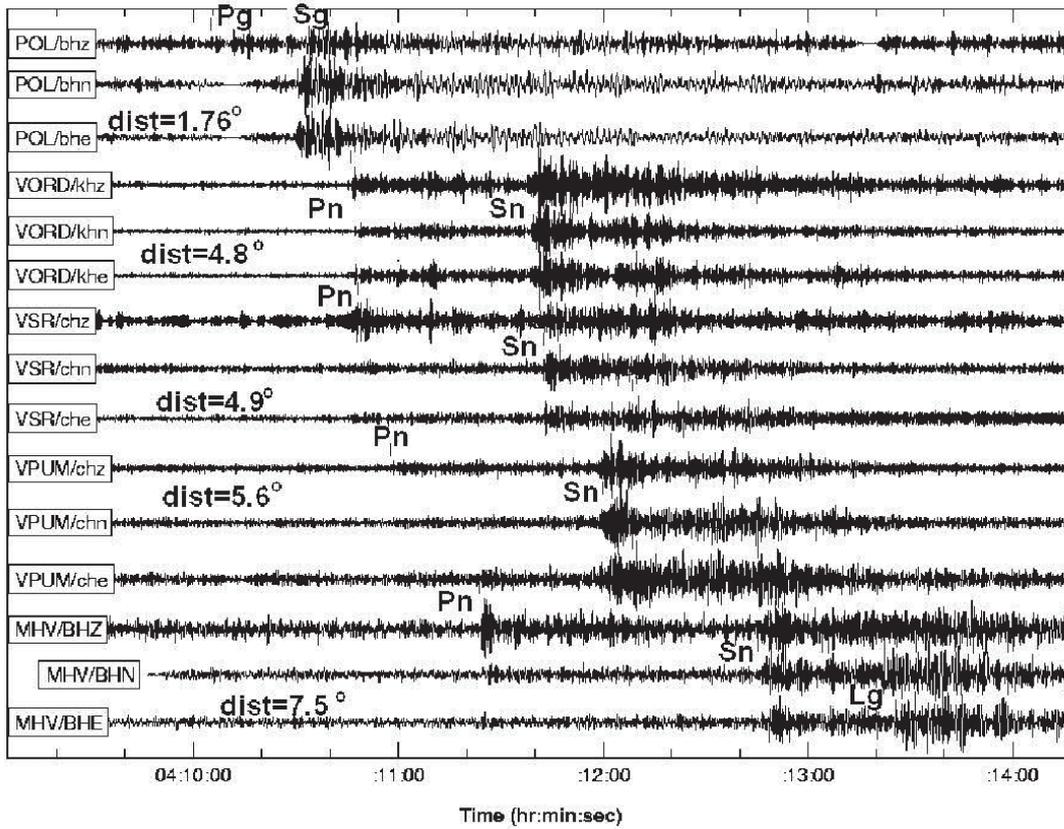


Рис. 3. Фильтрованные в полосе частот 1–5 Гц трёхкомпонентные записи волновых форм Криворожского землетрясения, записанные станциями, расположенными в азимутальном створе 14–50 градусов

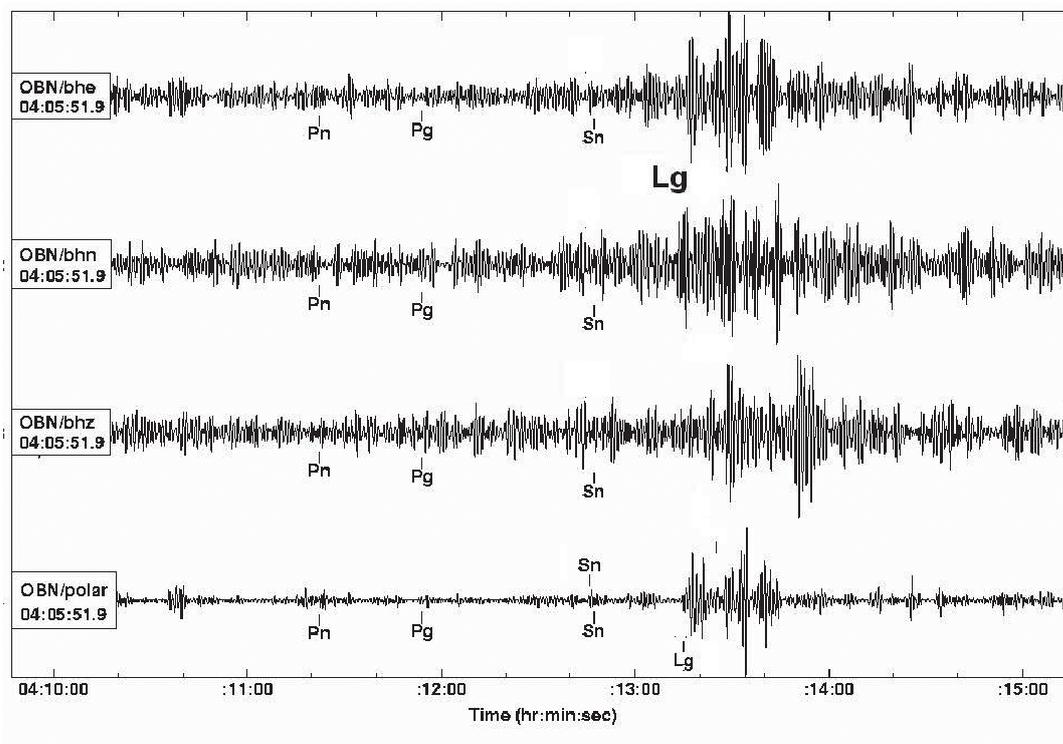


Рис. 4. Фильтрованные в полосе частот 0.7–1.4 Гц трёхкомпонентные записи волновых форм Криворожского землетрясения, записанные сейсмостанцией «Обнинск», и построенная по ним запись поляризационного фильтра (нижняя на рисунке, обозначенная OBN/polar), с учетом азимута на эпицентр и угла выхода для волны Lg

2. Записи азимутального створа $BAz = 120-140^\circ$ представлены немногочисленными станциями Северного Кавказа, слабо записавшими землетрясение на фоне шумов, что видно на рис. 5 трехкомпонентной записи на станции Анапа. Вступления

волн на таких записях выделяются с большим трудом, что характеризует повышенное затухание особенно поперечных волн по трассе, проходящей через Азовское море.

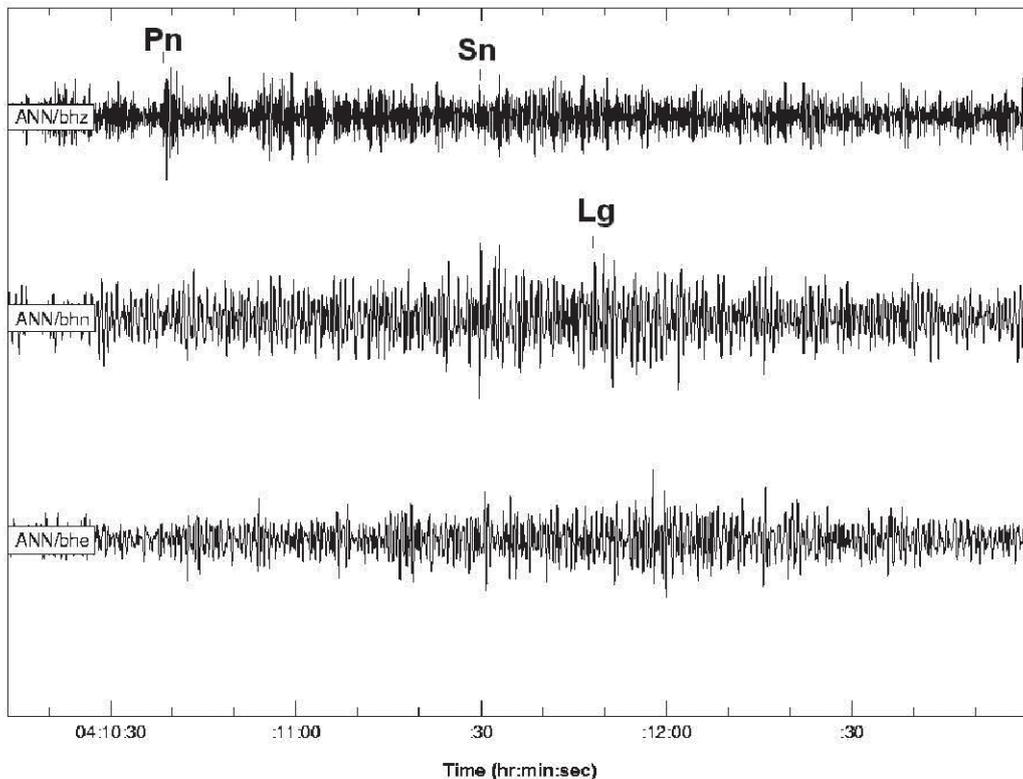


Рис. 5. Трёхкомпонентные записи Криворожского землетрясения на станции «Анапа», удаленной на расстоянии 4.3 градуса. Верхняя сейсмограмма – вертикальная компонента, фильтрованная в полосе 1–5 Гц, две горизонтальные ниже – в полосе 1–3 Гц

3. Записи азимутального створа $BAz = 220-235^\circ$ наиболее качественно зарегистрированы на станции Одесса и Tîrgusor, Румыния (рис. 6). Вступления волны Pg , которое, вероятно, уже должно придти на расстоянии 2.2 градуса (Одесса) чуть позже Pn , практически не выделяется, волны сливаются в одну группу, и вероятно этим объясняются довольно высокие амплитуды в группе продольных волн. А вот волны Sn и Lg удается разделить и по частотному составу и по амплитуде. Волна Sn приходит на 1.5 секунды раньше Lg .

Как уже отмечалось, на записи станции Tîrgusor удалось выделить глубинную фазу, хорошо выделяются здесь и все другие фазы.

4. Станции азимутального створа $BAz = 270-290^\circ$ представляют самую многочисленную группу (рис. 7). Несмотря на расстояния больше чем 3.9 градуса, эти станции хорошо записали группу поперечных волн, представленную волнами Sn , Sg и Lg . Рефрагированные на границе Мохо волны Sn

имеют незначительные амплитуды, а вот каналовые Lg наоборот имеют максимальные амплитуды и хорошо видны практически на всех станциях.

Продольные волны имеют небольшое отношение сигнал/шум, однако выделяются в полосах 1–2 и 2–4 Гц. На записи, сделанных станцией «Львов», хорошо виден цуг поверхностной волны Рэлея.

5. На записях станций Сквир – SKV и сейсмической группы Малин – АКAG видна волновая картина, подобная предыдущей группы станций: малоамплитудные, но отчетливо выделяемые продольные волны, чуть выше по амплитудам волны Sn , максимальные по амплитудам волны Sg и Lg . Станции Минск и Нарочь записали только группу поперечных волн (рис. 8).

Из анализа волновой картины следует, что в азимутальном створе 14–50 градусов, т.е. в северо-северо-восточном направлении отмечается отличные от других направлений характеристики волновой картины, в основном связанные с менее выра-

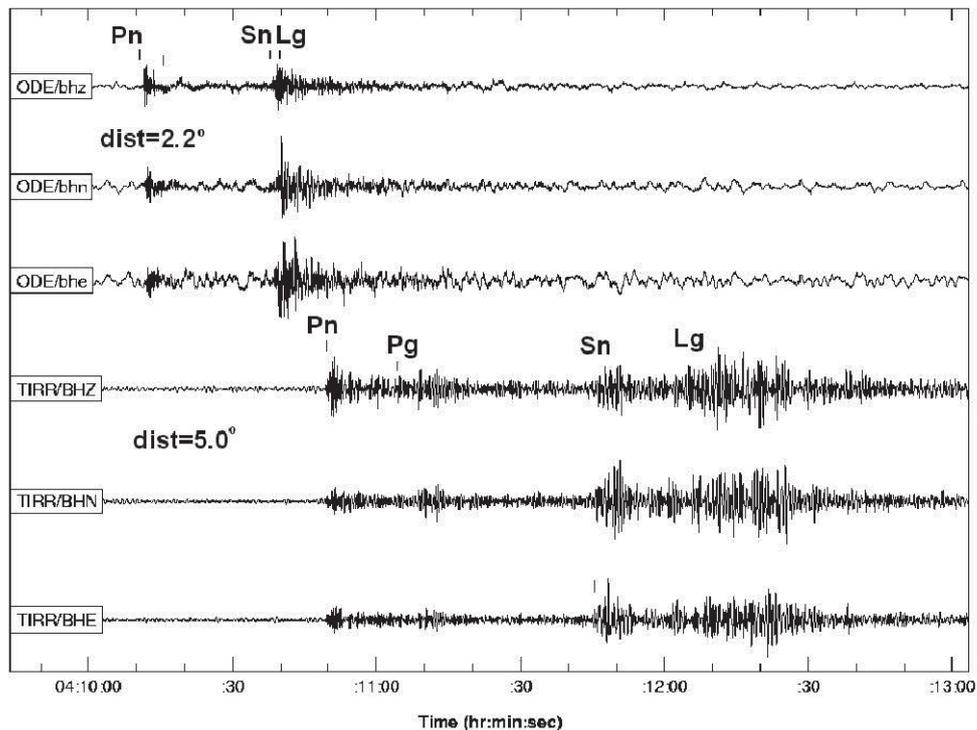


Рис. 6. Трехкомпонентные записи Криворожского землетрясения, записанные станцией «Одесса» (нефильтрованные), удаленной на расстояние 2.2 градуса, и по станции «Tirgusor» – фильтрованная запись в полосе 1–5 Гц

женными каналовыми волнами Lg, явно выделяющимися и преобладающими по амплитудам в других азимутальных направлениях. Известно, что волны Lg, как правило, максимально выражены на записях сейсмических событий на платформе. Факт различия волновой картины уже сам по себе говорит о неоднородностях строения среды на пути распространения сейсмических лучей в северо-северо-восточном направлении и требует дальнейшего исследования. Следует заметить, что подобное соотношение с преобладанием амплитуд Sn над амплитудами Lg отмечалось на станциях Воронежского кристаллического массива и при регистрации Бердянского землетрясения 31 июля 2006 г. в 09^h04^m [2].

Кроме того, видны различия в волновой картине двух станций, расположенных в центре Восточно-Европейской платформы – Обнинск ($\Delta = 7.36^\circ$, $Az = 14^\circ$) и Михнево ($\Delta = 7.45^\circ$, $Az = 20^\circ$), вероятно, также связанные с различным строением на пути распространения волн с очага на станции, и, возможно со специфическими условиями непосредственно в месте регистрации. На рис. 9 сравниваются трехкомпонентные записи этих станций. На записи Михнево отчетливо выделяется высокоамплитудная и высокочастотная фаза Pn, в отличие от записи станции Обнинск, где выделить эту фазу

вообще не представляется возможным, даже при применении поляризационного фильтра.

В сложных условиях регистрации относительно слабого землетрясения для такой удаленной сети станций, и, вследствие этого, нечетких первых вступлений в P волнах на фоне шумов, на первый взгляд, казалось невозможным построить механизм очага Криворожского землетрясения по применяемой в ГС РАН методике, базирующейся на знаках первого движения в P-волне. Однако тщательный анализ все же позволил найти знаки первого движения на 15 станциях. Они располагались в разных азимутальных квадрантах относительно эпицентра и регистрировали и волны сжатия – знаки «+» и растяжения – знаки «-» (табл. 3). Этого оказалось достаточно для построения статистически значимого механизма очага, вернее найти достаточно уверенное положение осей сжатия и растяжения и нодальных плоскостей (табл. 4).

По распределению знаков первого движения, станции, расположенные к северо-востоку на Воронежском кристаллическом массиве, также выделяются, так как на них регистрировались волны сжатия, в отличие от станций юго-западного направления, где в основном регистрировались волны растяжения.

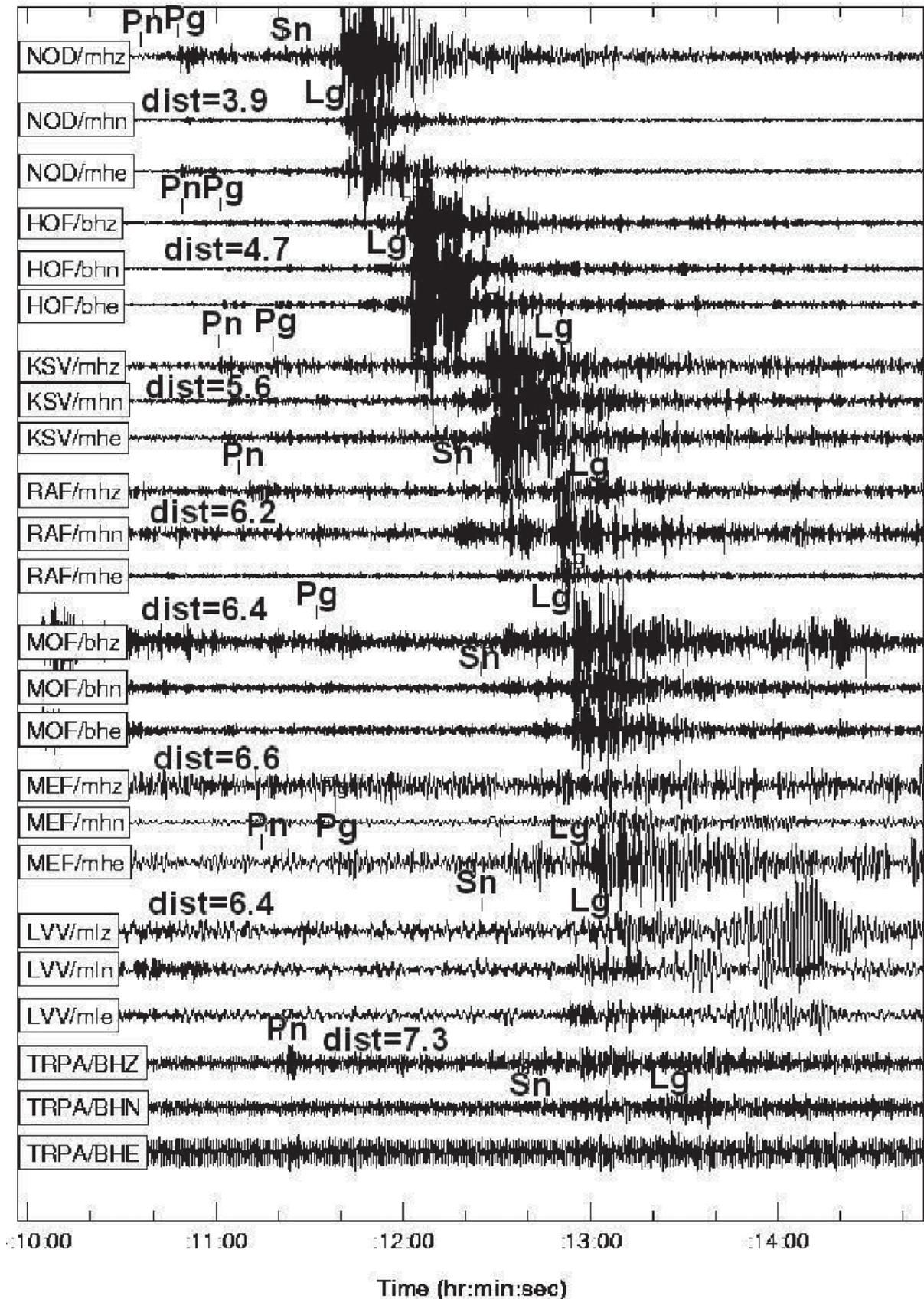


Рис. 7. Трёхкомпонентные записи Квиркидзского землетрясения, записанные станциями, расположенными в азимутальном створе 270–290 градусов, фильтрация в полосе 1–2 Гц

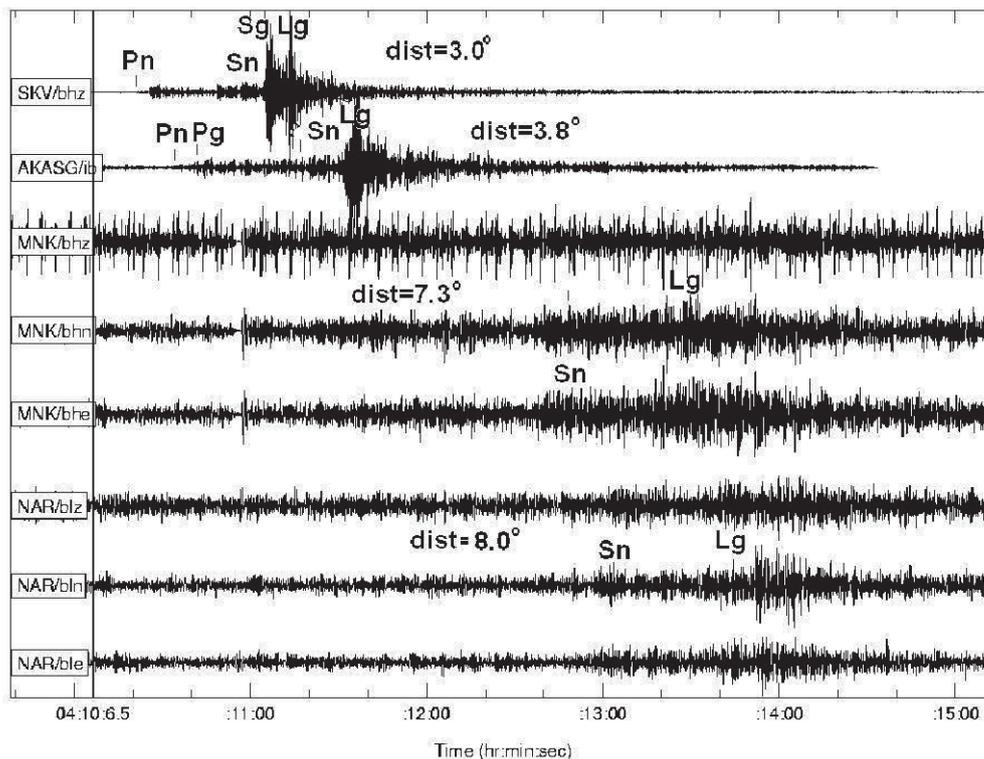


Рис. 8. Трехкомпонентные записи Криворожского землетрясения, записаны станциями, расположенными в азимутальном створе 305–335 градусов. Записи станциями «Нарочь» и «Минск» фильтрованы в полосе 0.6–4.5 Гц

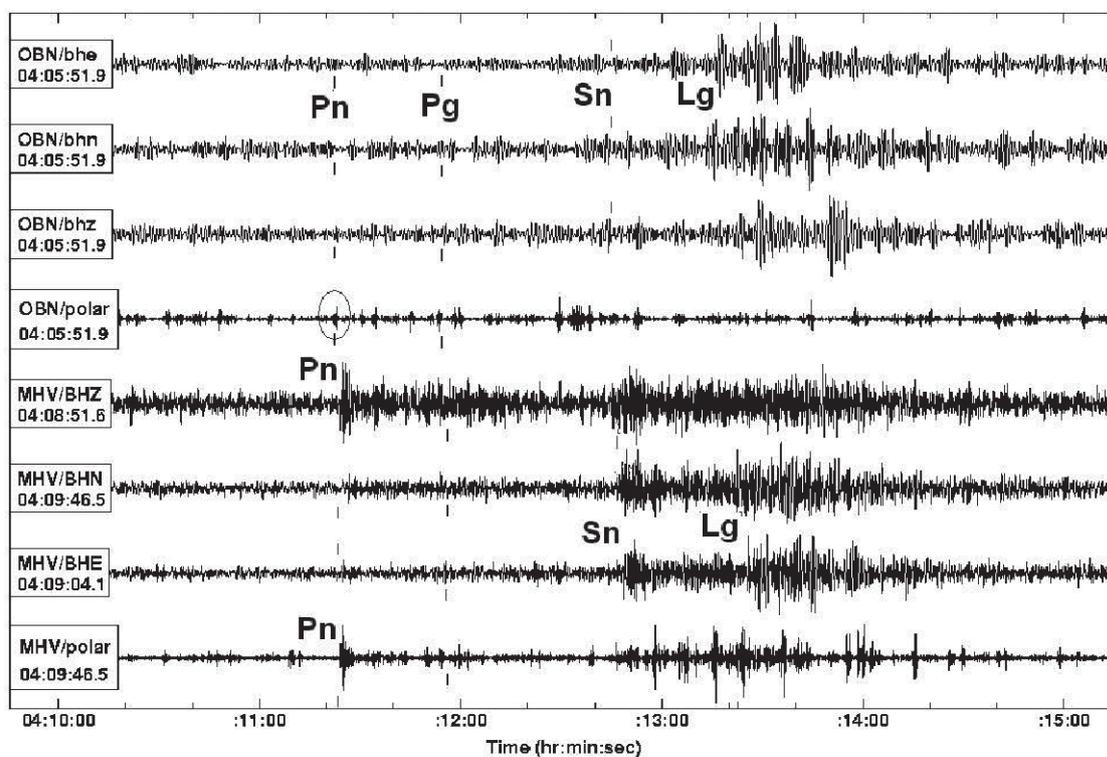


Рис. 9. Сравнение записей Криворожского землетрясения на станциях «Обнинск» и «Михнево» с записью поляризационной фильтрации (четвертая сверху и нижняя на рисунке, обозначенные OBN/polar и MHV/polar). Записи на станции «Обнинск» фильтрованы в полосе 0.7–1.4 Гц, «Михнево» – 1–5 Гц

Таблица 3
Входные данные для расчета механизма очага землетрясения 25 декабря 2007 г.

Код станции	Знак первого движения	Название фазы	Δ°	Азимут, градусы	Угол выхода сейсмического луча
ODE	–	Pn	2.19	232.8	42.2
SKV	–	Pn	3.00	305.5	42.2
AKASG	–	Pn	3.83	315.8	42.2
NOD	–	Pn	3.90	281.8	42.2
ANN	+	Pn	4.24	138.1	42.2
HOF	–	Pn	4.73	286.7	42.2
VORD	+	Pn	4.80	50.1	42.2
VSR	+	Pn	4.90	47.3	42.2
TIRR	–	Pn	4.98	226.1	42.2
VPUM	+	Pn	5.59	40.4	42.2
NSF	+	Pn	6.66	275.2	42.2
TRPA	–	Pn	7.28	274.8	42.2
KIV	+	Pn	7.60	119.0	42.2
OJC	–	Pn	9.18	288.9	42.2
ARU	–	P	17.4	51.8	49.8
BRVK	–	P	23.7	63.8	59.4

Расчет механизма очага производился с использованием программы FA, позволяющей рассчитывать углы выхода на различных расстояниях, и региональной скоростной модели земной коры и верхней части мантии.

Таблица 4
Параметры механизма очага Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г., полученные по знакам первого движения

T		P		N		NP1			NP2		
PI	AZ	PL	AZ	AZ	PL	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
9	97	76	227	6	10	359	55	–103	200	37	–73

Тип движения в очаге – практически чистый сброс с небольшими сдвиговыми компонентами. Землетрясения этого типа обычно рассматриваются как реакция на почти горизонтальное растяжение, которое в настоящем решении ориентировано в восточном направлении. Обе нодальные плоскости имеют близмеридиональное простирание. По более крутой плоскости NP1 – сброс с правосторонней сдвиговой компонентой, по более пологой плоскости NP2 – сброс с левосторонним сдвигом.

Выводы

Таким образом, комплексный анализ записей волновых форм Криворожского землетрясения представительной сетью сейсмических станций позволил уверенно определить не только координаты

эпицентра, но и глубину и механизм очага. Построенный в результате анализа волновых форм механизм очага отразил характер современного сейсмического процесса в сложной тектонической зоне – Криворожско-Кременчугской зоне разломов. Это почти чистый сброс. Данные ГСЗ, ОГТ, МОВЗ свидетельствуют об изменении глубин основных границ, пластовых и граничных скоростей западнее и восточнее зоны разломов [4-7]. Непосредственно район очага землетрясения характеризуется знакопеременным характером современных вертикальных движений: положительные движения (+6 мм/год по данным [8]) сменяются отрицательными –3, –4 мм/год (по данным [9]).

Следует заметить, что глубина очага коррелируется с границей K_2 , глубина которой в пределах зоны Криворожско-Кременчугской зоны разломов изменяется от 20 до 12 км [10].

Все эти особенности совместно с механизмом очага землетрясения позволяют увязать характер современных сеймотектонических процессов и особенностей строения и состояния земной коры и верхов мантии в сложной тектонической зоне платформенной литосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 10-05-90427 Укр_а

ЛИТЕРАТУРА

1. Кедров О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний / О. К. Кедров. – М.–Саранск : Изд-во ИФЗ РАН, 2005. С. 420.
2. Габсатарова И. П. Параметры Бердянского землетрясения 31 июля 2006 года с $M_S = 3.3$ (Украина, Запорожская обл.) / И. П. Габсатарова, Е. А. Бабкова // Сейсмологический бюллетень Украины. – 2007.
3. Канасевич Э. Р. Анализ временных последовательностей в геофизике / Э. Р. Канасевич. – М. : Недра, 1985. – 400 с.
4. Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VII / гл. ред. А. В. Чекунов. – Киев : Наук. думка, 1988. – 171 с.
5. Соллогуб В. Б. Литосфера Украины / В. Б. Соллогуб. – Киев : Наук. думка, 1986. – 186 с.
6. Старостенко В. И. Глубинное строение Украинского щита / В. И. Старостенко, И. К. Пашкевич, Р. И. Кутас // Геофиз. журн. – 2002. – № 6. – С. 36–48.
7. Чекунов А. В. Структура земной коры и тектоника юга Европейской части СССР / А. В. Чекунов. – Киев : Наук. думка, 1972. – 175 с.
8. Бондарчук В. Г. Некоторые результаты десятилетних исследований современных тектонических движений земной коры на Криворожском геодинамическом полигоне / В. Г. Бондарчук, А. И. Денисов, П. Е. Курочкин // VII Всесоюз. совещ. по изучению СВДЗК : тез. докл. – М., 1977. – С. 20–21.

9. Палиєнко В. П. Сучасні рухи земної кори на території України: проблеми тектонічної інтерпретації та картографування / В. П. Палиєнко [и др.] // Геоінформатика. – 2004. – № 1. – С. 66–73.

Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия
И. П. Габсатарова, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией
Тел. 8 (48439) 309-64
ira@gsras.ru

Институт геофизики НАН Украины, Киев
А. В. Кендзера, кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе
Тел. +380-444-23-81-43
kendzera@igph.kiev.ua

Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия
Л. И. Надежка, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива
Тел. 8 (473) 255-78-28
nadezhka@geophys.vsu.ru

Институт геофизики НАН Украины, Киев
Ю. В. Лесовой, руководитель Национального сейсмологического центра
Тел. +380-444-24-01-00
lisonyi@bigmir.net

Геофизическая служба РАН, Обнинск, Россия
С. П. Пивоваров, младший научный сотрудник лаборатории Сейсмического мониторинга Воронежского кристаллического массива
Тел. 8 (473) 255-78-44
serg@geophys.vsu.ru

10. Кутас В. В. Криворожское землетрясение 25 декабря 2007 г. / В. В. Кутас [и др.] // Геофизический журнал. – 2009. – № 1. – С. 42–52.

Geophysical Service of the Russian Academy
I. P. Gabsatarova, the Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of
Tel. 8 (48439) 309-64
ira@gsras.ru

Institute of Geophysics National Academy of Sciences of Ukraine
A. V. Kendzera, the Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director
Tel. +380-444-23-81-43
kendzera@igph.kiev.ua

Geophysical Service of the Russian Academy
L. I. Nadezhka, the Candidate of Geology-Mineralogical Sciences, Head of Seismic Monitoring Voronezh Cristalline Massiff Geophisic
Tel. 8 (473) 255-78-28
nadezhka@geophys.vsu.ru

Institute of Geophysics National Academy of Sciences of Ukraine
I. V. Lesovoy, Head of the National Seismological Centre
Tel. +380-444-24-01-00
lisonyi@bigmir.net

Geophysical Service of the Russian Academy
S. P. Pivovarov, Research Worker, Laboratory of Seismic Monitoring Voronezh Cristalline Massiff Geophisic
Tel. 8 (473) 255-78-44
serg@geophys.vsu.ru