

КРИВОРОЖСКОЕ-III ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 23 июня 2013 г.

с $K_p=11.6$, $M_{w_{\text{рег}}}=4.5$, $I_0=6$ (Украина, Днепропетровская область)

Б.Г. Пустовитенко, А.М. Скляр, В.С. Князева, Н.М. Козиненко, А.А. Скляр

*Институт сейсмологии и геодинамики Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского,
г. Симферополь, Россия, bpustovitenko@mail.ru*

Аннотация. 23 июня 2013 г. на платформенной территории Украины в районе г. Кривой Рог (Днепропетровская область) произошло ощутимое землетрясение с интенсивностью в эпицентральной зоне $I_0=6$ баллов. Землетрясение возникло в верхней части земной коры Приднепровского крупного блока Украинского щита под действием горизонтальных сил сжатия и приурочено к сложной зоне сочленения Криворожско-Кременчугского и Ледекинского глубинных разломов. Тип подвижки в очаге – сдвиго-взброс, с преобладанием сдвиговой составляющей. Наиболее вероятная плоскость разрыва – север-северо-восточного направления, ориентированная вдоль Криворожско-Кременчугского разлома. В этом же направлении вытянута большая ось первой изосейсты.

По энергетическим характеристикам ($K_p=11.6$, $M_{w_{\text{рег}}}=4.5$) и макросейсмическому эффекту ($I_0=6$ баллов) это сейсмическое событие относится к наиболее сильным за период инструментальных наблюдений. По спектрам записей объемных сейсмических волн на четырех станциях Крыма восстановлены динамические параметры очага с использованием дислокационной модели Брюна. Приведены подробные инструментальные и макросейсмические данные. Дано сравнение полученных параметров с аналогичными для других Криворожских землетрясений.

Ключевые слова: гипоцентр землетрясения, изосейсты, фокальный механизм, динамические параметры очагов, глубинный разлом.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.37

Для цитирования: Пустовитенко Б.Г., Скляр А.М., Князева В.С., Козиненко Н.М., Скляр А.А. Криворожское-III землетрясение 23 июня 2013 г. с $K_p=11.6$, $M_{w_{\text{рег}}}=4.5$, $I_0=6$ (Украина, Днепропетровская область) // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 421–434. doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.37

Общие сведения о землетрясении. За последние 7 лет на платформенной части территории Украины в районе горнопромышленной зоны г. Кривой Рог (Днепропетровская область) трижды произошли ощутимые сейсмические события с интенсивностью в эпицентральной зоне $I_0=5–6$ баллов: 25 декабря 2007 г., 14 января 2011 г. и 23 июня 2013 г. [1–3]. В результате комплексной интерпретации инструментальных и макросейсмических данных события 25.12.2007 г. и 14.01.2011 г. идентифицированы как тектонические землетрясения [1, 2].

Рассматриваемое Криворожское-III землетрясение 23 июня 2013 г., как и предыдущие, возникло в верхней части земной коры Приднепровского крупного блока Украинского щита [4] и приурочено к сложной зоне сочленения Криворожско-Кременчугского глубинного разлома субмеридионального направления и Ледекинского разлома, пересекающего его в диагональном направлении, с юго-востока на северо-запад [5]. По величине магнитуды ($M_w=4.5$) и макросейсмическому эффекту ($I_0=6$ баллов) последнее сейсмическое событие относится к наиболее сильным за весь период инструментальных наблюдений. В соответствии с картой общего сейсмического районирования территории Украины (ОСР-2004) [6], в районе произошедшего землетрясения возможны сейсмические воздействия с интенсивностью $I=5$ баллов один раз в 500 лет (ОСР-А), $I=6$ баллов – в 1000 лет (ОСР-В) и $I=7$ баллов – в 5000 лет (ОСР-С). Наблюденные сейсмические воздействия от Криворожского землетрясения 2013 г. с интенсивностью в эпицентральной зоне $I=6$ баллов превысили прогнозные расчетные значения по карте ОСР-А на 1 балл и соответствовали таковой по карте ОСР-В.

Основные параметры. Криворожское-III землетрясение инструментально зарегистрировано 280 сейсмическими станциями на расстояниях примерно до 16000 км (144.6°) и обработано в нескольких сейсмологических международных центрах (агентствах).

Основные параметры землетрясения по данным десяти центров обработки данных, включая Крым, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г. по данным различных сейсмологических агентств

Агентство	Δ_{\min}°	Число станций	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр				Магнитуда	Источник
					φ°, N	λ°, E	δ°	h , км		
Крым, WSG	3.1	13	21 16 36.0	0.8	47.86	33.45	0.07	5f	$K_p=11.6/6$, $m_b=3.7/6$, $MSH=4.3/6$, $Md=4.0/7$	наст. ст
Крым, GIPO-08	2.95	11	21 16 34.8	0.3	47.86	33.48	0.10	0	$Mw_{per}=4.5/6$	наст. ст
Макросейсмика			21 16		48.05	33.46		6		наст. ст
ССД		21	21 16 32.8		48.01	33.37		15	$m_b=4.7$	[7]
ГС РАН		43	21 16 33.36	0.3	48.09	33.34	0.03	10	$MS=3.4/3$	[8]
MOS	7.69	21	21 16 33.4	1.2	48.04	33.33	0.04	21	$m_b=4.7/12$	[9]
ISC	3.2	387	21 16 33.6	0.29	48.11	33.40	0.03	10f	$m_b=4.6/60$	[10]
NEIC	3.8	51	21 16 35.2	2.5	48.05	33.37	0.06	14	$m_b=4.5/51$	[10]
IDC	3.9	53	21 16 32.9	0.37	47.99	33.43	0.05	0f	$m_b=4.2/22, ML=3.5/15$	[10]
EMSC	3.4	157	21 16 33.0	2.0	48.12	33.45	0.03	2	$m_b=4.6$	[11]
BUC	3.38	42	21 16 34.1	1.0	48.05	33.54		10	$ML=4.9/13$	[11]

Примечание. Данные ССД и ГС РАН добавлены *ред.*

Координаты эпицентра (табл. 1, рис. 1), определенные различными агентствами, близки между собой (в пределах погрешностей их определения – эллипса ошибок), их средние значения составляют: $\bar{\varphi}=48.02^{\circ}$, $\bar{\lambda}=33.43^{\circ}$, $\pm \delta \varphi$, $\delta \lambda=0.04^{\circ}$. Расчет значений координат среднего геометрического эпицентра выполнен для иллюстрации устойчивости в оценке местоположения. При интерпретации волновых форм и сводной обработке в Крыму [12] (программы WSG [13] и GIPO-08 [14]) были использованы только времена вступления объемных *P*- и *S*-волн на близких к эпицентру ($\Delta \leq 834$ км) сейсмических станциях Украины, Молдовы, Румынии, России. Ближайшими кочагу являются станции, расположенные в городах: Кривой Рог (UK15), Николаев (MI07) и Полтава (MI02).

К сожалению, на станциях в г. Кривом Роге и в Полтаве произошел сбой точного времени, поэтому в расчете эпицентра по программе GIPO-08 эти станции не участвуют. При определении координат эпицентра методом засечек в программе WSG использовались все времена вступления сейсмических волн на станциях до 1000 км, включая «UK15», «MI02» и «MI07». Записи ближайших станций с четкими фазами вступления сейсмических волн, представлены на рис. 2.

Из всех просчитанных в Крымском центре обработки данных вариантов решений меньшие погрешности получены для глубины очага 5 км (WSG) и 0 км (GIPO-08). За окончательные координаты инструментального гипоцентра приняты: $\varphi_n=47.86^{\circ}$, $\lambda_n=33.45^{\circ}$, $h_n=5$ км, которые отличаются от макросейсмических данных и других решений (табл. 1, рис. 1).

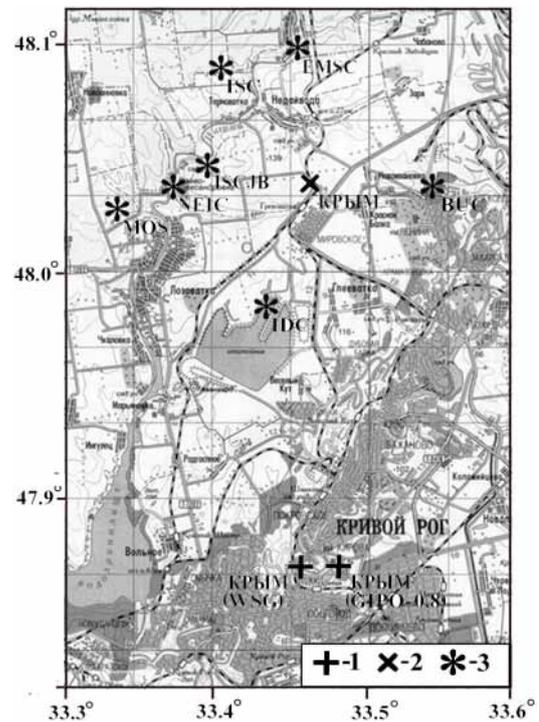


Рис. 1. Разные решения эпицентра землетрясения 23 июня 2013 г.

1 – инструментальный эпицентр по региональным данным по двум программам (табл. 1); 2 – макросейсмический эпицентр (см. ниже рис. 5); 3 – инструментальный эпицентр по данным других сейсмологических служб (табл. 1).

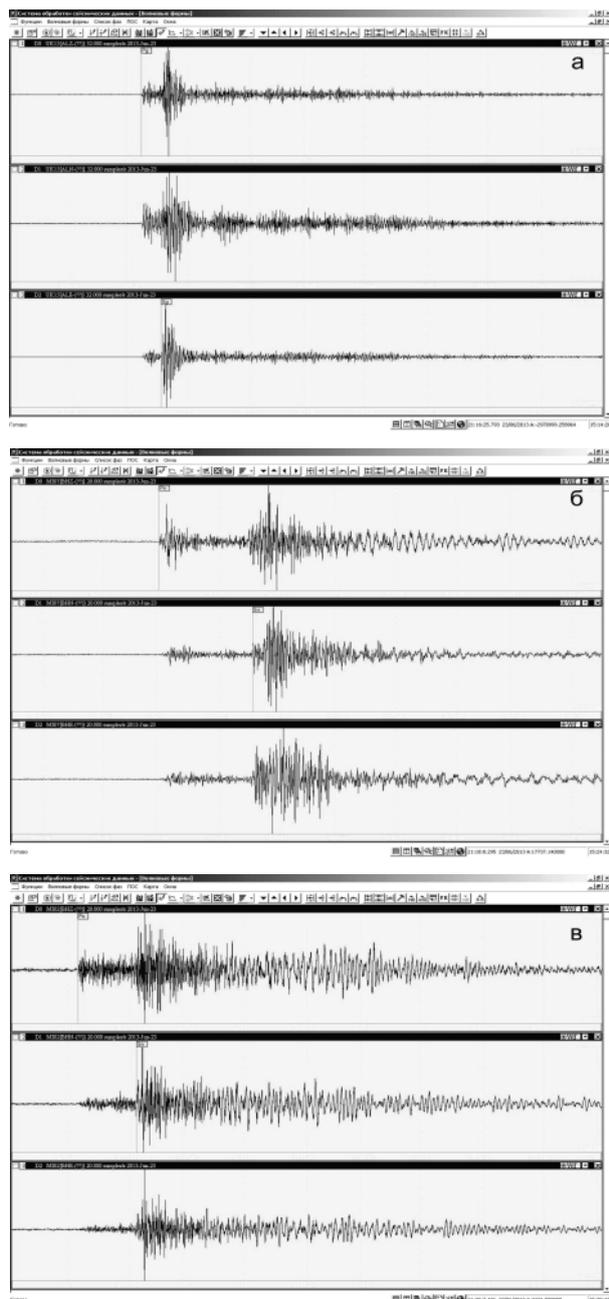


Рис. 2. Записи землетрясения 23 июня 2013 г. на сейсмических станциях «UK15» с $\Delta=18$ км (а), «MI07» с $\Delta=143$ км (б) и «MI02» с $\Delta=203$ км (в)

[18] данные о знаках первых вступлений продольных P -волн по волновым формам, записанным сейсмическими станциями на расстояниях до 7400 км в широком азимутальном окружении.

На стереографической проекции (нижняя полусфера) знаки, соответствующие волнам сжатия и разряжения, уверенно разделились нодальными плоскостями при всех согласованных знаках на станциях. Диаграмма механизма очага и его параметры представлены на рис. 3 и в табл. 2.

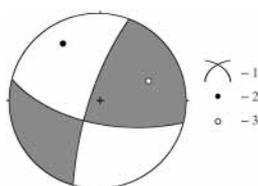


Рис. 3. Диаграмма механизма очага (нижняя полусфера) землетрясения 23 июня 2013 г. по знакам первых вступлений P -волн

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

Глубина очага. Гипоцентр исследуемого Криворожского-III землетрясения находился в земной коре в диапазоне глубин $h=0-21$ км при среднегеометрическом $h_{ср.геом.}=5\pm 1$ км. Этим инструментальным оценкам не противоречат и независимые макросейсмические расчеты (табл. 1). Взяв за основу определения глубины по макросейсмическим данным $h_M \approx 6$ км и среднегеометрическое $h_{ср.геом.}=5$ км – по инструментальным, примем глубину очага в диапазоне $h=5-10$ км для дальнейшего использования при выборе скоростной модели среды в оценках очаговых параметров.

Магнитуды. Все центры обработки данных оценили значение магнитуд по объемным волнам m_b с хорошей сходимостью результатов: $m_b=4.5\pm 0.1$. Исключение составляет только определение данного типа магнитуд по записям цифровых станций Крыма по короткопериодной аппаратуре с $m_b=3.7$ [12]. Для выяснения причины такого занижения значений m_b по группе станций Крыма необходим статистический материал и специальное исследование. Магнитуды MSH в Крыму рассчитывались по объемным волнам по короткопериодной аппаратуре. Так как поверхностные волны на записи очень слабые и осложнены микросейсмами, то магнитуда MS по поверхностной волне и магнитуда M_s по сейсмической коде не определялись. Определены также другие типы магнитуд: M_d , MSH . Оценка сейсмического момента M_0 и, соответственно, моментной магнитуды $M_{w,per}$ сделана в рамках данной работы (см. ниже). Поскольку землетрясение не относится к местным Крымским, то энергетический класс K_p определен по номограмме Т.Г. Раутиан [15].

Решение механизма очага получено на основе теории дислокации [16] по стандартной методике [17]. Исходными экспериментальными материалами служили уточненные и дополненные по сравнению с прежними

Таблица 2. Параметры механизма очага землетрясения 23 июня 2013 г. в 21^h16^m $K_p=11.6$ (район г. Кривой Рог)

Агент-ство	Дата, д м ч мин с	t_0 , км	h , км	Магнитуды		K_p	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Ис-точ-ник
				$M_{w_{рег}}$	MSH		T		N		P		$NP1$			$NP2$			
							PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$	
Крым	23.06	21 16 34	10	4.5	4.3	11.6	26	64	61	213	13	328	198	81	28	103	62	170	[19]

В соответствии с полученным решением, землетрясение произошло под действием близгоризонтальных сжимающих ($PL=13^\circ$) напряжений, ориентированных диагонально в азимуте $AZM=328^\circ$. Направление растягивающих напряжений при этом было на восток–северо-восток ($AZM=64^\circ$). Тип подвижки в очаге – сдвиг-взброс с преобладанием сдвиговой составляющей подвижки над взбросовой.

Одна из нодальных плоскостей ($NP1$) с азимутом простирания 198° и с крутым ($DP=81^\circ$) падением на северо-запад близка по ориентации к направлению простирания Криворожско-Кременчугского глубинного разлома [5]. Можно предположить, что по данной плоскости произошла главная подвижка, связанная с тектоническим нарушением близмеридионального направления. Вторая нодальная плоскость с азимутом простирания в близширотном ($STK=103^\circ$) направлении имела менее крутое ($DP=62^\circ$) погружение. Отметим однако, что большая ось эллипса высшего балла (см. ниже рис. 5) ориентирована в северо-восточном направлении. Данное решение (табл. 2) отличается от опубликованного ранее в [18] по оперативным данным.

По полученным параметрам механизма очага определены поправки за направленность излучения из очага $R_{0ф}$ [20] на станцию регистрации (табл. 3), которые далее использованы при оценке скалярного сейсмического момента M_0 .

Таблица 3. Значения $R_{0ф}$ для Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г.

Станция	SEV	SIM	SUDU	YAL
P -волна		0.22	0.31	0.23
S -волна	0.59	0.47	0.57	0.47

Примечание. Коды и названия станций: SEV – «Севастополь»; SIM – «Симферополь»; SUDU – «Судак»; YAL – «Ялта».

Динамические параметры очага землетрясения: M_0 – сейсмический момент, r_0 – радиус круговой дислокации, $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение, $\eta\bar{\sigma}$ – кажущееся напряжение, $\Delta\sigma_r$ – радиационное трение, ε – деформация сдвига, \bar{u} – средняя подвижка по разрыву, E_u – энергия образования дислокации в очаге, моментная магнитуда $M_{w_{рег}}$ для Криворожского-III землетрясения восстановлены по записям объемных волн на сейсмических станциях Крыма с использованием дислокационной модели Брюна [21], широко применяемой в сейсмологической практике.

В рамках данной модели удовлетворительно аппроксимированы спектры записей землетрясений Крыма, а также Криворожских землетрясений 25 декабря 2007 г. и 14 января 2011 г. [1, 2]. Методика интерпретации спектров и расчета динамических параметров очага по низкочастотному уровню спектра Ω_0 и угловой частоте f_0 описана в работах [22–25]. Скоростная модель среды принята по работе [26].

Для восстановления динамических параметров использованы амплитудные спектры записей продольных P - (составляющая Z) и поперечных S -волн (во всех случаях использовался полный вектор колебаний по составляющим E-W и N-S) на сейсмических станциях: «Судак» (SUDU, P и S), «Симферополь» (SIM, P и S) и «Севастополь» (SEV, S), «Ялта» (YAL, P и S).

Расчет амплитудных спектров с использованием цифровых записей выполнен методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Примеры спектров и их интерпретация в рамках модели Брюна приведены на рис. 4.

Осреднение значений динамических параметров в табл. 4 выполнено, исходя из логнормального закона распределения величин с нахождением среднего геометрического X и дисперсии S , как в работе [23]. Для моментной магнитуды $M_{w_{рег}}$ вычислено среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

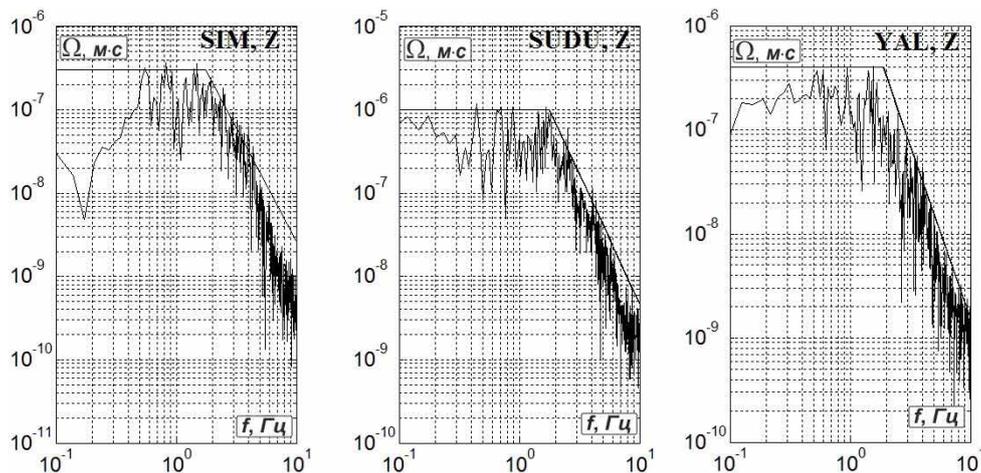


Рис. 4. Примеры амплитудных спектров продольных P -волн Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г. по записям трех цифровых сейсмических станций Крыма: «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL)

Таблица 4. Спектральные и динамические параметры очага Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г. в $21^{\text{h}}16^{\text{m}}$ с $K_p=11.6$, $MSH=4.3$, $M_{w,per}=4.5$

Станция	Волна	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, мс	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	$E_u \cdot 10^{10}$, Дж	$M_{w,per}$
SUDU	P	1.0	1.7	1010	1.35	18.0	69.8	5.89	3.7	5.3	30.4	4.61
SUDU	S	6.4	0.95	741	1.37	12.6	41.8	4.18	5.1	1.2	15.66	4.52
SIM	P	0.35	1.86	566	1.26	12.3	41.7	3.77	6.7	-0.5	11.69	4.44
SIM	S	3.6	1.05	531	1.28	11.2	37.6	3.46	7.1	-1.6	9.9	4.42
SEV	S	3.75	1.05	608	1.28	12.8	42.6	3.96	6.2	0.2	12.97	4.46
YAL	P	0.4	1.85	761	1.27	16.3	54.4	5.02	5.0	3.2	20.77	4.52
YAL	S	3.6	1.0	597	1.34	10.9	36.1	3.53	6.3	-0.9	10.84	4.45
Среднее геометрическое S				672	1.31	12.2	45.22	4.18	5.6	0.5	14.9	4.49*
Дисперсия S				0.04	0.006	0.06	0.04	0.03	0.04		0.06	± 0.05

Примечание. Знаком * отмечено среднее арифметическое.

Как видно из табл. 4, получено удовлетворительное согласие в значениях динамических параметров, восстановленных по записям различных типов волн и станций регистрации. Средняя дисперсия для всех определяемых величин не превысила значения 0.06. Наилучшая сходимость результатов ($S=0.006$) отмечена для радиусов круговой дислокации: $r_0=1.31$ км.

Наибольшее значение сейсмического момента $M_0=1010 \cdot 10^{13}$ Н·м ($1010 \cdot 10^{20}$ дин см) получено по продольной волне (составляющая Z) записи станции «Судак», а наименьшее – по поперечным волнам на станции «Симферополь». Среднее геометрическое M_0 по семи определениям составило $672 \cdot 10^{13}$ Н·м с дисперсией $S=0.04$. Такой незначительный разброс в параметрах M_0 определил хорошую сходимость результатов по оценке моментной магнитуды: $M_{w,per}=4.49 \pm 0.05$ (округленно $M_{w,per}=4.5 \pm 0.1$). Сброшенное и кажущееся напряжения при землетрясении составили $\Delta\sigma=12.2 \cdot 10^5$ Па и $\eta\sigma=5.6 \cdot 10^5$ Па соответственно; средняя подвижка по разрыву – $\bar{u}=4.2$ см, деформация сдвига – $\varepsilon=45.2 \cdot 10^{-6}$, энергия дислокации – $E_u=15 \cdot 10^{10}$ Дж. Получено положительное значение радиационного трения $\Delta\sigma_r=0.5 \cdot 10^5$ Па, что указывает на сравнительно гладкое скольжение берегов разрыва [24], подготовленное предыдущими землетрясениями. В целом восстановленные количественные значения очаговых параметров Криворожского-III землетрясения соответствуют таковым для других землетрясений эквивалентного энергетического уровня [23] (например, в регионе Крым).

Макросейсмические данные. Сбор данных о характере распределения макросейсмического эффекта землетрясения выполнен в период с 3 по 6 июля 2013 г. путем анкетирования населения по специальному вопросу. Большую помощь в сборе макросейсмической инфор-

мации оказали государственная администрация г. Кривой Рог и сотрудники городского управления МЧС. Всего получено около 3.5 тыс. сведений об осязательности землетрясения на территории города и близлежащих населенных пунктов.

Обработка макросейсмических данных осуществлялась в соответствии с признаками шкалы MMSK-84 [27]. В качестве основного объекта при определении интенсивности сотрясений выбран «человек в нормальном состоянии» (в помещении: спящий, движущийся или занятый физическим трудом; вне помещения: в спокойном состоянии). При этом отбирались данные по людям, находящимся 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), после чего производился расчет средней степени реакции ($d_{ср.}$) для отдельных населенных пунктов и предварительно выделенных компактно расположенных участков территории города. Переход от средней степени реакции к интенсивности сотрясений в баллах выполнен по критериям шкалы MMSK-84. Интенсивность сотрясений в пределах изученной территории составила от 3 до 6 баллов (табл. 5, рис. 5).

Таблица 5. Макросейсмические данные о Криворожском-III землетрясении
23 июня 2013 г. в 21^h16^m с $M_{w,per}=4.5$

№	Пункт	φ° N	λ° E	Δ , км	Az°	№	Пункт	φ° N	λ° E	Δ , км	Az°
6 баллов						31	м/р Артём	47.94	33.40	13.0	200.1
1	п. Краматоровка	48.05	33.46	0.6	0	32	м/р Даманский	48.15	33.59	14.7	40.9
2	м/р Роковатая	48.04	33.48	1.8	126.8	33	Центральногородской	47.90	33.33	19.3	210.2
3	м/р Сухая балка	48.03	33.47	2.3	161.5	34	п. Карачуны	47.90	33.29	20.9	217.2
4	с. Глееватка	48.05	33.42	2.9	270.0	35	п. Весёлая Дача	47.89	33.29	21.8	215.5
5	п. им. Ленина	48.09	33.48	4.7	18.5	3–4 балла					
5 баллов						36	м/р Горняцкий	47.96	33.46	10.2	0
6	м/р 44-й квартал	48.03	33.48	2.7	146.2	37	м/р Солнечный	47.95	33.45	11.1	183.8
7	п. Божедаровка	48.04	33.50	3.2	110.5	38	с. Недайвода	48.14	33.37	12.0	326.3
8	м/р 20-й квартал	48.02	33.47	3.4	167.4	39	п. Авангард	48.01	33.32	11.3	246.9
9	м/р Пруды	48.01	33.46	4.4	0	40	м/р Дружба	47.91	33.47	15.6	177.2
10	м/р Закарпатский	48.07	33.52	5.0	63.5	41	м/р Шевченко	47.88	33.35	20.6	203.5
11	п. им. Фрунзе	48.02	33.41	5.0	228.1	42	м/р ЮГОК	47.84	33.35	24.7	199.4
12	п. Алексеевка	48.10	33.50	6.3	28.1	43	с. Веселое	47.84	33.58	25.0	159.0
13	м/р 4-й Заречный	48.0	33.48	5.7	165.0	44	с. Память Ильича	47.76	33.59	33.6	163.2
14	п. Мировское	48.09	33.39	6.8	310.6	3 балла					
15	м/р 5-й Заречный	48.0	33.49	6.0	158.12	45	п. Орджоникидзе	48.10	33.59	11.1	60.0
16	м/р КРЭС	47.99	33.44	6.8	192.6	46	м/р СевГОК	48.16	33.55	13.9	28.6
17	п. Бажаново	47.97	33.44	9.0	189.5	47	с. Чабаново	48.18	33.47	14.5	2.9
4–5 баллов						48	м/р Развилка	47.92	33.45	14.5	182.9
18	м/р 7-й Заречный	48.0	33.47	5.6	172.4	49	м/р 96-й квартал	47.91	33.42	15.8	190.5
19	м/р Соколовка	47.99	33.48	6.8	167.4	50	м/р Соцгород	47.90	33.40	17.2	195.0
20	п. Червоный Горняк	48.0	33.39	7.6	223.1	51	м/р 95-й квартал	47.90	33.37	18.0	201.9
21	м/р Юбилейный	47.96	33.44	10.1	188.5	52	п. Сергеевка	48.16	33.66	19.2	50.5
4 балла						53	м/р Дзержинский	47.87	33.38	20.9	196.6
22	м/р Веселые Терны	48.10	33.55	8.7	50.2	54	п. Всехбратское	47.88	33.25	24.5	219.7
23	м/р Индустриальный	47.97	33.46	8.9	0	2–3 балла					
24	с. Надеждовка	48.06	33.57	8.2	82.2	55	с. Радгоспное	47.98	33.34	11.8	228.9
25	м/р Содружества	47.96	33.44	10.1	188.5	56	с. Марьяновка	48.0	33.29	13.8	246.3
26	м/р 2-й и 3-й Восточный	47.95	33.45	11.1	183.8	57	п. Железнодорожный	47.88	33.49	19.0	173.2
27	м/р Саксаганский	47.95	33.41	11.7	198.5	58	п. Ингулец	47.81	33.30	29.2	204.1
28	с. Лозоватка	48.06	33.29	12.7	275.1	Не ощущалось					
29	м/р им. Кирова	47.93	33.42	13.6	192.6	59	с. Новомайское	47.98	33.54	9.8	142.6
30	м/р 1-й Восточный	47.94	33.44	12.3	186.9	60	с. Шевченково	47.99	33.58	11.1	126.7
						61	с. Златополь	47.97	33.54	10.7	146.2

№	Пункт	φ° N	λ° E	Δ , км	Az°	№	Пункт	φ° N	λ° E	Δ , км	Az°
62	с. Пичугино	48.01	33.60	11.3	113.1	67	с. Львов	47.86	33.55	22.1	162.4
63	с. Зеленое Поле	48.05	33.63	12.6	89.9	68	с. Новая Заря	47.82	33.59	27.3	159.2
64	с. Терновка	48.08	33.21	18.9	280.3	69	с. Вольное	47.79	33.58	30.2	162.8
65	с. Анновка	48.24	33.46	21.1	0	70	с. Нива Трудовая	47.73	33.63	37.7	160.3
66	с. Травневое	47.86	33.50	21.3	172.0						

Примечания. В таблице приняты сокращения: п. – поселок; с. – село; м/р – микрорайон; эпицентральные расстояния и азимут рассчитаны от макросейсмического эпицентра – $\varphi_m=48.05^\circ$; $\lambda_m=33.46^\circ$.

Максимальная интенсивность сотрясений, достигавшая $I_i=6$ баллов, отмечена в северной части города на площади около $S_6=40 \text{ км}^2$ в с. Глееватка и четырех микрорайонах: «Краматоровка», «Сухая балка», «им. Ленина», «Роковатая».

Пятибалльным сейсмическим воздействиям подверглась территория от микрорайона «Алексеевка» на севере до микрорайона «Бажаново» – на юге. Площадь сотрясений составила около $S_5=130 \text{ км}^2$.

В зоне 5–6-балльных сотрясений отмечены несколько случаев повреждения дымовых труб, трещины в стенах, штукатурке. Большинство спящих респондентов проснулись (многие – от раскачивания или движения кровати), многие испугались; немногие покинули помещение. Большинство опрошенных смогли определить длительность колебаний (от 2^s до $2\text{--}3^m$), немногие – количество толчков (один или два); некоторые слышали подземный гул. Почти все отметили звон и дребезжание посуды, раскачивание предметов (как легких – люстры, сувениры, так и тяжелых – кровать, шкаф). Падали предметы (шампунь с полки, книги с полки). Выплескивалась вода из открытых сосудов («из кастрюли на 15 см вверх выплескивалась вода»). В нескольких случаях открылись дверцы шкафов, упали картинки со стен. Сильно дребезжали стекла окон и раскачивались стены здания. Отмечено беспокойство животных («кот прятался»; «из аквариума выпрыгнули рыбки»; «попугай вылетел из клетки, кот мяукал»). В единичных случаях люди перед землетрясением ощутили головокружение или плохое самочувствие.

Территория четырехбалльных воздействий охватывает примерно $S_4=550 \text{ км}^2$ и включает микрорайоны «Даманский» (северная часть обследованной территории), «Веселая дача» и «Дружба» в южной части и «Червоный Горняк» (западная часть территории), с. Неждановка (восточная часть). В зоне четырехбалльных сотрясений большинство ощутивших землетрясение находились в многоэтажных зданиях, со 2-го этажа и выше. Здесь также отмечены несколько случаев незначительных повреждений (осыпание и трещины в штукатурке). Немногие спящие проснулись (от сотрясения кровати), почти никто не испугался. Также зафиксировано раскачивание предметов, сотрясение стекол. Длительность сотрясений в чаще всего оценивается категорией «несколько секунд», «быстро» или «долго». Покидали помещение в единичных случаях.

Граница трехбалльных сотрясений достоверно установлена в южной части. На севере, востоке и западе границы зоны находятся, по-видимому, за пределами исследованной территории. Здесь, на площади около $S_3=1400 \text{ км}^2$, в основном ощущались легкие колебания. Спящие просыпались от легкого покачивания кровати. Также отмечено дребезжание посуды. Некоторые определили длительность колебаний («мгновение», «несколько секунд», «очень быстро»).

Следует отметить, что макросейсмические данные, полученные в результате заочного анкетирования, к сожалению, в некоторых случаях вызвали сомнения в достоверности приводимой информации, потому их трудно было включать в обработку. Например, на вопрос о повреждениях, часто подчеркивались все варианты ответов – осыпание побелки, штукатурки, трещины в штукатурке, трещины в углах здания, трещины в перемычках, трещины в стенах, повреждение дымовых труб; то же самое касается ответа на вопрос «в каком состоянии находились во время землетрясения?» – оказывались подчеркнутыми также все варианты ответов – находились в помещении, на улице, в спокойном состоянии, в движении.

Поскольку в районе г. Кривой Рог часто производятся промышленные взрывы, то многие респонденты отождествили это сейсмическое событие с взрывом: «не спала, читала газеты; по моему ощущению это был взрыв в шахте» (с. Глееватка); «как массивный взрыв» (микрорайон «Роковатая»); «вначале был сильный толчок, а потом раскачивание; подумали, что взрыв на шахте, хотя время неподходящее; о времени не помню». Некоторые сравнивали со взрывом на шахте, хотя «намного продолжительнее и намного сильнее. Рядом шахта Орджоникидзе»

(микрорайон «Закарпатский»); «смотрели телевизор, сидели, не поняли, – взрыв на шахте» («Божедаровка»); «один толчок; больше похоже на взрыв» («Пруды»); «впечатление, что произошел взрыв, и мебель в помещении колыхнулась» («20 квартал»).

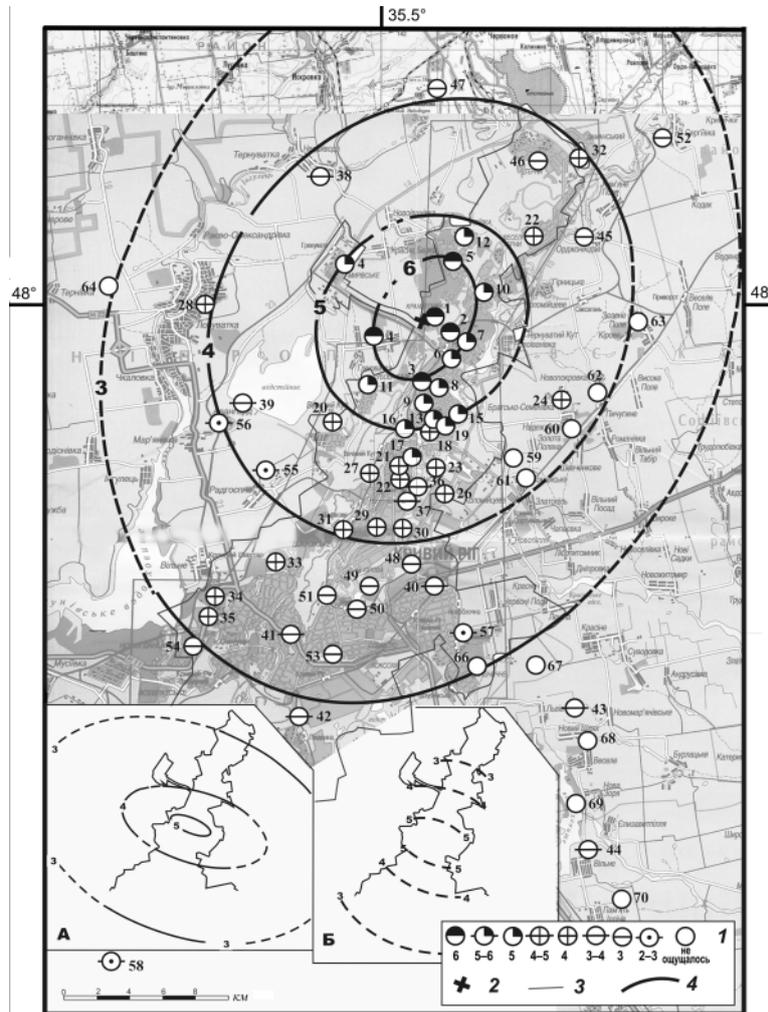


Рис. 5. Карта изосейст Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г.

1 – интенсивность сотрясений в баллах шкалы MMSK-84 (значок интенсивности соответствует центру участка, для которого рассчитывалась интенсивность); 2 – макросейсмический эпицентр; 3 – границы города Кривой Рог; 4 – изосейста. На врезках изосейсты землетрясений Криворожского-I 25.12.2007 г. (А) и Криворожского-II 14.01.2011 г. (Б).

Макросейсмический эпицентр как геометрический центр первой изосейсты имеет координаты: $\varphi_M=48.05^\circ$, $\lambda_M=33.46^\circ$. Изосейсты землетрясения имеют форму эллипсов, вытянутых в север–северо-западном направлении ($Az=23\pm 5$), что в пределах погрешности определяемых величин соответствует направлению одной из нодальных плоскостей (рис. 3). Длина большой оси высшей изосейсты с $I_i=6$ – около 8 км. По материалам макросейсмического обследования рассчитаны параметры макросейсмического поля (табл. 6).

Таблица 6. Основные параметры макросейсмического поля Криворожского- III землетрясения 23 июня 2013 г. в 21^h16^m с $K_p=11.6$, $M_{w_{per}}=4.5$

I_i , баллы	Геометрические параметры поля изосейст, км				Площадь S_i зоны, км ²
	l_a	l_b	\bar{l}	l_a/l_b	
6	8	6	6.8	1.4	37
5	14	12	13.0	1.1	133
4	29	25	26.5	1.2	553

Примечание. Среднее \bar{l} является средним геометрическим $\bar{l} = \sqrt{l_a \cdot l_b}$.

Также получены приближенные оценки глубины очага с использованием уравнений макросейсмического поля [28, с. 24]:

$$h = \sqrt{\frac{\Delta_k^4 - \Delta_l^2 \Delta_i^2}{\Delta_l^2 + \Delta_i^2 - 2\Delta_k^2}}, \quad (1)$$

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

$$b \cdot M = I_1 + v \cdot \lg(h) - c, \quad (2)$$

где $I_1=6$, $I_k=5$, $I_i=4$, $b=1.5$, $v=3.5$, $c=3.0$, Δ – средний радиус изосейсты (принято $\Delta_l=8$ км, $\Delta_k=14$ км, $\Delta_i=29$ км); h – глубина очага, M – магнитуда землетрясения.

Значения параметров очага землетрясения, рассчитанные по макросейсмическим данным с использованием формулы (1), составили в среднем: $h \sim 5.6$ км (для большой оси), $h \sim 2.2$ км (для малой оси). С использованием формулы (2) при $MSH=4.3$ (инструментальные данные в табл. 1) получено значение $h=9.6$ км. Таким образом, средняя макросейсмическая глубина очага может быть принятой $\bar{h}_m=6$ км, что отражено в табл. 1.

В последнее время на территории Кривого Рога было обследовано 3 ощутимых землетрясения: Криворожское-I – 25.12.2007 г. с $I_0=5$ баллов [1, 29], Криворожское-II – 14.01.2011 г. с $I_0=5$ баллов [2] и Криворожское-III – 23.06.2013 г. с $I_0=6$ баллов.

Обращает внимание близость координат макросейсмических эпицентров землетрясений 25.12.2007 г. и 23.06.2013 г. ($\varphi_{м, I}=48.03^\circ$, $\lambda_{м, I}=33.44^\circ$ и $\varphi_{м, III}=48.05^\circ$, $\lambda_{м, III}=33.46^\circ$ соответственно) и практически перпендикулярное расположение изосейст этих землетрясений (рис. 5, врезка А). Для землетрясения 2011 г., в связи с недостаточным объемом макросейсмической информации и неравномерном ее распределением, расположение границ зон балльности и координаты макросейсмического эпицентра землетрясения ($\varphi_{м, II}=47.98^\circ$, $\lambda_{м, II}=33.45^\circ$) носят условный характер (рис. 5, врезка Б). При этом интенсивность сотрясений при Криворожском-II землетрясении практически совпадает с интенсивностью в 2007 году.

Подводя итоги, можно констатировать, что ощутимое сейсмическое событие 23 июня 2013 г., названное Криворожским-III, по совокупности критериев относится к тектоническим землетрясениям. К таким критериям можно отнести: квадрантное распределение знаков первых движений продольных волн на станциях регистрации и надежное описание источника в виде двойного диполя; уверенную аппроксимацию амплитудных спектров объемных волн в рамках дислокационной модели Брюна; регистрацию сейсмических колебаний на большие расстояния от источника; хорошую сходимость магнитудных оценок; приуроченность очага к активным тектоническим структурам; ночное время, когда промышленные взрывы (по данным МЧС Украины) не производятся.

К настоящему времени для территории Украинского щита (района г. Кривой Рог) обратная задача по восстановлению динамических параметров очагов решена для трех ощутимых землетрясений: Криворожского-I 25.12.2007 г. с $M_w=3.7$, Криворожского-II 14.01.2011 г. с $M_{w,пер}=3.6$ и Криворожского-III 23.06.2013 г. с $M_{w,пер}=4.5$, из них для 25.12.2007 г. и 23.06.2013 г. получено решение механизма очагов.

Можно отметить некоторые общие свойства изученных землетрясений:

1. Очаги землетрясений были приурочены к верхним слоям земной коры ($h \leq 10$ км) сложной зоны сочленения разновозрастных и разнонаправленных разрывных нарушений: Криворожско-Кременчугского и Ледекинского глубинных разломов.

2. Землетрясения возникли в обстановке близгоризонтального сжатия.

3. Количественные значения динамических параметров прямо связаны с энергией землетрясений.

4. Сброс накопленных напряжений во всех случаях был одноактным. Следов предвещающих толчков (форшоков) и последующих афтершоков на записях ближайших к очагу станциях не установлено.

К отличительным особенностям можно отнести:

1. Тип подвижки в очаге 25.12.2007 г. – взбросо-сдвиг по наиболее вероятной крутопадающей плоскости разрыва, ориентированной вдоль Ледекинского разлома диагональной ориентации, а при 23.06.2013 г. – сдвига-взброс с преобладанием сдвиговой составляющей

по наиболее вероятной близвертикальной плоскости, ориентированной вдоль Кременчугско-Криворожского глубинного разлома.

2. Скольжение по разрывам только при первых двух землетрясениях (25.12.2007 г. и 14.01.2011 г.) было осложнено неравномерным распределением прочностных свойств среды, на что указывают отрицательные значения радиационного трения.

3. Ориентации изосейст землетрясений 25.12.2007 г. и 23.06.2013 г. взаимно перпендикулярны.

4. Для двух одинаковых по энергетическому уровню ($K_p=9.7$) Криворожских землетрясений (25 декабря 2007 г. [1] и 14 января 2011 г. [2]) получены близкие значения сейсмического момента M_0 ($M_0=33.8 \cdot 10^{13}$ Н·м и $M_0=29.9 \cdot 10^{13}$ Н·м), но различающиеся почти в 2 раза значения радиуса круговой дислокации: 2007 г. – $r_0=1$ км, 2011 г. – $r_0=0.57$ км. Малые значения r_0 Криворожского-II очага при близких M_0 привели к завышению в 3 и более раз остальных параметров, количественно связанных с размером разрыва.

Эти и другие особенности очагов Криворожских землетрясений связаны, возможно, с пространственными различиями прочностных свойств среды, вмещающей очаги землетрясений, и временными вариациями поля тектонических напряжений в структурах данного района.

Необходимо отметить, что регистрируемая в последнее время повышенная сейсмическая активность Криворожской горнопромышленной зоны в сочетании со сложными природно-техногенными условиями и большой концентрацией экологически опасных производств требует проведения исследований, направленных на уменьшение сейсмического риска и обеспечения безопасности проживающего в этой зоне населения. Для этого, прежде всего, необходимо создание сети непрерывного сейсмического мониторинга проводимых промышленных взрывов и естественных тектонических событий, проведение методических работ по их идентификации и «чистке» каталогов, слежение за динамикой возможной наведенной сейсмичности. Примеры идентификации сейсмических событий в горнопромышленной Криворожской зоне приведены в [30, 31]. Актуальность продолжения исследований очевидна.

Л и т е р а т у р а

1. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А., Скляр А.М. Криворожское землетрясение 25 декабря 2007 г. с $MLH=3.1$, $M_w=3.7$, $I_0=5$ баллов (Украина) // Землетрясения Северной Евразии в 2007 г. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 435–447.
2. Пустовитенко Б.Г., Бондарь М.Н., Князева В.С., Скляр А.М., Эреджепов Э.Э. Криворожское-II землетрясение 14 января 2011 г. $MS=3.6$, $M_w=3.6$, $I_0=5$ (Украина, Днепропетровская область) // Землетрясения Северной Евразии, 2011 г. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 305–313.
3. Скляр А.М., Князева В.С., Скляр А.А., Останин А.М. Макросейсмический эффект Криворожского землетрясения 23 июня 2013 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – С. 48–53.
4. Трипольский А.А., Шаров Н.В. Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. Карельский научный центр РАН, 2004. – 159 с.
5. Єнтін В.А. Геофізична основа тектонічної карти України масштабу 1:100 000 // Геофізический журнал. – 2005. – 27. – № 1. – С. 74–84.
6. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности // Геофізический журнал – 2006. – 28. – № 3. – С. 54–75.
7. Сейсмологический каталог (сеть телесеизмических станций), 2013 // ФИЦ ЕГС РАН [Сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_Catalog/2013
8. Габсатарова И.П., Кендзера А.В., Надёжка Л.И., Пигулевский П.И., Бабкова Е.А., Коломиец М.В., Пивоваров С.П. Новое сейсмическое событие в Криворожье и механизм его очага // Вестник ВГУ. – Серия: Геология. – 2013. – № 2. – июль–декабрь. – С. 134–140.
9. Сейсмологический бюллетень (сеть телесеизмических станций), 2013 // ФИЦ ЕГС РАН [Сайт]. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2013
10. International Seismological Centre, Thatcham, Berkshire, United Kingdom, 2015 [Сайт]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
11. European-Mediterranean Seismological Center. [Сайт]. – URL: <http://www.emsc-csem.org/Earthquake/seismologist.php/>

12. **Козиненко Н.М.** Подробные данные о землетрясении 23 июня 2013 г. в районе Кривого Рога (Днепропетровская область) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – С. 44–47.
13. **Красилов С.А., Коломнец М.В., Акимов А.П.** Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77–83.
14. **Кульчицкий В.Е.** Программа расчета координат гипоцентров землетрясений (ГИРО-08) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2008 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. – С. 28–32.
15. **Раутиан Т.Г.** Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – Москва: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
16. **Введенская А.В.** Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокации. – М.: Наука, 1969. – 260 с.
17. **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.
18. **Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Мерзей Е.А.** Процессы в очаговой зоне Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г. (Украина) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г. – Севастополь: НПЦ ЭКОСИ – «Гидрофизика», 2014 г. – С. 54–60.
19. **Пустовитенко Б.Г. (отв. сост.).** Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2013 г. // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – Приложение на CD_ROM.
20. **Stein S. and Wysession M.** An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure // Blackwell Publishing, Oxford. – 2003. – 498 p.
21. **Brune I.V.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – **75**. – № 26. – P. 4997–5009.
22. **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.
23. **Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
24. **Костров Б.В.** Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
25. **Hanks T.C., Kanamori H.** A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**. – № 35. – P. 2348–2350.
26. **Строение земной коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы (Глава VII).** Киев: Наукова думка, 1978. – С. 136–147.
27. **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. 78–96.
28. **Новый каталог** сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
29. **Скляр А.М., Князева В.С., Останин А.М.** Макросейсмический эффект Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2007 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – С. 14–16.
30. **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.
31. **Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Кульчицкий В.Е.** Проблемы идентификации тектонических и техногенных сейсмических событий в горнопромышленных районах Украины (на примере г. Кривой Рог) // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво), вип. 73. – Київ: ДП НДІБК, 2010. – С. 307–315.

METADATA IN ENGLISH

KRIVOY ROG-III EARTHQUAKE on June 23, 2013**with $K_p=11.6$, $M_{w_{reg}}=4.5$, $I_0=6$ (Ukraine, Dnipropetrovsk region)****B.G. Pustovitenko, A.M. Sklyar, V.S. Knyazev, N.M. Kozinenko, A.A. Sklar***Institute of Seismology and Geodynamics, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, bpustovitenko@mail.ru*

Abstract. On June 23, 2013, on the platform territory of Ukraine near Krivoy Rog (Dnipropetrovsk region) there was a noticeable earthquake with intensity in the epicenter zone $I_0=6$. The quake originated in the upper part of the earth's crust of the large Dnieper block of the Ukrainian shield under the action of horizontal forces of compression and has been confined to the complex area of the junction of Krivoy Rog-Kremenchug and Ledekinskiy deep faults. The type of movement in the source is a strike-slip with upthrust components. The most likely plane of rupture is of the North–North-East direction oriented along the Krivoy Rog-Kremenchug fault. The major axis of the first isoseist is elongated in the same direction. In terms of energy characteristics ($K_p=11.6$, $M_{w_{reg}}=4.5$) and macroseismic effect ($I_0=6$), this seismic event is one of the strongest for the period of instrumental observations. By the spectra of records of volumetric seismic waves at the four stations of the Crimea, the dynamic parameters of the source have been restored using the Brune dislocation model. Detailed instrumental and macroseismic data are given. The comparison of the obtained parameters with similar parameters for other Krivoy Rog earthquakes has been given.

Keywords: earthquake hypocenter, isoseists, focal mechanism, focal dynamic parameters, deep fault.

DOI: 10.35540/1818-6254.2019.22.37

For citation: Pustovitenko, B.G., Sklyar, A.M., Knyazev, V.S., Kozinenko, N.M., & Sklar, A.A. (2019). Krivoy Rog-III earthquake June 23, 2013 with $K_p=11.6$, $M_{w_{per}}=4.5$, $I_0=6$ (Ukraine, Dnipropetrovsk region). *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22 (2013), 421–434. (In Russ.). doi: 10.35540/1818-6254.2019.22.37

References

1. Pustovitenko, B.G., Kul'chitskij, V.E., Pustovitenko, A.A., & Sklyar, A.M. (2013). [Krivoy Rog earthquake on December 25, 2007 with $MLH=3.1$, $M_w=3.7$, $I_0=5$ points (Ukraine)]. In *Zemletriaseniia Severnoj Evrazii v 2007 g.* [Earthquakes in Northern Eurasia, 2007] (pp. 435–447). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
2. Pustovitenko, B.G., Bondar', M.N., Knyazeva, V.S., Sklyar, A.M., & Eredzhepov, E.E. (2011). [Krivoy Rog-II earthquake January 14, 2011 $MS=3.6$, $M_w=3.6$, $I_0=5$ (Ukraine, Dnipropetrovsk region)]. In *Zemletriaseniia Severnoj Evrazii, 2011 g.* [Earthquakes of the North Eurasia, 2011] (pp. 305–313). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
3. Sklyar, A.M., Knyazeva, V.S., Sklyar, A.A., & Ostanin, A.M. (2014). [The macroseismic effect of the Krivoy Rog earthquake on June 23, 2013]. In *Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 god.* [Ukraine seismological bulletin for 2013] (pp. 48–53). Sevastopol: NPC "ECOSY-Hydrophysics" Publ. (In Russ.).
4. Tripol'skij, A.A., & Sharov, N.V. (2004). *Litosfera dokembrijskih shchitov severnogo polushariya Zemli po sejsmicheskim dannym.* [Lithosphere of Precambrian shields of the Northern hemisphere according to seismic data]. Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS Publ., 159 p.
5. Entin, V.A. (2005). [Geophysical basis of 1:100 000 scale of tectonic maps of Ukraine]. *Geofizicheskij zhurnal.* [Geophysical Journal], 27 (1), 74–84. (In Ukr.).
6. Pustovitenko, B.G., Kul'chitskij, V.E., & Pustovitenko, A.A. (2006). [New maps of General seismic zoning of the territory of Ukraine. Features of the long-term seismic hazard mode]. *Geofizicheskij zhurnal.* [Geophysical Journal], 28 (3), 54–75. (In Russ.).
7. GS RAS, Catalogues of Teleseismic Stations. (2019). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_Catalog/2013
8. Gabsatarova, I.P., Kendzera, A.V., Nadyozhka, L.I., Pigulevskij, P.I., Babkova, E.A., Kolomic, M.V., & Pivovarov, S.P. (2013). [A new seismic event in krivorozhie and the mechanism of its source]. *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya* [Bulletin of VSU. Series: Geology], 2, 134–140. (In Russ.).

9. GS RAS, Bulletin of Teleseismic Stations. (2019). Retrieved from ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2013/
10. International Seismological Centre. (2019). On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>
11. European-Mediterranean Seismological Center. (2019). Retrieved from <http://www.emsc-csem.org/Earthquake/seismologist.php/>
12. Kozinenko, N.M. (2014). [Detailed data of the earthquake near Krivoy Rog (Dnipropetrovsk region) on June 23, 2013]. In *Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 god* [Ukraine seismological bulletin for 2013] (pp. 44–47). Sevastopol: NPC “ECOSY-Hydrophysics” Publ. (In Russ.).
13. Krasyllov, S.A., Kolomic, M.V., & Akimov, A.P. (2006). [Organization of digital seismic data processing using the WSG software]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretacii seismologicheskikh dannyh. Materialy mezhdunarodnoj seismologicheskoi shkoly, posvyaschennoj 100-letiyu otkrytiya seismicheskikh stantsij “Pulkovo” i “Ekaterinburg”* [Modern methods of processing and interpreting seismological data. Materials of the international seismological school dedicated to the 100th anniversary of the opening of the seismic stations “Pulkovo” and “Yekaterinburg”] (pp. 77–83). Obninsk: GS RAS Publ. (In Russ.).
14. Kul'chitskij, V.E. (2010). [Program for calculating the coordinates of earthquake hypocenters (GIPO-08)]. In *Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2008 god* [Ukraine seismological bulletin for 2008] (pp. 28–32). Sevastopol: NPC “ECOSY-Hydrophysics” Publ. (In Russ.).
15. Rautyan, T.G. (1960). [Earthquake energy]. *Trudy IFZ AN SSSR* [Proceedings of the IPF of the USSR Academy of Sciences], 9 (176), 75–114. (In Russ.).
16. Vvedenskaya, A.V. (1969). *Issledovanie napryazhenij i razryvov v ochagah zemletryasenij pri pomoshchi teorii dislokacii* [Study of stresses and ruptures in earthquake sources using dislocation theory]. Moscow: Nauka Publ., 260 p.
17. Balakina, L.A., Vvedenskaya, A.V., Golubeva, N.V., Misharina, L.A., & Shirokova, E.I. (1972). *Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij* [The elastic stress field of the Earth and the mechanism of earthquake sources]. Moscow: Nauka Publ., 198 p.
18. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., & Merzhej, E.A. (2014). [Processes in the focal zone of Krivoy Rog-III earthquake on June 23, 2013 (Ukraine)]. In *Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 g* [Ukraine seismological bulletin for 2013] (pp. 54–60). Sevastopol: NPC “ECOSY-Hydrophysics” Publ. (In Russ.).
19. Pustovitenko, B.G. (2019). Catalogue of mechanisms of earthquake sources of the Crimean-Black Sea region for 2013. *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia], 22(2013), Appendix on CD. (In Russ.).
20. Stein, S., & Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.
21. Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75 (26), 4997–5009.
22. Aptekman, Zh.Ya., Belavina, Yu.F., Zakharova, A.Y., Zobin, V.M., Kogan, S.Ya., Korchagina, O.A., Moskvina, A.G., Polikarpova, L.A., & Chepkunas, L.S. (1989). [P-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. Transition from station spectrum to focal and calculation of dynamic parameters of the source]. *Vulkanologiya i seismologiya*. [Journal of Volcanology and Seismology], 2, 66–79. (In Russ.).
23. Pustovitenko, B.G., Panteleeva, T.A. (1990). *Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma*. [Crimea earthquakes Spectral and focal parameters]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 251 p.
24. Kostrov, B.V. (1975). *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya*. [Source Mechanics of tectonic earthquake]. Moscow: Nauka Publ., 179 p.
25. Hanks, T., & Kanamori, H. (1979). A magnitude moment scale. *J. geophys. Res.*, 84, 2348-2351.
26. *Stroenie zemnoj kory i verhnej mantii Central'noj i Vostochnoj Evropy (Glava VII)*. [The crust and upper mantle structure of Central and Eastern Europe (Chapter VII)] (1978). Kiev: Naukova Dumka Publ. (In Ukr.).
27. Ershov, Y.A., & Shebalin, N.V. (1984). [The issue of the design of the scale of intensity of earthquakes from the viewpoint of seismologists]. *Prognoz seismicheskikh vozdeystvij. Voprosy inzhenernoj seismologii* [Seismic impact prediction. Engineering seismology issues], 25, 78–96. (In Russ.).

-
28. Kondorskaya, N.V., & Shebalin, N.V. (1977). *New Catalog of Strong Earthquakes in the Territory of the USSR from Ancient Times to 1975*. Academy of Sciences, Moscow (English translation, updated through 1977, available as Report SE-31, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Boulder, CO, 606 pp.).
 29. Sklyar, A.M., Knyazeva, V.S., & Ostanin, A.M. (2009). [Macroseismic effect of Krivoy Rog earthquake on December 25, 2007]. *Seismologicheskij byulleten' Ukrainy za 2007 god* [Ukraine seismological bulletin for 2007] (pp. 14–16). Sevastopol: NPC “ECOSY-Hydrophysics” Publ. (In Russ.).
 30. Pustovitenko, B.G., Kul'chitskij, V.E., Pustovitenko, A.A., & Sklyar, A.M. (2010). [Instrumental and macroseismic data on processes in the focal zone of the Krivoy Rog earthquake on December 25, 2007]. *Geofizicheskyj zhurnal*. [Geophysical Journal], 32 (2), 75–97. (In Russ.).
 31. Pustovitenko, B.G., Pustovitenko, A.A., & Kul'chitskij, V.E. (2010). [Problems of tectonic and technogenic seismic events identification in mining regions of Ukraine (on the example of Krivoy Rog)]. In *Budivel'ni konstrukcii: Mizhvidomchij nauково-tekhnichnij zbirnik naukovih prac' (budivnictvo)* [Building structures: Interdepartmental scientific and technical collection of scientific papers (construction)] (pp. 307–315). Kiev: SE SRIBC Publ. (In Russ.).