

ОСОБЕННОСТИ И ОБЩИЕ СВОЙСТВА ОЩУТИМЫХ КРИВОРОЖСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Пустовитенко Б.Г., Скляр А.А., Скляр А.М.

Институт сейсмологии и геодинамики КФУ им. В.И. Вернадского
г. Симферополь

АННОТАЦИЯ: Розглянуто результати порівняння параметрів відчутних підземних поштовхів 25.12.2007 і 23.06 2013р, що відбулися в районі м. Кривий Ріг. Землетруси вбросо-зсувного типу виникли під дією горизонтальних сил стиснення. Відзначено відмінності в орієнтації ізосейстами, площин зрушення і величин скинутих напружень.

АННОТАЦИЯ: Рассмотрены результаты сравнения параметров ощутимых подземных толчков 25.12.2007г и 23.06 2013г, произошедших в районе г. Кривой Рог. Землетрясения вбросо-сдвигового типа возникли под действием горизонтальных сил сжатия. Отмечены различия в ориентации изосейст, плоскостей подвижки и величин сброшенных напряжений.

ABSTRACT: The results of comparison of perceptible shocks parameters that occurred near Krivoy Rog on 25.12.2007 and 23.06.2013 have been considered. Earthquakes of fault displacement type arose under the action of horizontal forces of compression. Differences in the orientation of the isoseismals, planes of movement and the values of stress release have been registered.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интенсивность, изосейсты, механизм очага, динамические параметры

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На Украинском кристаллическом щите в районе г. Кривой Рог производятся крупные промышленные взрывы для добычи полезных ископаемых. Под действием взрывов происходит изменение естественного напряженно-деформированного состояния горных пород, приводящего к

сбросу накопленной в зонах тектонических нарушений энергии в виде землетрясений. За последние 7 лет в этом районе произошло три ощутимых землетрясения с интенсивностью в эпицентральной зоне $I=5...6$ баллов [1-3]. В статье дан сравнительный анализ наиболее сильных и всесторонне изученных сейсмических событий 25.12.2007 и 23.06 2013гг.

МЕТОДИКА

Изучение основных и очаговых параметров землетрясений выполнено по записям сейсмических станций, расположенных на эпицентральных расстояниях до 16000 км [4]. Решение механизмов очагов получено на основе теории дислокации по стандартной методике [5]. Динамические параметры очагов восстановлены с использованием дислокационной модели Брюна [6] по амплитудным спектрам записей объемных волн на сейсмических станциях Крыма. Переход от станционного к очаговому спектру осуществлялось по методике [7, 8]. Макросейсмическое обследование проведено методом анкетирования и маршрутного обследования территории осязаемости [1-3]. Обработка выполнена по средней степени реакции d объекта «человек в нормальном состоянии» в соответствии с признаками шкалы *MMSK-84* [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные параметры землетрясений получены в нескольких международных центрах [4]. За окончательные приняты решения, полученные в Крыму по записям объемных P - и S -волн на близких эпицентральных расстояниях, что обеспечивает более точную фиксацию гипоцентров. Параметры по инструментальным и макросейсмическим данным оказались близкими, особенно для магнитуд по поверхностным волнам (M_{SH}) и уравнению макросейсмического поля M^* (табл. 1). Оба очага относятся к верхней части земной коры с близкими координатами.

Таблица 1

Основные параметры исследованных землетрясений

Дата	Время в очаге, t_0	Координаты эпицентра		Глубина очага, h , км	M_w , (M_{SH}) M^*
	ч мин с	$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ E$		
25 12 2007	04 09 34.8	47,99	33,54	10±3	3,7(3,2)
25 12 2007**	04 09	48,03	33,44	6,3	3,1
23 06 2013	21 16 34.0	47,87	33,47	0-9	4,4(4,3)
23 06 2013**	21 16	48,05	33,46	9,7	4,3

** - макросейсмические параметры

Решение механизма очагов получено в виде двойного диполя при всех согласованных знаках первых движений волн сжатия и разряжения на станциях (рис.1) [1, 10].

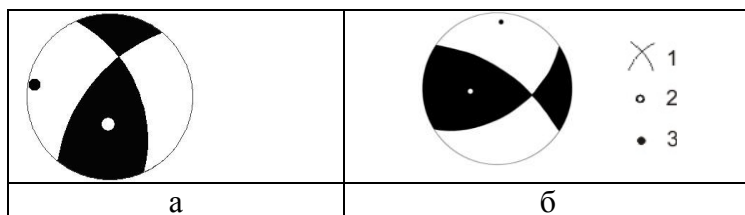


Рис. 1. Стереогаммы механизма очага (нижняя полусфера) землетрясений: а–25 декабря 2007г; б– 23 июля 2013г; 1 – нодальные линии; 2, 3 – оси главных напряжений растяжения (T) и сжатия (P) соответственно.

Как видно из рис. 1, оба землетрясения произошли под действием горизонтальных сжимающих напряжений ($PL=5^\circ$ и 7°), ориентированных соответственно близширотно и меридионально ($AZ=279^\circ$ и 4°). Тип подвижки в очагах – всбросо-сдвиг с преобладанием сдвиговой составляющей подвижки над всбросовой (табл. 2).

Таблица 2

Параметры механизма очагов землетрясений

№	Дата, д м г	M_w	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
			T		N		P		$NP1$			$NP2$		
			PL	AZ	PL	AZ	PL	AZ	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
1	25 12 2007	3.7	52	183	38	12	5	279	336	52	39	219	60	135
2	23 06 2013	4.4	50	265	39	100	7	4	304	63	135	59	51	36

В обоих решениях одна из нодальных плоскостей $NP1$ с азимутом простирания $STK = 336^\circ$ и 304° и с крутым падением ($DP=52^\circ$ и 63°) близка к направлению простирания Ледекинского разлома [11]. Можно предположить, что по данным плоскостям произошла главная подвижка, связанная с тектоническим нарушением близдиагонального ЮВ-СЗ направления. Вторые нодальные плоскости $NP2$ ориентированы в юго-юго-западном направлении ($STK = 219^\circ$) и северо-восточном ($STK = 59^\circ$), близком к простиранию Криворожско-Кременчугского глубинного разлома [11].

Макросейсмические поля рассматриваемых событий различны по форме и ориентации: изосейсты почти перпендикулярны друг другу, соотношения полуосей эллипсов отличаются в 2 раза (рис. 2).

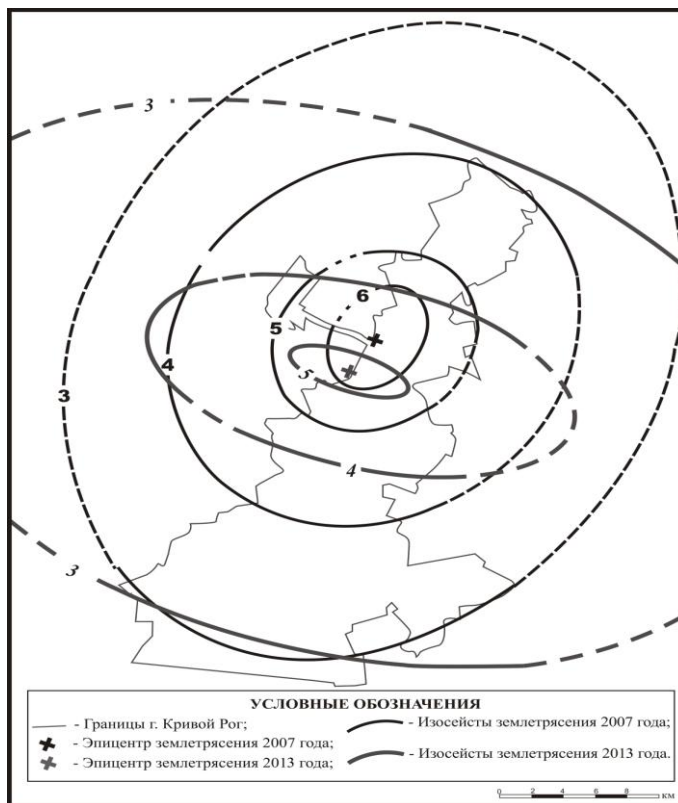


Рис. 2. Карта изосейст землетрясений 25.12.2005 и 23.06.2013г.
Цифры на изолиниях - интенсивность в баллах.

Макросейсмические и инструментальные эпицентры 25.12.2005 и 23.06.2013г были разнесены соответственно на 9км и 18км (табл. 1).

Динамические параметры очагов: 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, u – средняя подвижка по разрыву, моментная магнитуда M_w рассчитаны с учетом решения механизма очага [1, 10]. В табл. 3 приведены средние значения динамических параметров по группе станций.

Основные очаговые параметры: M_0 , r_0 , ε , u , M_w более сильного землетрясения 23.06.2013 г. значительно больше, а сброшенное и кажущееся напряжения – меньше таковых, чем для более слабого события 25.12.2007.

Таблица 3

Динамические параметры очагов землетрясений

Дата	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$u \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па	M_w
25.12.2007	33,8	1,0	15,0	5,0	0,366	17,7	-8,0	3,7
23.06.2013	442	1,31	8,7	28,9	2,68	4,86	-2,29	4,4

В обоих случаях радиационное трение получилось отрицательным, что связано со сложным скольжением по разрывам. В целом значения очаговых параметров рассмотренных событий соответствуют таковым для региональных землетрясений эквивалентного энергетического уровня [7].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. ВЫВОДЫ

Ощутимые сейсмические события 25.12.2007 г. и 23.06.2013 г. по совокупности критериев можно уверенно отнести к **тектоническим** землетрясениям. К таким критериям относятся: квадрантное распределение знаков первых движений продольных волн на станциях регистрации и надежное описание источника в виде двойного диполя; уверенная аппроксимация амплитудных спектров в рамках дислокационной модели Брюна; хорошая сходимостъ магнитудных оценок; приуроченность очагов к активным тектоническим структурам.

Проведенное сравнение позволяет отметить **общие свойства**: очаги обоих землетрясений были приурочены к верхним слоям земной коры ($h < 10$ км) сложной зоны сочленения разновозрастных и разнонаправленных разрывных нарушений: близмеридианального Криворожско-Кременчугского и диагонального Ледекинского [11]; землетрясения возникли в обстановке близгоризонтального сжатия; тип подвижки в очагах – взбросо-сдвиг по наиболее вероятной крутопадающей плоскости разрыва; скольжение по разрывам было осложнено неравномерным распределением прочностных свойств среды, на что указывают отрицательные значения радиационного трения; сброс накопленных напряжений в обоих случаях был одноактным. Следов предваряющих

толчков (форшоков) и последующих афтершоков на записях сейсмостанций не установлено.

Можно отметить и некоторые **различия**: во время относительно слабого землетрясения 25.12.2007г. сброшенные и кажущиеся напряжения были больше, чем при более сильном – 23.06.2013г; оси сжимающих напряжений в первом случае были направлены близширотно, а во втором – меридионально; оси высших изосейст 25.12.2007 г. ориентированы вдоль Ледекинского разлома, а 23.06.2013 г. – вдоль Криворожско-Кременчугского. Вероятно, эти различия связаны с перестройкой поля тектонических напряжений под воздействием взрывов, приводящих к активизации разнонаправленных тектонических структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструментальные и макросейсмические данные о процессах в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. / [Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А., Скляр А.М.] // Геофиз. журн. – 2010. – Т.32, №2. – С. 75–97.
2. Сейсмологический бюллетень Украины за 2011 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. – С. 59–61.
3. Макросейсмический эффект Криворожского землетрясения 23 июня 2013 г. / [Скляр А.М., Князева В.С., Скляр А.А., Останин А.М.] // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – С. 48-53
4. International Seismological Centre. On-line Bulletin. <http://www.isc.ac.uk/bull>. ISC. - Thatcham, United Kingdom, 2013.
5. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений / [Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В. и др.]. – М.: Наука, 1972. – 198 с.
6. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes / Brune I.V. // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol.75, № 26. – P. 4997–5009.
7. Пустовитенко Б.Г. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма / Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. – К.: Наукова думка, 1990. – 251 с.
8. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага / [Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И. и др.] // Вулканология и сейсмология. – 1989.– № 2. – С. 66–79.
9. Ершов И.А. Проблема конструкции шкалы интенсивности землетрясений с позиций сейсмологов / Ершов И.А., Шебалин Н.В. // Прогноз сейсмических воздействий. Вопросы инженерной сейсмологии. – М.: Наука, 1984. - Вып. 25. – С. 78–96.

10. Пустовитенко Б.Г. Процессы в очаговой зоне Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г. (Украина) Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г. / Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Мерзей Е.А. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ - Гидрофизика», 2014. – С. 54 – 60.
11. Єнтін В.А. Геофізична основа Тектонічної карти України масштабу 1 : 100000 / Єнтін В.А. // Геофіз. журн. – 2005. – Т.27, №1. – С.74–84.

REFERENCES

1. Instrumental and macroseismic data on processes in the focal zone of the Krivoy Rog earthquake of 25 December 2007 / [Pustovitenko B.G., Kulchitsky V.E., Pustovitenko A.A., Sklar A.M.] // Geophysical Journal. – 2010. – Vol. 32, No.2. – P. 75-97.
2. Seismological Bulletin of Ukraine for 2011. – Sevastopol: SPC "ECO-Hydrophysics", 2012. – P. 59-61.
3. Macroseismic effect of Krivoy Rog earthquake on June 23, 2013 / [Sklar, A.M., Knyazeva V.S., Sklyar A.A., Ostanin A.M.] // Seismological Bulletin of Ukraine for the year 2013. – Sevastopol: SPC "ECO-Hydrophysics", 2014. – P. 48-53.
4. International Seismological Centre. On-line Bulletin. <http://www.isc.ac.uk/bull>. ISC. - Thatcham, United Kingdom, 2013.
5. Field of elastic stresses of the Earth and earthquake focal mechanism / [Balakina L.A., Vvedenskaya A.V., Golubeva N.V. and oth.]. – M.: Nauka, 1972. – 198 p.
6. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes / Brune I.V. // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol.75, № 26. – P. 4997–5009.
7. Pustovitenko B.G. Spectral and focal parameters of Crimean earthquakes / Pustovitenko B.G. Panteleyeva T.A. – K.: Naukova Dumka, – 1990. – 251 p.
8. Spectra of P waves in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. The transition from the station spectrum to the focal one and the calculation of source dynamic parameters / [Aptekman Zh. Ya., Belavina, Yu. F., Zakharova A. I., and oth.] // Volcanology and seismology. – 1989. – No.2. – P. 66-79.
9. Ershov I.A. The issue of the design of the scale of earthquake intensity from the standpoint seismologists / Ershov I.A., Shebalin N.V. // Forecast of seismic effects. Problems of engineering seismology, Vol. 25. – M.: Nauka, 1984. – P.78–96.
10. Pustovitenko B.G. Processes in the focal zone of the Krivoy Rog-III earthquake on 23 June 2013 (Ukraine) Seismological Bulletin of Ukraine for 2013 / Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Merzhey E.A. – Sevastopol: SPC ECO - "Hydrophysics", 2014. – P. 54-60.
11. Entin V.A. Geophysical framework of the Tectonic map of Ukraine to scale 1:100 000 /Entin V.A.// Geophysical Journal. – 2005.–Vol. 27, No. 1. – P. 74-84.

Статья поступила в редакцию 27.07.2015 г.