

III. СИЛЬНЫЕ И ОЩУТИМЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

УДК 550.348. (477)

КРИВОРОЖСКОЕ-II ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 14 января 2011 г.

с $MS=3.6$, $Mw=3.6$, $I_0=5$ (Украина, Днепропетровская область)

Б.Г. Пустовитенко, М.Н. Бондарь, В.С. Князева, А.М. Скляр, Э.Э. Эреджепов

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

14 января 2011 г. в 05^h03^m на платформенной территории Украины в районе крупного горнопромышленного центра г. Кривой Рог произошло второе за последние 10 лет ощутимое землетрясение (Криворожское-II) с интенсивностью в эпицентральной зоне $I=5$ баллов [1]. Его очаг был приурочен к верхней части земной коры ($h \leq 10$ км) зоны сочленения Криворожско-Кременчугского глубинного разлома субмеридионального направления с Ледекинским разломом, пересекающим его в диагональном направлении с юго-востока на северо-запад [2]. В соответствии с комплектом карт общего сейсмического районирования территории Украины (ОСР-2004) [3], в районе произошедшего землетрясения возможны сейсмические воздействия I с вероятностью P непревышения расчетной интенсивности в ближайшие 50 лет, соответственно: $I=5$ баллов, $P=90\%$; $I=6$ баллов – $P=95\%$; $I=7$ баллов – $P=99\%$. Наблюдаемые сейсмические воздействия от Криворожского-II землетрясения 14 января 2011 г. с интенсивностью в эпицентральной зоне $I=5$ баллов не превысили порог прогнозных значений.

В первые дни после появления сообщений о сейсмических сотрясениях 14 января 2011 г. возникли сомнения в естественной тектонической природе источника колебаний, поскольку в это же время на шахте им. Орджоникидзе на северо-восточной окраине г. Кривой Рог был произведен плановый промышленный взрыв с общей массой взрывчатки 4 760 кг, по данным Криворожского территориального управления Госгорпромнадзора. По этой причине были упущены возможности оперативного детального обследования макросейсмических проявлений. При дальнейшем изучении инструментальных и макросейсмических данных предпочтение отдано версии о тектонической природе землетрясения, спусковым механизмом которого послужил упомянутый выше относительно слабый предшествующий промышленный взрыв.

Инструментальные данные. Криворожское-II землетрясение инструментально зарегистрировано 74 станциями мировой сейсмологической сети на эпицентральных расстояниях от 129 до 7500 км в достаточно широком азимутальном окружении (рис. 1).

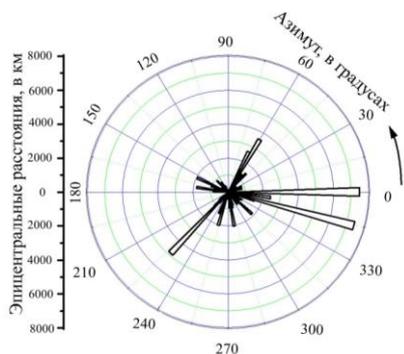


Рис. 1. Полярная диаграмма азимутов и эпицентральных расстояний для сейсмических станций, зарегистрировавших Криворожское-II землетрясение 14 января 2011 г.

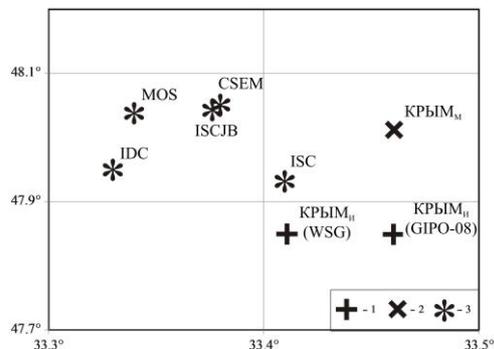


Рис. 2. Разные решения эпицентра землетрясения 14 января 2011 г.

1, 2 – инструментальный и макросейсмический эпицентр по региональным данным; 3 – данные различных сейсмологических служб.

В рамках подготовки данной статьи повторно проведено решение параметров гипоцентра двумя методами WSG [4] и GIPO-08 [5] с использованием уточненных фаз, опубликованных в [6].

Основные параметры сейсмического события по данным различных мировых агентств, включая Крым, представлены в табл. 1, а местоположение эпицентров – на рис. 2.

Таблица 1. Основные параметры Криворожское-II землетрясения 14 января 2011 г. по данным Крыма и других сейсмологических агентств

Агентство	t_0 , ч мин с	δt_0 , с	Гипоцентр					Магнитуда	Источник
			φ°, N	$\Delta \varphi^\circ$	λ°, E	$\delta \lambda^\circ$	h , км		
Крым, WSG	05 03 14.7	1.2	47.85	0.11	33.41	0.05	5	$K_p=9.7/6$, $m_b=3.2/6$, $MSH=3.4/6$, $MS=3.6/6$, $Md=3.3/6$, $Mc=3.6$, $Mw=3.6$	наст. статья
Крым, GIPO-08	05 03 14.9	1.0	47.85	0.08	33.46	0.08	5	$Mw=3.6$	наст. статья
Макросейсмика	05 03		47.98		33.45		(9)		наст. статья
ISCJB	05 03 11.7	0.25	48.05	0.03	33.38	0.02	10f		[7]
IDC	05 03 13.0	0.64	47.95	0.10	33.33	0.08	0f	$m_b=3.7/6$, $m_b1=3.8/11$, $m_b1mx=3.5/43$, $m_btmp=3.6/11$, $ML=3.3/6$	[7]
MOS	05 03 14.3	1.56	48.04	0.07	33.45	0.05	24	$m_b=4.0/5$	[8]
CSEM	05 03 16.3	0.17	48.05	0.05	33.38	0.04	30	$m_b=3.9/5$	[7]
ISC	05 03 13.4	0.54	47.93	0.05	33.41	0.04	10f	$m_b=3.8/7$	[7]

Примечание. f – фиксированная глубина.

Координаты эпицентра, по данным сейсмологических центров, близки между собой. Их средние значения вместе с данными Крыма составляют $\varphi = 47.96^\circ \pm 0.07^\circ N$ и $\lambda = 33.41^\circ \pm 0.05^\circ E$. Наименьший эллипс ошибок ($a=3.3$ км, $b=2.7$ км) получен решением в Международном сейсмологическом центре ISCJB по данным 72 станций [7]. Глубина очага варьирует от 0 до 30 км (табл. 1), что говорит о его расположении в пределах земной коры. В пространстве инструментальные эпицентры, по данным агентств и Крымской сети, представляют собой вытянутую с северо-запада на юго-восток область с диапазоном разброса значений координат: по широте – около 0.2° , по долготе – 0.13° (рис. 2).

В сводной обработке Крыма были использованы данные ближайших сейсмических станций Украины, Молдовы, Румынии, России в диапазоне эпицентральных расстояний от 129 до 575 км.

Для всех Криворожских сейсмических событий, регистрируемых Крымской сетью, характерна сложная волновая картина. Слабые записи частых промышленных взрывов юга Украины имеют вид размытой шумовой картины длительностью около двух минут и наличием поверхностной волны. События, которые отнесены к тектоническим землетрясениям в данном районе, например, землетрясения 25 декабря 2007 г. [9] и 14 января 2011 г., имели более четкие вступления P -волны и большие амплитуды коровых каналов волн Lg (рис. 3). Выделение поперечной S -волны для отдельных станций оказалось недостаточно уверенным с индексом «е» [6].

Полученные два инструментальных решения эпицентра Крым (WSG) и Крым (GIPO-08) имеют между собой близкие координаты, отличающиеся на 0.05° только по долготе. Оба инструментальных эпицентра расположены южнее зоны максимальной макросейсмической интенсивности (рис. 4). Наименьшие невязки времен пробега сейсмических волн и погрешности в определении координатах гипоцентра получены по программе GIPO-08, которая использует региональные годографы [10] и годографы для головных волн [11]. В связи с этим итоговым решением Крымской сети для Криворожского-II землетрясения 14 января 2011 г. являются параметры: $\varphi = 47.85^\circ \pm 0.08^\circ N$, $\lambda = 33.46^\circ \pm 0.08^\circ E$, $h=5$ км, время в очаге $t_0=05^h03^m14.9^s$.

Для Криворожского-II землетрясения определены основные типы магнитуд: m_b , MS , ML , Md , MSH , Mc , Mw (табл. 1). Хорошей сходимостью результатов характеризуются значения m_b по объемным волнам по данным обработки всех центров – $m_b=3.8 \pm 0.1$. Исключение составляет низкое значение данного типа магнитуд по записям цифровых станций Крыма – $m_b=3.2$. Причина этого в настоящее время изучается. С учетом значений m_b по сети станций Крыма разброс в оценке m_b возрос в 2 раза: $m_b=3.6 \pm 0.2$. Оценка энергетического класса землетрясения $K_p=9.7$ выполнена по шкале Т.Г. Раутиан [12] по записям только сети станций Крыма. Сейсмический момент M_0 и соответственно магнитуда $Mw=3.6$ надежно определены по амплитудным спектрам записей объемных волн на сейсмических станциях Крыма (см. ниже табл. 3).

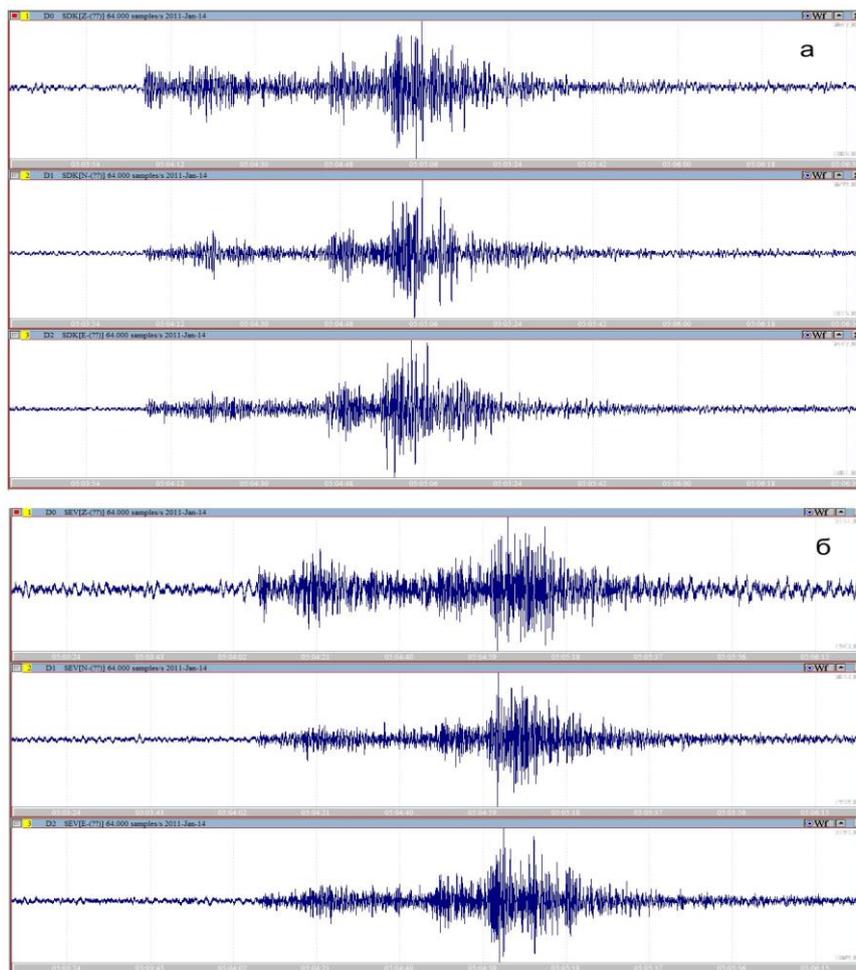


Рис. 3. Примеры сейсмограмм Криворожского-II землетрясения 14 января 2011 г. на цифровых станциях «Судак» (а) и «Севастополь» (б) по компонентам записи Z, N-S, E-W сверху вниз соответственно

В связи с полученными надежными инструментальными данными об энергетических характеристиках рассматриваемого события встает вопрос об их соответствии слабому взрыву 14.01.2011 г. общей массой взрывчатого вещества 4.76 тонн. Обратимся к известной работе [13]. Авторы этой статьи обобщили большой материал по взрывам, в том числе по району Кривого Рога. Ими получена прямая зависимость энергетического класса K_p и магнитуды m_b от массы взрывов V (в тоннах), предельный контур которой представлен в виде уравнений:

$$K_p(V)_{\max} = 7 + \lg V \quad (1)$$

$$m_b(V)_{\max} = 2.45 + 0.73 \lg V. \quad (2)$$

При этом отмечено, что значения K_p и m_b взрывов Кривого Рога дают заниженные оценки на $\delta K_p=3.3$ и $\delta m_b=1.5-1.7$ относительно указанных зависимостей. Таким образом, используя уравнения (1) и (2) для проведенного взрыва 14.01.2011 г. на шахте им. Орджоникидзе массой $V=4.76$ тонн, получим предельные значения $K_p=8$ и $m_b=2.9$, что почти на 2 порядка ниже реальных определений. Если учесть поправки для Кривого Рога δK_p и δm_b , то расчетные значения составят соответственно $K_p=4.7$ и $m_b=1.3$. Очевидно, что сейсмические события такого энергетического уровня не могли быть зарегистрированы на эпицентральных расстояниях до $\Delta=7500$ км и вызвать макросейсмический эффект с $I_0=5$ баллов. Вполне вероятно, что данный промышленный взрыв явился лишь спусковым механизмом для разрядки напряжений в сеймотектонических структурах Криворожско-Кременчугской раннепротерозойской геосинклинальной системы Украинского щита [14].

Макросейсмические данные. С наибольшей интенсивностью землетрясение ощущалось в городе Кривой Рог, для которого характерна значительная вытянутость в северном направлении (протяженность города с севера на юг составляет 35 км), а также своеобразная застройка

с компактно расположенными современными микрорайонами. Такие микрорайоны, как Заречный, Солнечный, Восточный и др., застроены, в основном, многоэтажными зданиями, а в селах и пришахтных поселках (Лозоватка, Глееватка, Красная Балка и др.) преобладают одно-двухэтажные каменные здания.

В связи с невозможностью оперативной организации экспедиции для сбора макросейсмической информации, Отдел сейсмологии ИГФ (теперь Институт сейсмологии и геодинамики КФУ) обратился в управление Министерства Чрезвычайных Ситуаций Украины по г. Кривой Рог с просьбой провести анкетирование населения по специально разработанному вопроснику. Сотрудники МЧС прислали 917 анкет, из которых было отобрано 680, пригодных для дальнейшей обработки.

Обработка макросейсмических данных осуществлялась в соответствии с признаками шкалы MMSK-84 [15]. 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).

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 участков территории города. Переход от средней степени реакции к интенсивности сотрясений в баллах выполнен по критериям шкалы MMSK-84, в описательной части соответствующей шкалы MSK-64 [16].

Анализ распределения средней степени реакции по этажам показал, что d_{cp} варьирует в пределах, соответствующих четырем-пяти баллам (от 0.3 до 0.8), поэтому при построении схемы распределения интенсивности сотрясений из обработки были исключены только сведения по 10–16-м этажам, для которых d_{cp} превышает 1.0. В результате для определения интенсивности сотрясений по условным участкам было использовано 680 анкет. Количество данных для определения интенсивности на участке варьирует в пределах от 3 до 93 сведений.

Согласно полученным результатам (табл. 2), максимальная интенсивность сотрясений, составляющая $I=5$ баллов по шкале MSK-64, отмечена в центральной части города Кривой Рог в микрорайонах (участках города) Бажаново, м/р-н Горняцкий и ул. Ногина (рис. 4).

Таблица 2. Макросейсмические данные о Криворожском землетрясении 14 января 2011 г.

№	Пункт	Δ , км	AZM°	φ°, N	λ°, E	№	Пункт	Δ , км	AZM°	φ°, N	λ°, E
<u>5 баллов</u>						11	ул. Пензенская	6.59	181.99	47.918	33.444
1	Бажаново	0	0	47.977	33.447	12	пл. Горького	8.67	203.76	47.906	33.400
2	м/р Горняцкий	1.69	158.59	47.963	33.455	13	Южный проспект	16.96	205.05	47.839	33.350
3	ул. Ногина	2.96	22.06	48.002	33.461	<u>3 балла</u>					
<u>4–5 баллов</u>						14	ул. Кириленко	9.16	170.47	47.896	33.467
4	м/р Солнечный	2.38	177.36	47.956	33.448	15	пл. Освобождения	10.42	217.81	47.903	33.361
5	м/р Заречный	2.97	47.26	47.995	33.476	16	м/р Закарпатский	11.0	25.19	48.066	33.510
6	м/р 1-й Восточный	4.46	184.66	47.937	33.442	17	с. Всебратское	16.81	227.77	47.875	33.280
7	м/р им. Кирова	4.87	201.5	47.936	33.422	<u>Не ощущалось</u>					
<u>4 балла</u>						18	п. Карачуны	14.64	233.12	47.898	33.289
8	м/р 4-й Восточный	3.33	170.81	47.948	33.454	19	м/р Даманский	21.57	29.95	48.145	33.592
9	Божедаровка	8.15	22.07	48.045	33.488	20	Ингулец*	31.06	208.0	47.730	33.252
<u>3–4 балла</u>											
10	Днепропетровское шоссе	5.78	167.96	47.926	33.462						

Принятые сокращения: п. – поселок; с. – село; м/р – микрорайон; пункт Ингулец* находится за пределами представленной на рис. 4 схемы, примерно в 10 км севернее границы.

Землетрясение ощутили большинство респондентов, кроме тех, что были заняты физическим трудом на открытом воздухе (очевидно, значительная часть опрошенных работают дворниками). Многие проснулись, испугались, хотя ощутили слабо или едва заметно; никто не покинул помещение; почти все сумели определить продолжительность сотрясений. В трех случаях отмечено осыпание побелки.

В зоне 4–5-балльных сотрясений многие ощутили землетрясение и смогли оценить продолжительность (от 1^с до нескольких минут). Замечено раскачивание, колебание, дребезжание различных предметов, выплескивание воды из стаканов и ведер. Как и в 5-балльной зоне, почти все ощутившие землетрясение отмечают звон, дребезжание и раскачивание предметов и здания в целом.

Граница зоны трехбалльных сотрясений на юго-западе проходит в районе Южного проспекта (Южный Горно-обогатительный Комбинат). Ее положение в северо-восточной и южной части не установлено из-за отсутствия данных. На севере трехбалльные сотрясения доходят до м/р Закарпатский. В этой зоне землетрясение ощутили немногие из числа опрошенных респондентов. Некоторые отметили, что не обратили внимания из-за часто происходящих взрывов в карьерах, вызывающих легкие сотрясения в домах.

Многолетний опыт работ по изучению макросейсмических проявлений относительно слабых сейсмических толчков показывает, что определение интенсивности сотрясений на грани их ощущаемости сопряжено с трудностями, вызванными тем, что люди, как основной объект («человек в нормальном состоянии»), в большинстве случаев не помнят, где находились и чем занимались в момент землетрясения. Это касается как анкетных данных, так и непосредственных опросов.

В связи с недостаточным объемом макросейсмической информации и ее неравномерном распределении, нанесение границ зон изосейст и координаты макросейсмического эпицентра землетрясения ($\varphi=47.98^\circ N$, $\lambda=33.45^\circ E$) носят условный характер. Расположение макросейсмического эпицентра отнесено к пункту № 1 (Бажаново), так как здесь наблюдалась наибольшая средняя степень реакции ($d_{cp}=1.4$).

На карте отмечены населенные пункты Лозоватка, Авангард, Широкое, не внесенные в таблицу, так как единичные сведения не позволяют однозначно определить интенсивность сотрясений.

Из рис. 4 также видно, что место произведенного слабого промышленного взрыва на шахте им. Орджоникидзе 14 января 2011 г. находится вне зоны ощущаемости.

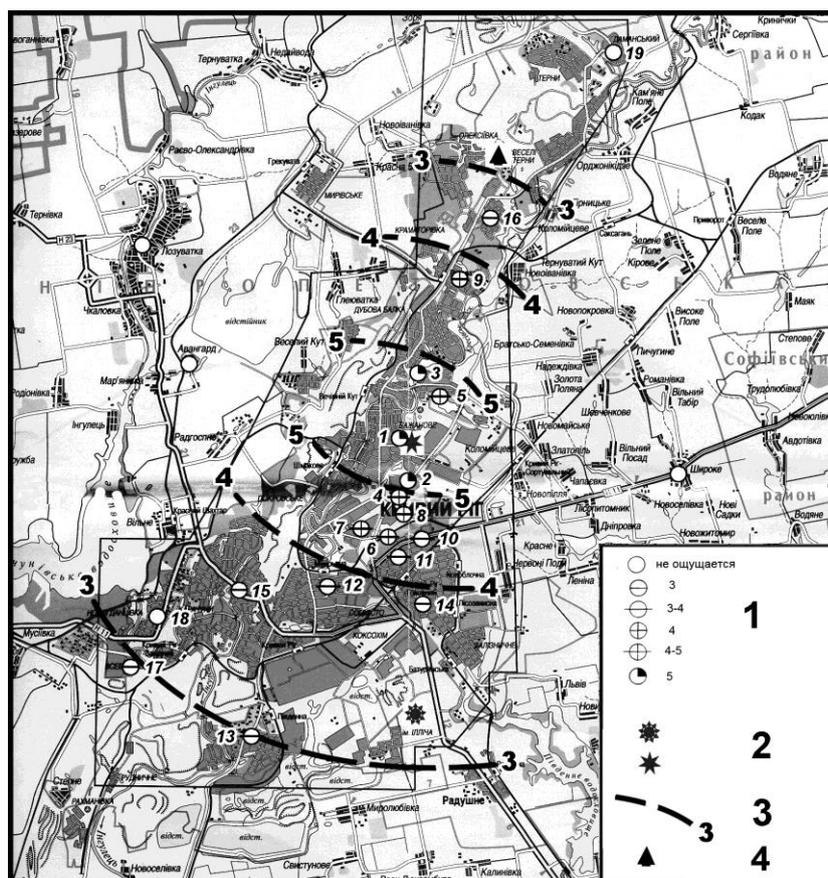


Рис. 4. Схема распределения интенсивности сотрясений Криворожского землетрясения 14 января 2011 г.

1 – интенсивность сотрясений в баллах шкалы MMSK-84 (значок интенсивности соответствует центру участка, для которого рассчитывалась интенсивность сотрясений); 2 – инструментальный и макросейсмический эпицентры; 3 – предполагаемые границы изосейст; 4 – шахта им. Орджоникидзе.

По материалам макросейсмического обследования получена приближенная оценка глубины очага h . Для этого использовалось макросейсмическое уравнение Шебалина для коровых землетрясений из [17, с. 30]:

$$I_0 = bM + v \cdot lgh - c,$$

где $b=1.5$, $v=3.5$, $c=3.0$. Тогда наблюдаемым значениям $I_0=5$ баллов и $MS=3.6$ соответствует глубина очага $h \approx 9$ км.

Исходя из инструментальных и макросейсмических данных, можно предположить, что в очаговой зоне процесс разрушения среды вероятнее всего развивался от начального гипоцентра на глубине 5 км вдоль Криворожско-Кременчугского глубинного разлома субмеридионального направления в северном направлении ($AZM=2^\circ$) на расстояние 14 км вглубь до $h=9$ км (макросейсмический гипоцентр).

Очаговые параметры землетрясения. На большинстве региональных сейсмических станций Крыма получены цифровые записи волновых форм данного землетрясения (рис. 3), пригодные для надежного расчета спектров Фурье (БПФ) и восстановления по ним динамических параметров очага в рамках теоретической дислокационной модели Брюна [18].

Методика интерпретации амплитудных спектров в рамках данной модели и расчета динамических параметров очага по низкочастотному уровню спектра Ω_0 и угловой частоте f_0 описана в работах [19, 20].

Примеры спектров и их интерпретация в рамках модели Брюна [18] приведены на рис. 5.

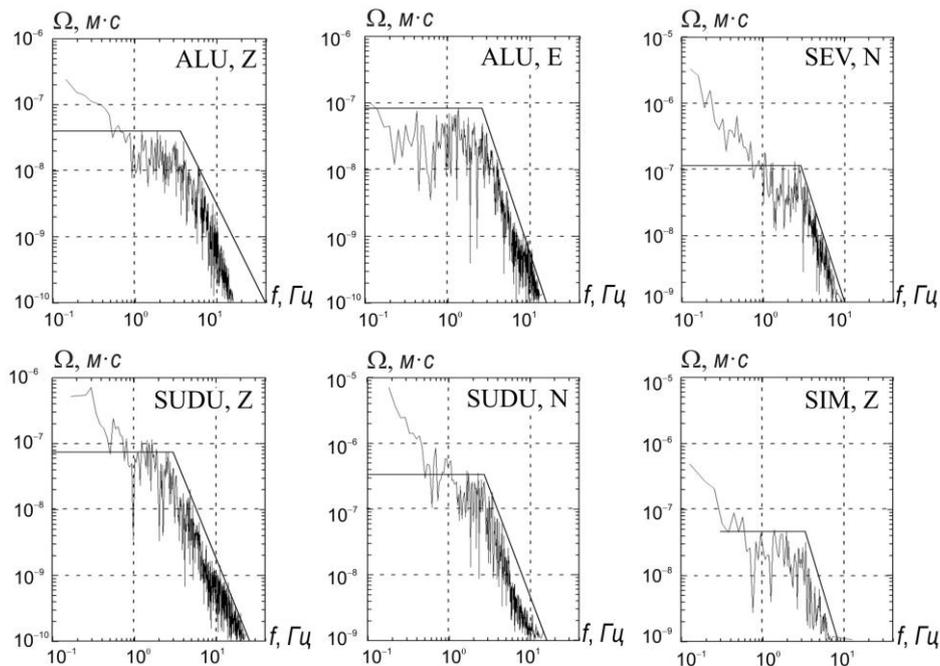


Рис. 5. Примеры амплитудных спектров продольных P - и поперечных S -волн по цифровым записям на станциях «Алушта» (ALU), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU) и «Севастополь» (SEV)

В связи с невозможностью получить решение механизма очага и, соответственно, корректно оценить направленность излучения $R_{\theta\phi}$ на станции регистрации, $R_{\theta\phi}$ принята для всех станций одинаковой и равной значению 0.4, как и в работе [20]. Средняя скорость продольных волн в верхнем 5 км-слое земной коры в районе Криворожского массива принята равной v_p 6.2 км/с по работе [14].

Динамические параметры очага землетрясения, включающие: M_0 – сейсмический момент, r_0 – радиус круговой дислокации, $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение, $\eta\sigma$ – кажущееся напряжение, $\Delta\sigma_r$ – радиационное трение, ε – деформацию сдвига, u – среднюю подвижку по разрыву, восстановлены по амплитудным спектрам цифровых записей продольных P - (составляющая Z) и поперечных S -волн (составляющие $E-W$ и $N-S$) на сейсмических станциях Крыма: «Судак» (SUDU, P и S), «Севастополь» (SEV, S), «Алушта» (ALU, P и S), «Симферополь» (SIM, P и S).

Осреднение станционных динамических параметров (кроме радиационного трения $\Delta\sigma_r$) и вычисление их стандартных отклонений выполнены, как и прежде [20], с учетом логнормального закона распределения величин. Индивидуальные станционные значения $\Delta\sigma_r$ получились знакопеременными, потому их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ по формуле [21]:

$$\Delta\sigma_r = 1/2 \Delta\sigma - \eta\sigma.$$

Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью. Результаты расчета станционных и средних для землетрясения динамических параметров представлены в табл. 3. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ , км и составляющая записи, где (N+E) означает полный вектор горизонтальных колебаний.

Таблица 3. Динамические параметры очага Криворожского-II землетрясения 14 января 2011 г. в $05^h03^m16.2^s$ с $K_p=9.7$, $MS=3.6$, $MSH=3.5$, $M_w=3.6$

Станция	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	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	M_w
ALU	Z	360	0.04	3.65	29.4	0.63	5.1	16.9	0.78	16.2	-13.7	3.58
ALU	N+E	360	0.15	2.65	21.5	0.51	7.28	24.3	0.89	22.1	-18.4	3.49
SIM	Z	326	0.05	3.4	32.8	0.68	4.58	15.3	0.75	14.5	-12.2	3.61
SIM	N+E	326	0.12	2.85	15.4	0.47	6.48	21.6	0.74	30.9	-27.6	3.40
SUDU	Z	350	0.08	3.2	56.9	0.72	6.63	22.1	1.16	8.35	-5.0	3.77
SUDU	N+E	350	0.42	2.6	58.5	0.52	18.7	62.2	2.33	8.1	1.21	3.78
SEV	N+E	367	0.14	2.8	20.1	0.48	8.01	26.7	0.93	23.6	-19.6	3.47
S					29.9	0.57	7.29	24.3	1	15.9	-12.3	3.6*
δS					0.08	0.03	0.08	0.08	0.07	0.08		0.1*

Примечание. Знаком * отмечено среднее арифметическое.

Как видно из табл. 3, получено хорошее согласие значений динамических параметров, восстановленных по записям различных типов волн и станций регистрации. Средняя дисперсия для всех определяемых величин не превысила значение 0.08. Наилучшая сходимость результатов отмечена для радиусов круговой дислокации: $r_0 = 0.57 \pm 0.03$ км.

Наименьший сейсмический момент $M_0 = 15.4 \cdot 10^{13}$ Н·м получен по S-волне (полный вектор колебаний по составляющим E-W и N-S) на записи станции «Симферополь», а наибольший, как по продольным P-волнам ($M_0 = 56.9 \cdot 10^{13}$ Н·м), так и по полному вектору S-волны ($M_0 = 58.5 \cdot 10^{13}$ Н·м) – на станции «Судак». Среднее значение M_0 по семи определениям составило $29.9 \cdot 10^{13}$ Н·м с дисперсией $S = 0.08$ Н·м. Такой незначительный разброс M_0 практически соответственно мало сказался на оценке моментной магнитуды $M_w = 3.6 \pm 0.1$. Сброшенное и кажущееся напряжения составили, соответственно, $\Delta\sigma = 7.3 \cdot 10^5$ Па (7.3 бар) и $\eta\sigma = 15.9 \cdot 10^5$ Па, средняя подвижка по разрыву – $\bar{u} = 1$ см, деформация сдвига – $\varepsilon = 24.3 \cdot 10^{-6}$. Полученное отрицательное значение радиационного трения $\Delta\sigma_r = -12.30 \cdot 10^5$ 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 [21].

Сравнение динамических параметров двух Криворожских землетрясений (25 декабря 2007 г. [9] и 14 января 2011 г.) с одинаковым энергетическим классом $K_p = 9.7$ показало, что по уровню сейсмического момента M_0 оба события близки между собой, но различаются почти в два раза по размерам радиуса круговой дислокации: в 2007 г. $r_0 = 1$ км, в 2011 г. – $r_0 = 0.57$ км. Малые значения r_0 Криворожского-II очага при близких M_0 привели к завышению в три и более раз остальных параметров, количественно связанных с размером разрыва. В целом же восстановленные количественные значения очаговых параметров Криворожское-II землетрясения близки (в пределах погрешностей определения величин) к таковым для других землетрясений (например, региона Крым) эквивалентного энергетического уровня [20].

Дополнительно рассмотрены также энергетические спектры. Переход от спектральной плотности амплитудного спектра к энергетическому спектру осуществлялось по формуле из [22]:

$$q = \frac{\rho c}{2\pi \lg e} \omega^3 \Omega^2(\omega),$$

где ρ – плотность пород в окрестности очага, c – скорость распространения объемных P - или S -волн, $\Omega(\omega)$ – модуль спектральной плотности, определяемый из амплитудного спектра акселерограмм.

Для исключения осцилляций энергетические спектры сглаживались скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот и представлены в билогарифмической системе координат (рис. 6). Методика и алгоритм расчета энергетических спектров, их обработка описаны в [20, 22].

Для всех энергетических спектров (рис. 6) получена характерная резонансная форма с одним выраженным максимумом нормированной плотности энергии q/q_{\max} в ограниченной области частот, как для землетрясений, например Крымско-Черноморского региона [20].

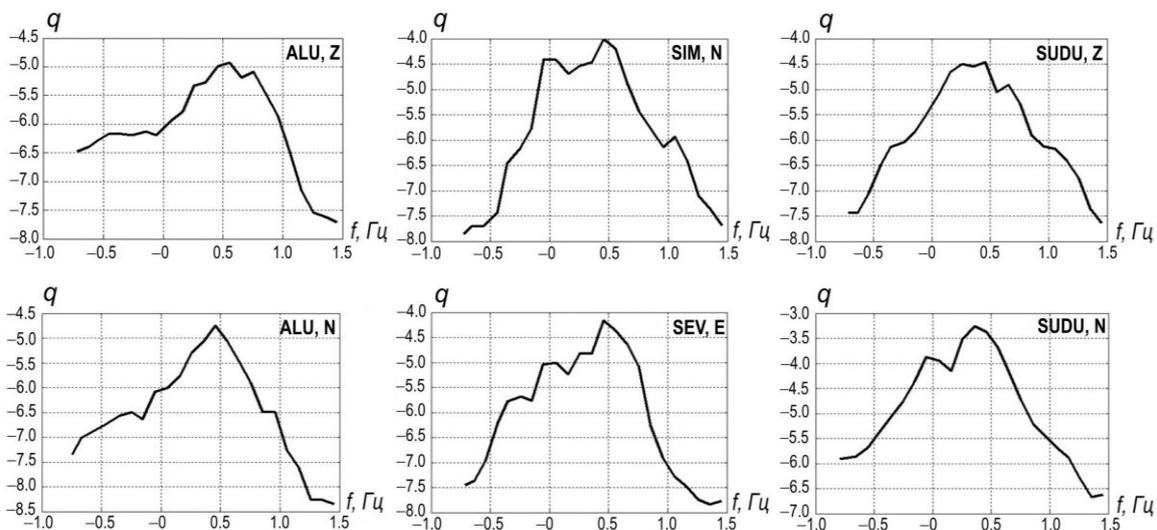


Рис. 6. Примеры энергетических спектров продольных P - и поперечных S -волн по цифровым записям на станциях «Алушта» (ALU), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU) и «Севастополь» (SEV)

Рассмотрена главная характеристика энергетических спектров – ширина максимума спектра δf_q на уровне 0.9 от максимального значения q_{\max} в высокочастотной (f_{q1}) и низкочастотной (f_{q2}) части спектра: $\delta f_q = f_{q1} - f_{q2}$. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4. Стационарные значения ширины максимума энергетических спектров δf_q Криворожского-II землетрясения 14 января 2011 г. по разным составляющим записи

Станция	$\delta f_q, Z$	$\delta f_q, N$	$\delta f_q, E$
ALU	2.84–6.25	2.68–6.2	2–3.4
SIM	1.8–3.2	2.5–3.6	2.7–3.6
Станция	$\delta f_q, Z$	$\delta f_q, N$	$\delta f_q, E$
SUDU	1.7–2.9	2.6–3.4	2.3–3.22
SEV	1.15–4.35	2.6–2.9	2.66–3.46

Из рис. 6 и табл. 4 видно, что, несмотря на вариации индивидуальных энергетических спектров, значения q_{\max} по разным составляющим записи находятся в сравнительно ограниченном диапазоне частот $\delta f = 1.15–3.6$ Гц с преобладанием максимальных значений плотности сейсмической энергии вблизи 3 Гц. Подобный результат получен для землетрясений аналогичного энергетического уровня и эпицентральных расстояний по записям на региональных сейсмических станциях Крыма.

Следует также отметить, что сброс накопленных напряжений в очаговой зоне был одноактным. Следов предваряющих толчков (форшоков) и последующих (афтершоков) на сейсмограммах не установлено, как и при Криворожском-I землетрясении 25.12.2007 г. [9].

Л и т е р а т у р а

1. Скляр А.М., Князева В.С. Макросейсмические данные Криворожского землетрясения 14 января 2011 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2011 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. – С. 59–61.
2. Єнтін В.А. Геофізична основа тектонічної карти України масштабу 1:100 000 // Геофізический журнал, 2005. – 27. – № 1. – С. 74–84.
3. 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.
4. Красилов С.А., Коломиец 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.
5. Кульчицкий В.Е. Программа расчета координат гипоцентров землетрясений (ГИРО-08) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2008 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. – С. 28–32.
6. Бондарь М.Н. Сейсмическое событие в районе Кривого Рога (Днепропетровская область) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2011 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. – С. 136–139.
7. International Seismological Centre, On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2014. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
8. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2011 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2011–2012. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2011.
9. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Пустовитенко А.А., Скляр А.М. Криворожское землетрясение 25 декабря 2007 г. с $MLH=3.1$, $M_w=3.7$, $I_0=5$ (Украина, Днепропетровская область) // Землетрясения Северной Евразии в 2007 г. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 435–447.
10. Кульчицкий В.Е., Сафонова Г.П., Свидлова В.А. Годографы сейсмических волн Крымско-Черноморских землетрясений // Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым–Карпаты) за 1983 г. – Киев: Наукова думка, 1986. – С. 94–103.
11. Kennet B.L.N. Seismological Tables: ak135 // Research School of earth Sciences Australian national University. – Australia, Canberra: ACT0200, 2005. – 80 с.
12. Раутиан Т.Г. Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
13. Khalturin V.I., Rautian T.G., Richards P.G. The Seismic Signal Strength of Chemical Explosions // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1998. – 88. – N 6. – P. 1511–1524.
14. Стросение земной коры и верхней мантии Центральной и Восточной Европы. (Глава VII). – Киев: Наукова думка, 1978. – С. 136–147.
15. Шебалин Н.В. Об оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы определения сейсмической интенсивности. – М.: Наука, 1975. – С. 87–109.
16. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер (Иена), Карник В. (Прага). Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. – М.: МГК АН СССР, 1965. – 11 с.
17. Шебалин Н.В. Коэффициенты уравнения макросейсмического поля по регионам // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 30.
18. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – 75. – N 26. – P. 4997–5009.
19. 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 станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 2. – С. 66–79.
20. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
21. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 179 с.
22. Ризниченко Ю.В., Сейдузова С.С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности – М.: Наука, 1984. – 180 с.