

Прояви у Кривбасі катастрофічних турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р.

О.В. Кендзера¹, П.Г. Пігулевський¹, Ю.А. Андрущенко², Ю.В. Семенова¹,
С.В. Щербина¹, В.К. Свистун³, О.О. Калініченко¹, О.І. Лящук², 2023

¹Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

²Головний центр спеціального контролю Державного космічного агентства України, Київ, Україна

³Дніпропетровська геофізична експедиція «Дніпрогеофізика», Дніпро, Україна

Проаналізовано результати впливу потужних турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р.: з магнітудою 7,8 Mw о 01:17:36 (UTC) Кахраманмараш—Газиантеп; з магнітудою $M_w=6,7/6,3$ о 01:28:21 (UTC); з магнітудою $M_w=7,5$ о 10:24:50 Экинозу—Кахраманмараш, на територію України та, зокрема, м. Кривий Ріг. Розглянуто алгоритми обробки записів, зареєстрованих на сейсмічних станціях Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна та Головного центру спеціального контролю Державного космічного агентства України. У результаті обробки цифрових записів турецьких землетрусів отримано параметри інтенсивності струшування ґрунту в пунктах реєстрації: м. Одеса і «Кривий Ріг» <3 бали, м. Кременчук — 2, м. Полтава і м. Київ — 1 бал. Побудовано карту-схему ізосейст, згідно з якою згасання інтенсивності хвиль від турецьких землетрусів залежать від геотектонічної будови території України, через яку поширювалися сейсмічні коливання.

Моніторингові спостереження за рівнем води в глибокій свердловині зафіксували зміни в геодинамічних (гідрогеодеформаційних) процесах, що відбулися після потужних турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р. Виявлено факти реагування рівня розломно-тріщинних підземних вод на території Кривбасу на землетрусу. Відповідно до розрахунку швидкість поширення у верхній частині літосфери фронту деформації порід дорівнювала $\approx 19,0$ км/хв ($\pm 0,5$ км/хв), а зафіксовані зниження рівня підземних вод на 2—3 см дали змогу зробити висновок, що після землетрусу відбулися короткоперіодні процеси розтягу земної кори, як у зоні Криворізько-Кременчуцького розлому, так і на Українському щиті в цілому.

Розраховані амплітудно-частотні характеристики для геологічного середовища на території м. Кривий Ріг показали, що максимальні прискорення сейсмічних коливань на вільній поверхні ґрунту збільшуються відносно корінних порід приблизно в 4 рази, у частотному діапазоні від 1,2 до 1,75 Гц.

Ключові слова: турецькі землетруси, сейсмічність, геодинаміка, гідрогеодинаміка, підземні води, деформація порід, частотні характеристики.

Вступ. Вогнища потужних турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р.: з магнітудою $M_w=7,8$ о 01:17:36 (UTC) Кахраманмараш—Газиантеп; з магнітудою $M_w=6,7/6,3$ о 01:28:21 (UTC) та з магнітудою $M_w=7,5$ о 10:24:50 Экинозу—Кахраманмараш [Setyan et al., 2023] розміщувались у зоні стику трьох тектонічних плит материкового типу: Анатолійської, Аравійської та Африканської (рис. 1). За даними NASA, гіпоцентри землетрусів були на глибині близько 18 км. Відносно невелика глиби-

Citation: Kendzera, O.V., Pigulevskiy, P.G., Andrushchenko, Yu.A., Semenova, Yu.V., Shcherbina, S.V., Svystun, V.K., Kalinichenko, O.O., & Liashchuk, O.I. (2023). Manifestations in Kryvbas of catastrophic Turkish earthquakes February 6, 2023. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(5), 71—90. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i5.289109>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

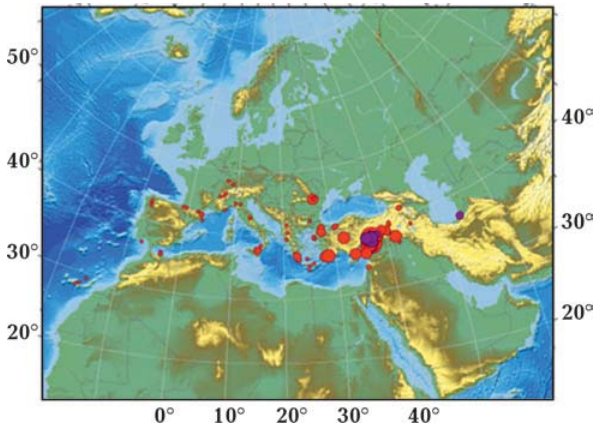


Рис. 1. Скриншот карти епіцентрів землетрусів на сайті Європейського центру (<https://www.emsc-csem.org/>) станом на 11 год 50 хв (UTC) 06 лютого 2023 р.
 Fig. 1. Screenshot of the map of earthquake epicenters on the website of the European Center (<https://www.emsc-csem.org/>) as of 11:50 a.m. (UTC) on February 6, 2023.

на вогнищ розміщення землетрусів обумовила вихід руйнівних поштовхів на денну поверхню протяжністю у сотні кілометрів від епіцентру. Рух тектонічних плит, що призвів до землетрусів, спостерігався в долинах та на їх схилах. Розломні зони проходили через міста, а в деяких випадках безпосередньо через будівлі. Надзвичайно сильних поштовхів уздовж розломних структур на дуже великі території зазнали багато густонаселених міст і селищ. У турецьких містах Тюркоглу, Кахраманмараш, Нурдагі та інших були зруйновані тисячі будівель, які поховали своїх мешканців, тисячі людей залишились без даху над головою. Внаслідок катастрофічних турецьких землетрусів 2023 р. загинуло понад 42 тис. людей.

Спостереження європейським супутником Sentinel-1 за поверхнею Землі до та після руйнівних землетрусів зафіксували два величезних розриви в земній корі біля турецько-сирійського кордону [Sesetyan et al., 2023].

Довший з двох розривів простягається на 300 км у північно-східному напрямку від північно-східного краю Середземного моря. Розлом утворився внаслідок першого більш потужнішого поштовху. Другий розлом завдовжки близько 125 км відкрився

під час другого, дещо слабшого поштовху магнітудою 7,5 приблизно через дев'ять годин.

У статті проаналізовано результати інструментальних спостережень на сейсмічних станціях Інституту геофізики імені С.І. Субботіна НАН України та Головного центру спеціального контролю Державного космічного агентства (ДКА) України (МІ05 (Одеса), МІ30 (Зелениця), МІ06 (Кременчук), МІ02 (Полтава) і «Кривий Ріг») і гідрогеодинамічних спостережень за коливаннями рівня підземних вод в глибокій свердловині ($h=815$ м) з метою вивчення характеристик впливу турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р. на територію України та оцінювання їх потенційних наслідків.

Методика сейсмічних досліджень.

Визначення параметрів сейсмічних подій проводилося за результатами аналізу інструментальних спостережень на сейсмічних станціях Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна та Головного центру спеціального контролю [Гордієнко, Каплаушенко, 2017]. Для уточнення параметрів сейсмічних подій залучалися також дані зарубіжних сейсмологічних мереж і локальних сейсмологічних мереж АЕС України.

Збір, обробка та аналіз даних проводились із використанням спеціалізованого сейсмологічного програмного забезпечення SeisComP3 — найпоширенішого програмного пакета для моніторингу землетрусів та інших сейсмічних подій у реальному часі. Програмний пакет забезпечує автоматичний інтерактивний збір, обробку цифрових сейсмологічних даних.

Географічне положення епіцентру та глибини гіпоцентру землетрусу визначали методом LocSAT за одновимірною моделлю земної кори. Оператор-сейсмолог має змогу задати тип сейсмічної хвилі, її положення на осі часу, змінювати час вступу фаз сигналу на станції, тим самим досягаючи мінімальних похибок.

Для аналізу цифрових записів сейсмічних подій і дослідження їх специфічної спектрально-часової картини застосовується метод спектральних діаграм, що ілюструє картину зміни спектра сейсмічних

коливань у ковзаному часовому вікні. Для проведення спектрально-часового аналізу було використано інтерактивну програму обробки і аналізу цифрових записів Geotool.

Урахування спектрального складу коливань сприяє правильній ідентифікації записів сейсмічних хвиль на етапі первинної обробки цифрових записів.

Магнітуду було визначено за амплітудою об'ємної хвилі m_b за формулою

$$mB = \log_{10} (V_{\max} / 2\pi) + Q(\Delta, h) - 3,0,$$

де V_{\max} — швидкість руху в зареєстрованих сейсмічних коливаннях (км/с), пов'язана з максимальною амплітудою P -хвилі (в інтервалі запису P , pP , sP -хвиль та їх коди). Період у максимуму сейсмічної хвилі має задовольняти умові $0,2 \text{ с} < T < 30 \text{ с}$; $Q(\Delta, h)$ — калібрувальна функція епіцентральної відстані Δ і фокальної глибини, що відображає залежність амплітуди сейсмічних коливань від особливостей будови середовища на трасі поширення (табл. 1).

У табл. 2—5 наведені параметри землетрусу, отримані в результаті обробки цифрових записів сейсмологічних станцій: МІ05 (м. Одеса), МІ06 (м. Кременчук), МІ02 (м. Полтава), МІ30 (с. Зелениця) і «Кривий Ріг».

Короткий аналіз частотно-часового розподілу коливань на спектрограмах. Регіональний сейсмічний аналіз графіків частотно-часового розподілу спектрограм є важливим інструментом для розпізнавання природної і техногенної сейсмічності. За їх допомогою виявляють залежні від часу та частоти зміни у розподілі енергії сигналу, а також відображають відносні амплітуди регіональних сейсмічних фаз ($P[g/b/n]$, $S[g/b/n]$, Lg , Rg). Сейсмічні коливання мають широкий частотний склад, їх енергія рівномірно розподілена на всьому діапазоні реєстрованих частот.

При аналізі записів потужних турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р. о 01:17:36 (UTC) з магнітудою $M_w=7,8$ та наступного о 01:28:21 (UTC) з магнітудою $M_w=6,7/6,3$ з'явилася проблема виділення сейсмічних сигналів від близьких за часом виникнен-

ня джерел. На фоні потужної поверхневої хвилі від першого землетрусу неможливо достатньо точно візуально виділити перші вступу сигналу від наступних поштовхів. Для виділення на сейсмічному записі сигналів від різних землетрусів було застосовано частотну фільтрацію та аналіз спектрально-часових діаграм.

На спектрограмах віддалених потужних землетрусів (рис. 2—6) зареєстрована, характерна для них раптова поява сейсмічних коливань з широким частотним складом в інтервалі запису об'ємних хвиль, за якими спостерігається експоненційний спад їх інтенсивності. У низькочастотній області максимум спектральної густини енергетичного спектра виявляється в інтервалі запису поверхневих хвиль.

Відмінності між спектрограмами коливань, зареєстрованих на різних станціях, значною мірою пов'язані із згасанням високочастотних сигналів з відстанню. Найбільш насичений спектр зафіксовано на с/с «Кривий Ріг», який пов'язують з меншим загасанням амплітуд високочастотних сигналів з відстанню в середовищі масивних кристалічних порід докембрійського фундаменту (рис. 3, 7). Незначне згасання спостерігається і на спектрограмі, яку отримано на с/с «Кременчук» (див. рис. 4). При цьому отримано значне згасання рівня сигналу між с/с МІ06 «Кременчук» та МІ02 «Полтава», незважаючи на те, що відстань між ними за напрямком хвилі становить лише 39 км. Це можна пояснити зміною геотектонічної будови на шляху поширення сейсмічних коливань, що обумовило характер записів і вигляд спектрограм (див. рис. 4, 6). Припускаються дві імовірні причини таких змін: по-перше, значне нарощення потужності осадового чохла в межах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ); по-друге, вплив південного крайового розлому коромантійного закладення (див. рис. 7).

Про тектонічні умови розташування сейсмологічних станцій. У геолого-структурному аспекті територія України характеризується складною геологічною і структурно-тектонічною будовою (див.

Т а б л и ц я 1. Параметри землетрусів, отримані за результатами ручної обробки цифрових записів черговим аналітиком Центру спеціального контролю

Event						
Public ID			GuAL2023cnwr			
Type			earthquake			
Description region name			Turkey			
Date			2023-02-06			
Time			01:17:36.2+/-0.5 s			
Latitude			37.26 deg+/-2 km			
Longitude			37.01 deg+/-2 km			
Depth			17 km+/-3 km			
Agency			MCSM			
Mode			manual			
Status			confirmed			
Residual RMS			0.82 s			
Azimuthal gap			58 deg			
Network magnitudes:						
M_{Lv}			7.81+/-0.38 4			
$M_w (m_b)$			7.60+/-0.40 12 preferred			
m_b			7.52+/-0.11 13			
m_b			6.30+/-0.19 47			
Phase arrivals:						
sta	net	dist	azi	phase	time	res
BR131	IM	3.6	314	<i>P</i>	01:18:32.4	0.9
GNI	IU	6.7	62	<i>P</i>	01:19:14.7	0.9
EIL	GE	7.8	193	<i>P</i>	01:19:28.5	0.0
KBZ	IM	7.9	33	<i>P</i>	01:19:31.0	1.2
KIV	II	8.0	31	<i>P</i>	01:19:32.3	1.3
TIRR	GE	9.7	321	<i>P</i>	01:19:56.3	1.4
XAEC2	UA	14.9	334	<i>P</i>	01:21:05.7	0.1
MI29	MI	14.9	338	<i>P</i>	01:21:05.5	-0.3
XAEC4	UA	14.9	334	<i>P</i>	01:21:06.1	-0.3
XAEC1	UA	15.0	334	<i>P</i>	01:21:08.0	0.5
MI28	MI	15.2	337	<i>P</i>	01:21:08.5	-1.6
UZH	UA	15.6	321	<i>P</i>	01:21:15.4	-0.2
RNPP5	UA	16.1	334	<i>P</i>	01:21:19.3	-1.7
RNPP8	UA	16.2	334	<i>P</i>	01:21:20.6	-1.7
SCM	AK	81.2	2	<i>P</i>	01:29:51.3	0.6
FFC	II	81.8	337	<i>P</i>	01:29:54.8	0.6
ULM	IM	83.5	332	<i>P</i>	01:30:03.4	0.6
MPG	G	86.7	274	<i>P</i>	01:30:19.1	-0.3
SANI	GE	90.4	92	<i>P</i>	01:30:35.6	-1.5
WVT	IU	90.9	318	<i>P</i>	01:30:38.4	-0.6

Умовні позначення: Sta — маркування сейсмічних станцій, задіяних в обробці; Dist — епіцентрально відстань; EvAz — азимут напрямку із епіцентру на станцію, визначений за координатами епіцентру, градус; Phase — фаза вступу сейсмічної хвилі; Date Time — дата і час вступу сейсмічної хвилі; RMS — середньоквадратична нев'язка спостереженого і розрахованого часу пробігу сейсмічних хвиль.

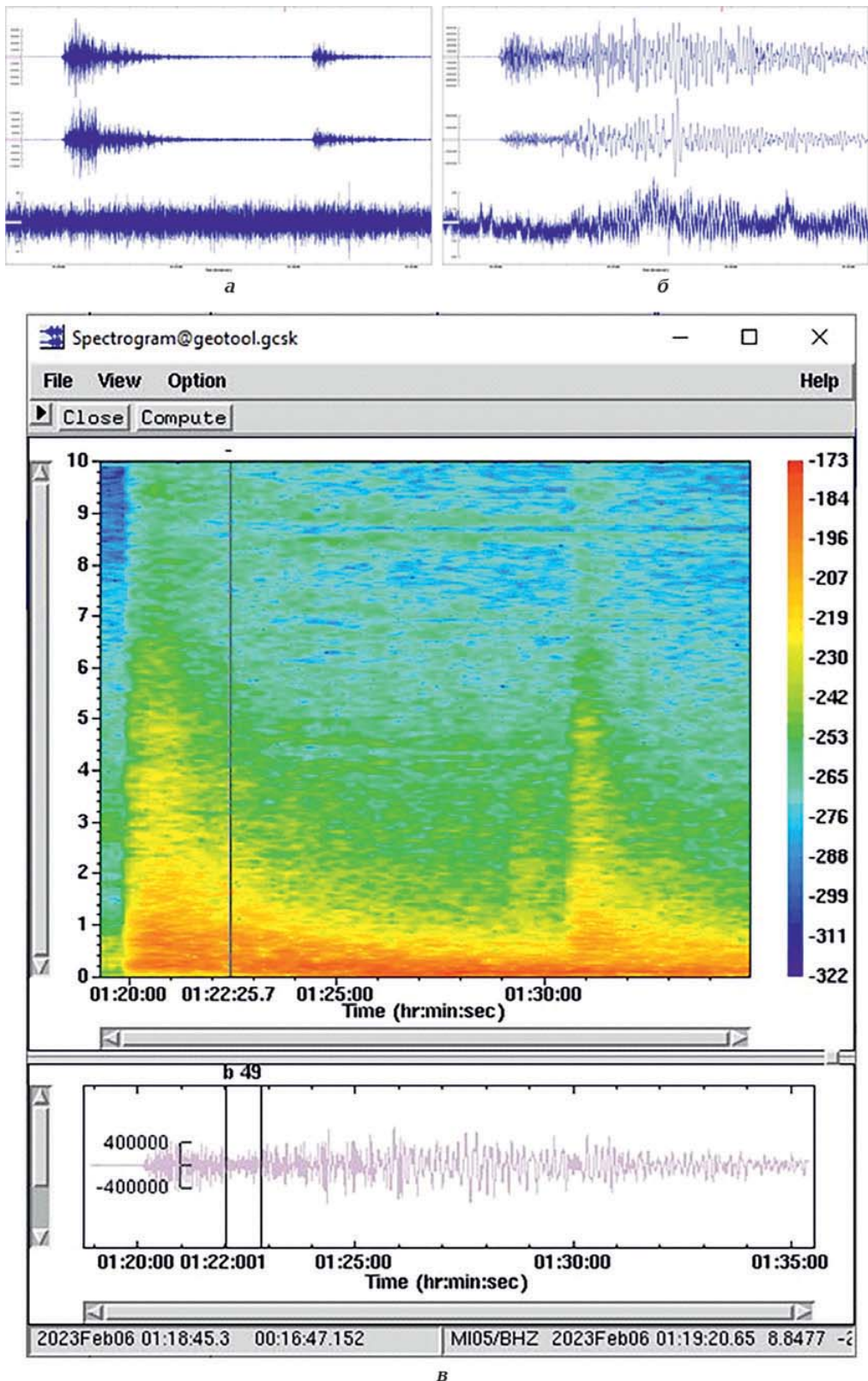


Рис. 2. Запис турецького землетрусу 6 лютого 2023 р. з магнітудою $M_w=7,8$ о 01:17:36 (UTC) с/с MI05 «Одеса», смуга частот 1,0—2,0 Гц (а); нефільтрована (б) та його спектрограма (в).

Fig. 2. Record of the Turkish earthquake on February 6, 2023 with a magnitude of $M_w=7.8$ at 01:17:36 (UTC) s/s MI05 «Odessa», frequency band 1.0—2.0 Hz (a); unfiltered (b) and its spectrogram (B).

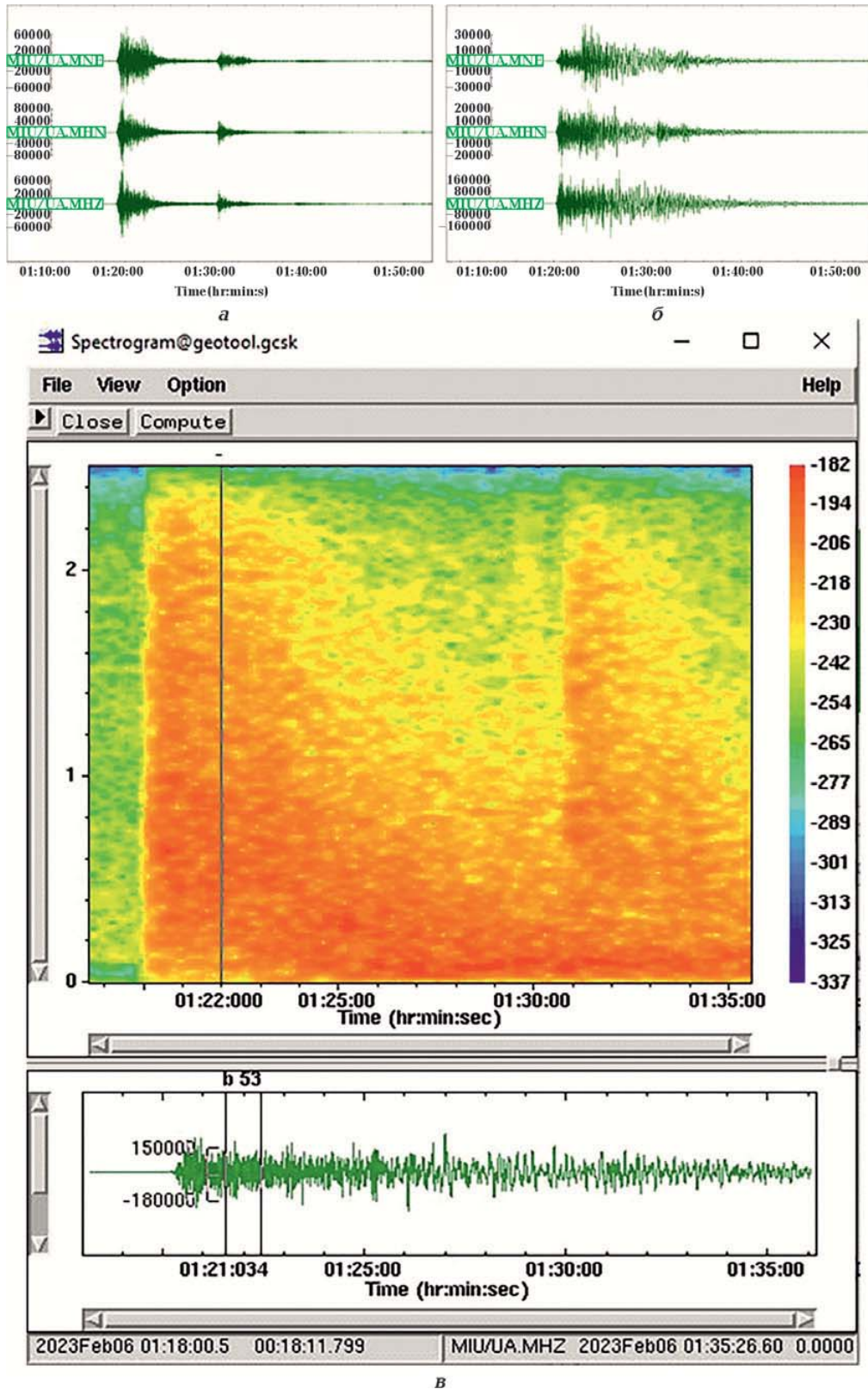


Рис. 3. Запис турецького землетрусу 6 лютого 2023 р. з магнітудою $M_w=7,8$ о 01:17:36 (UTC) с/с «Кривий Ріг», смуга частот 1,0—2,0 Гц (а); нефільтрована (б) та його спектрограма (в).

Fig. 3. Record of the Turkish earthquake on February 6, 2023 with a magnitude of $M_w=7.8$ at 01:17:36 (UTC) Kryvyi Rih s/c, frequency band 1.0—2.0 Hz (a); unfiltered (b) and its spectrogram (c).

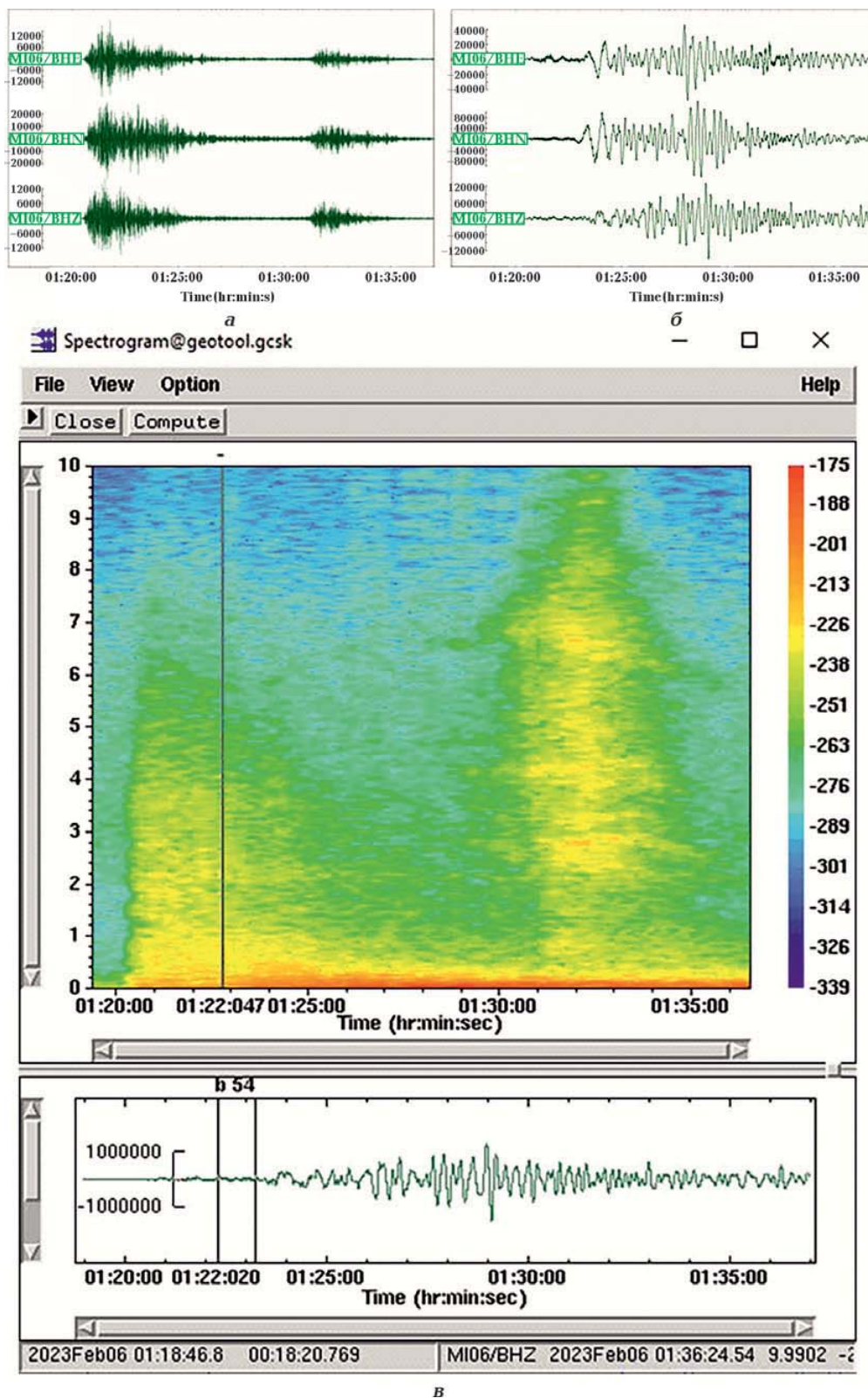


Рис. 4. Запис турецького землетрусу 6 лютого 2023 р. з магнітудою $M_w=7,8$ о 01:17:36 (UTC) с/с MI06 «Кременчук», смуга частот 1,0—2,0 Гц (а); нефільтрована (б) та його спектрограма (в).

Fig. 4. Record of the Turkish earthquake on February 6, 2023 with a magnitude of $M_w=7.8$ at 01:17:36 (UTC) by MI06 «Kremenchuk», frequency band 1.0—2.0 Hz (a); unfiltered (b) and its spectrogram (b).

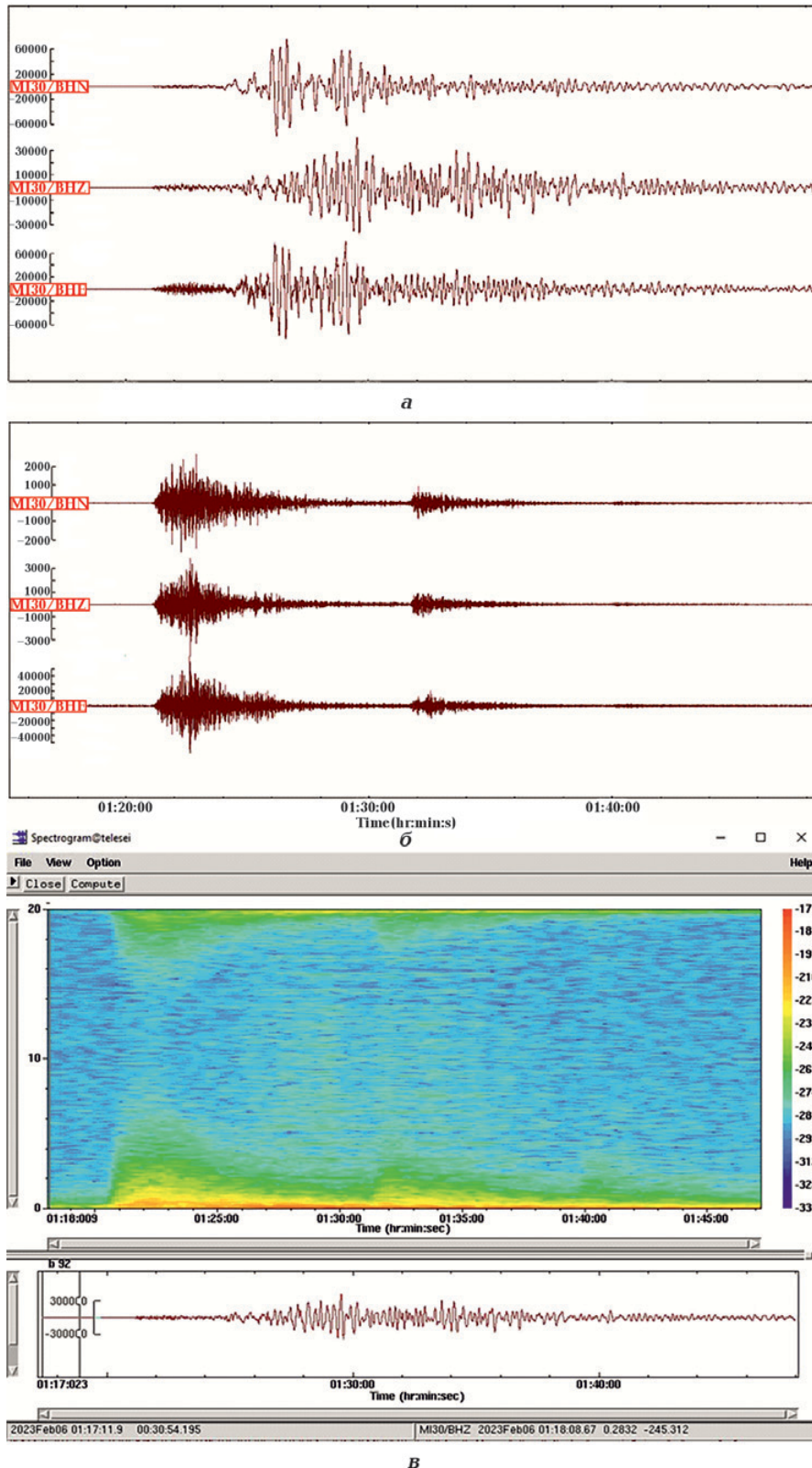


Рис. 5. Спектрограма турецького землетрусу 6 лютого 2023 р. с/с MI30 «Зелениця» та його нефільтрований запис (б) в смузі частот 1,0—2,0 Гц (в).

Fig. 5. Spectrogram of the Turkish earthquake on February 6, 2023, at MI30 «Zelenitsa» and its unfiltered recording (b) in the 1.0—2.0 Hz frequency band (v).

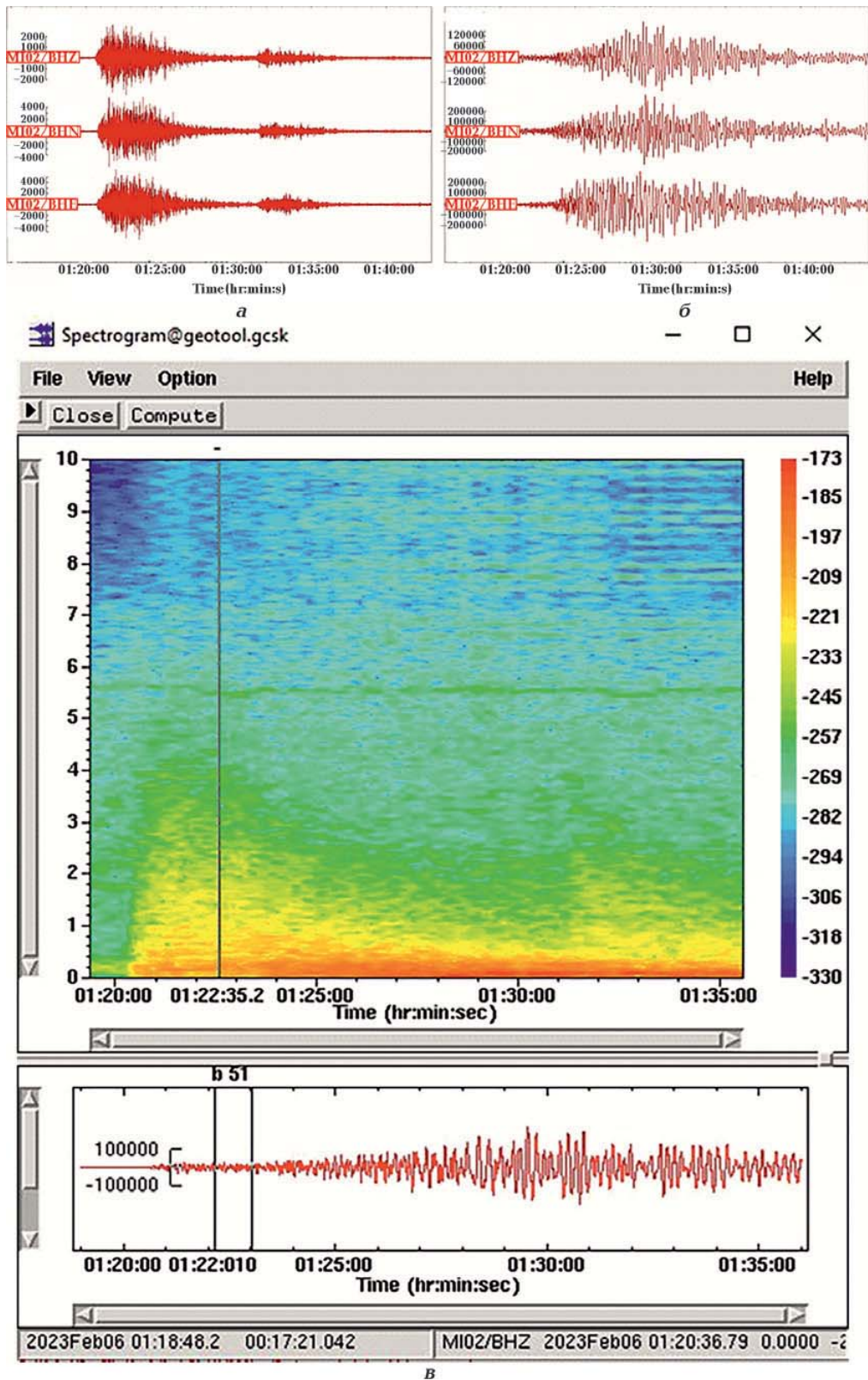


Рис. 6. Запис турецького землетрусу 6 лютого 2023 р. з магнітудою $M_w=7,8$ о 01:17:36 (UTC) с/с MI02 «Полтава», смуга частот 1,0—2,0 Гц (а); нефільтрована (б) та його спектрограма (в).

Fig. 6. Record of the Turkish earthquake on February 6, 2023 with a magnitude of $M_w=7.8$ at 01:17:36 (UTC) s/s MI02 «Poltava», frequency band 1.0—2.0 Hz (a); unfiltered (b) and its spectrogram (B).

Таблиця 2. Параметри турецького землетрусу 06.02.23 о 01:17:36, отримані міжнародними центрами EMSC, США, МЦД і ГЦСК

Час у джерелі (UTC)	Координати джерела		H, км	Магнітуда	Інтенсивність	Джерело надходження інформації
	широта, град	довгота, град				
01:17:35	+37,2	+37,13	10f *	$M_w=7,8$	—	EMSC
01:17:36	+37,17	+37,03	18	$M_w/m_b=7,8/6,6$	—	США
01:17:34	+37,36	+37,03	—	5,5	—	МЦД
01:17:36	+37,26	+37,01	17	7,6	10	ГЦСК

* — фіксована глибина для розрахунків параметрів

Таблиця 3. Параметри турецького землетрусу, отримані в результаті обробки цифрових записів сейсмологічних станцій на території України

Станція	Координати станції		Прискорення в пункті реєстрації	Інтенсивність у пункті реєстрації, бали	Відстань до епіцентру, км
	широта, град	довгота, град			
МІ05 (Одеса)	46,7770	29,9835	$2,5 \cdot 10^{-2} \text{ g}$	<3	1215
«Кривий Ріг»	47,9295	33,3311	$2,6 \cdot 10^{-2} \text{ g}$	<3	1309
МІ06 (Кременчук)	49,1011	33,4410	$2,4 \cdot 10^{-3} \text{ g}$	2	1357
МІ02 (Полтава)	49,6025	34,5430	$4,3 \cdot 10^{-4} \text{ g}$	1	1396
МІ30 (Зелениця)	50,746	28,189	$6,1 \cdot 10^{-4} \text{ g}$	1	1663

Таблиця 4. Параметри турецького землетрусу 06.02.23 о 01:28:21, отримані міжнародними центрами EMSC, США, МЦД і ГЦСК

Час у джерелі (UTC)	Координати джерела		H, км	Магнітуда	Інтенсивність	Джерело надходження інформації
	широта, град	довгота, град				
01:28:21	+37,27	+36,59	10f	6,1	—	EMSC
01:28:18	+37,41	+36,83	10	$M_w/m_b=6,7/6,3$	—	США
01:28:25	+37,13	+36,75	63	5,4	—	МЦД
01:28:16	+37,39	+36,91	10	6,7	9	ГЦСК

Таблиця 5. Параметри турецького землетрусу, отримані в результаті обробки цифрових записів сейсмологічних станцій на території України

Станція	Координати станції		Прискорення в пункті реєстрації	Інтенсивність в пункті реєстрації, бали	Відстань до епіцентру, км
	широта, град	довгота, град			
МІ05 (Одеса)	46,7770	29,9835	$6,5 \cdot 10^{-3} \text{ g}$	2	1183
«Кривий Ріг»	47,9295	33,3311	$6,7 \cdot 10^{-3} \text{ g}$	2	1280
МІ06 (Кременчук)	49,1011	33,4410	$1,2 \cdot 10^{-3} \text{ g}$	1—2	1313
МІ02 (Полтава)	49,6025	34,5430	$1,3 \cdot 10^{-4} \text{ g}$	1	1367
МІ30 (Зелениця)	50,746	28,189	$1,3 \cdot 10^{-4} \text{ g}$	1	1632

рис. 7). Територія знаходиться в південно-західній частині Східноєвропейської платформи (СЄП) і виділяється різноманітною глибинною будовою [Гордиенко и др., 2005; Тектонічна., 2007; Пігулевський, 2022], складом гірських порід, умовами, ві-

ком розвитку, становлення стратифікованих підрозділів кристалічної товщі, магматичних та ультраметаморфічних утворень [Геолого-геофизическая..., 2006; Тектонічна..., 2007; Геолого-геофизические..., 2011].

Як показано на рис. 7 [Тектонічна..., 2007], сейсмологічні станції, використані для аналізу наведеної сейсмічності на території України від потужних турецьких землетрусів, розташовані таким чином: МІ05 — у межах Південноукраїнської монокліналі; МІ30, МІ06 та «Кривий Ріг» — у межах Українського щита (УЩ); МІ02 — у



Рис. 7. Схема тектонічного районування України [Тектонічна ..., 2007] з ізосейстами та розташуванням сейсмологічних станцій: 1 — межі границі геоструктур; 2 — шовні зони; 3 — ізосейсти; 4 — сейсмологічна станція та її номер (назва). Геоструктури (цифри на карті): 1 — Карпатський мегантикліній; 2 — Рава-Руська епіорогенна зона, 3 — Волино-Подільська плита, 4 — Український щит, 5 — Дніпровсько-Донецька западина, 6 — Складчастий Донбас, 7 — Воронежський кристалічний масив, 8 — Південноукраїнська монокліналь, 9 — Скіфська епіорогенна зона, 10 — Кримський меганіпторій. Шовні зони: Г — Голованівська, К — Криворізько-Кременчуцька, О — Орхів-Павлоградська.

Fig. 7. Scheme of tectonic zoning of Ukraine [Tectonic..., 2007] with isoseists and location of seismological stations: 1 — borders of geostructure boundaries; 2 — seam zones; 3 — isoseists; 4 — seismological station and its number (name). Geostructures (numbers on the map): 1 — Carpathian Megantiform, 2 — Rava-Ruska epiorogenic zone, 3 — Volyn-Podilsky plate, 4 — Ukrainian shield, 5 — Dnieper-Donetsk depression, 6 — Folded Donbas, 7 — Voronezh crystalline massif, 8 — South Ukrainian monocline, 9 — Scythian epiorogenic zone, 10 — Crimean megantiform. Seam zones: Г — Golovanivska, К — Kryvorizko-Kremenchutska, О — Orikhov-Pavlogradska.

межах ДДЗ. При цьому с/с МІ06 та «Кривий Ріг» розташовані у східній частині Криворізько-Кременчуцької шовної зони в межах однойменного розлому [Захаров та ін., 2002; Геолого-геофизическая..., 2006; Щербина та ін., 2021].

Український щит, представляє структуру СЄП (піднятим блоком фундаменту), в межах якого на денній поверхні виділяються або відслонюються кристалічні утворення докембрію, які вкриті осадовим чохлам незначної потужності. Південноукраїнська монокліналь складена осадовими товщами, які перекривають фундамент СЄП (див. рис. 7). За стратиграфічною повнотою та потужністю розрізів у межах монокліналі розрізняють дві частини: західну та східну. У західній частині, західніше меридіана м. Одеса, розріз осадового чохла включає відклади від венду до антропогену, тоді як у східній — лише від крейди до антропогену. Структурний план як західної, так і східної частин монокліналі загалом простий і характеризується поступовим падінням осадових товщ у південно-західному та південному напрямках.

Осадова товща ДДЗ представлена породами від середньодевонських до четвертинних. Потужність товщі збільшується із заходу на схід від 0,5 км у районі Брагинсько-Лоївського виступу на межі з Прип'ятським прогином до 18—19 км на межі з Донбаською складчастою структурою. Тектонічні елементи різних порядків ДДЗ формувались унаслідок дії як вертикальних, так і горизонтальних рухів, серед яких переважають перші.

На рис. 7 нанесені ізосейсти, які відображають згасання інтенсивності струшувань за малою вибіркою (п'ять станцій). Параметри згасання інтенсивності визначались, в основному, за ізосейстами, проведеними вручну. При цьому параметри згасання дуже залежать від геотектонічної будови території України. Поведінка ізосейст у межах УЩ і ДДЗ добре узгоджується з картами, побудованих у публікаціях [Друмя и др., 1996; Кульчицкий, 2014] від підкорових гіпоцентрів землетрусів у зоні Вранча 1977, 1986 та 1990 рр.

При розгляді наведеної сейсмічності від потужних турецьких землетрусів особливу увагу автори приділили особливостям тектонічної будови території Кривбасу, де зафіксована місцева природна й техногенна сейсмічність, відбувається інтенсивний видобуток залізної руди, розташована контролююча її с/с «Кривий Ріг».

Загальна характеристика геологічної будови території Кривбасу. Криворізька структурно-фаціальна зона (синклінорії, монокліналь) розміщується у східній частині Західноінгулецько-Криворізько-Кременчуцької шовної зони, у зоні Криворізько-Кременчуцького коро-мантіяного розлому [Пігулевський та ін., 2016; Кендзера та ін., 2021; Пігулевський, 2022; Pihulevskiy et al., 2021, 2023]. На сході вона контактує з Саксаганським куполом, складеним древніми архейськими породами гранітоїдного та метабазит-ультрабазитового типу, на заході — з Інгулецьким валом, складеним неоархейськими породами переважно плагіогранітоїдного типу. У структурі виділяються синклінальні та антиклінальні складки високих порядків [Захаров та ін., 2002; Криворожская..., 2011; Кендзера та ін., 2021]. Шарнір синклінорію занурюється у північному напрямку. Максимальна глибина структури, розрахована за геофізичними даними, в районі рудників ім. XX Партійного з'їзду (Суша Балка) та ім. Р. Люксембург (Ходзинська) становить 7,0—7,5 км.

Східне крило синклінорію складене повним розрізом криворізької серії, західне — зрізане Західним і Тарапаківським розломами. Складність внутрішньої будови структури, вочевидь, пояснюється наявністю тут древньої зони субдукції, що підкреслюється потужною зоною протяжних сейсмічних площадок, які падають у низах кори на схід під кутами 40—45°, та потовщенням літосфери під цією зоною [Pihulevskiy et al., 2021, 2023].

Породи Криворізької структури, зім'яті в численні морфологічно різноманітні складки та розбиті серіями поперечних і поздовжніх розломів.

Найбільш прадавні утворення осадово-

го комплексу порід належать до відкладів палеогену (еоцен). Приуроченість еоценових утворень до мульдоподібних знижень кристалічного ложа обумовлює їхнє обмежене залягання у вигляді розрізнених острівців. Відклади еоцену представлені пісками, вуглистими глинами, бурим вугіллям, загальною потужністю від 25 до 42 м. Відклади палеогену вкриті шарами неогену сарматського й понтичного ярусів, представлених частою зміною шарів вапняків, глин і пісків загальною потужністю від 11 до 24 м.

Вище неогенових відкладів залягають четвертинні утворення із суцільним доволі потужним покривом на всій площі району, серед яких найпоширенішими є два різновиди суглинків:

- суглинки лесоподібні жовто-бурі й палево-жовті з частими карбонатними гніздами-прожилками із включеннями гіпсу;
- бурі й червоно-бурі суглинки й глини із включеннями карбонатів і гіпсу.

У долинах рік і глибоких ярів породи осадового комплексу (всі або частково) розмиті, а замість них відклалися алювіальні породи — піщано-глинисті й мулисті, що часто перешаровані.

Основні розривні тектонічні порушення. Криворізька структура усередині ускладнена великими розломами субмеридіонального простягання: Криворізько-Кременчуцьким (Західним), Тарапаківським, Саксаганським, Східним і Південно-Східним, які інтерпретовано як розриви, що визначають основну структурно-тектонічну лінію трансрегіонального Криворізько-Кременчуцького глибинного розлому коро-мантіяного закладення — західної межі Криворізької структури [Pihulevskiy et al., 2021, 2023]. Розлом трасується через всю кору за зміщенням сейсмічних відбивних елементів [Пігулевський та ін., 2016; Пігулевський, 2022] і простягається на 200 км і більше у північному та південному напрямках за межами УЩ [Гинтов, 2004], має західне падіння. З глибиною порушення змінює круте падіння на більш полого, кути падіння близько поверхні кристалічного фундаменту мають

Таблиця 6. Модель ґрунтової товщі району Мироліувівки м. Кривий Ріг

Літологія	ΔH , м	ρ , г/см ³	V_s , м/с
Суглинок важкий пілуватий	5	2,0	350
Глина легка пілувата	10	2,0	350
Глина важка пілувата	15	2,0	470
Вапняк тріщинуватий	15	2,2	650
Глина легка піщаниста	25	1,9	500
Кора вивітрювання — каоліни	20	2,1	600
Кора вивітрювання — жорства	10	2,2	800
Плагіограніти і плагіомігматити	—	2,6	2000

нахил 75—80° й більш полого в низах кори — до 45—55°.

Крім цих розломів у земній корі простежені також великі, майже ортогональні і оперяючі (зсувні) до нього тектонічні порушення, що виділяються за різкими зміщеннями сейсмічних горизонтів [Пігулевський та ін., 2016], змінами речовинного складу кори та іншими геолого-геофізичними ознаками.

Описані порушення фіксуються переважно різними видами крихких деформацій (брекчуванням, катаклазом, мілонітизацією), потужністю від перших до сотень метрів і більше. Нарівні з крихкими деформаціями в зонах розломів виявлені в'язкопластичні утворення.

Аналіз атрибутів локальних землетрусів та місць їх розміщення дає змогу припустити, що Криворізька тектонічна система та увесь східний фланг земної кори Західноінгулецько-Криворізько-Кременчуцької шовної зони з протерозою і донині є геодинамічно активною структурою,

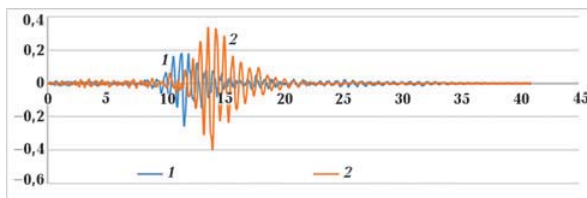


Рис. 8. Перераховані акселерограми з PGA=0,06 г та PGA=0,1 г на вільну поверхню району Мироліувівки м. Кривий Ріг.

Fig. 8. Recalculated accelerograms with PGA=0.06 g and PGA=0.1 g on the free surface of Myrolyubivka district, Kryvyi Rih.

де процеси насупної та зсувної тектоніки простежуються і на сучасному геологічному етапі, але вірогідно, з меншою амплітудою в часі [Pihulevskiy et al., 2023].

Амплітудно-частотна характеристика геологічного середовища. У пункті розташування с/с «Кривий Ріг» геологічний розріз представлений осадовим чохлам потужністю до 30 м, який перекриває кристалічні породи докембрійського фундаменту.

Проходження сейсмічних коливань через осадові шари, в разі віддалених землетрусів, залежить від кута падіння сейсмічних коливань на підшву осадового чохла, діаграми направленості випромінюваної енергії з вогнища, потужності осадових шарів на будівельних (експлуатаційних) майданчиках, геолого-геофізичних властивостей шарів, геоморфологічної будови району розташування досліджуваної ділянки. Великі прискорення руху ґрунту (PGA) можуть викликати розуцільнення та нелінійні ефекти і в ґрунтах що, в свою чергу, може викликати пошкодження споруд. Залежно від геометрії шарів, фізико-механічних і сейсмічних властивостей ґрунт на одних частотах може підсилювати інтенсивність сейсмічних коливань,

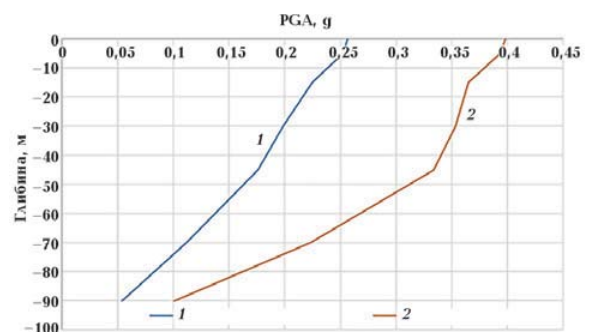


Рис. 9. Зміна PGA з глибиною в напрямку від корінних порід до вільної поверхні району Мироліувівки м. Кривий Ріг: 1 — EQ (PGA=0,06 г); 2 — EQ (PGA=0,10 г).

Fig. 9. PGA variation with depth from bedrock to the free surface of the Myrolyubivka district of Kryvyi Rih: 1 — EQ (PGA=0.06 g); 2 — EQ (PGA=0.10 g).

а на інших — послаблювати. Розглянемо як ґрунтова товща змінює амплітудний та частотний склад сейсмічних коливань, що поширюються крізь неї [Yoshida, 2014].

Для району Миролубівки м. Кривий Ріг, де розташована сейсмічна станція «Кривий Ріг», перераховано акселерограми (записи на корінних породах) на вільну поверхню ґрунту з метою оцінювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки на її вільній поверхні. Для вирішення поставленого завдання було обрано два записи землетрусів на корінних породах з $PGA=0,06$ g та $PGA=0,1$ g. Використано еквівалентно-лінійний метод моделювання відгуку ґрунту на сейсмічні навантаження і програмний пакет ProShake [EduPro Civil Systems].

Модель ґрунтової товщі району Миролубівки м. Кривий Ріг наведено в табл. 6.

На рис. 8 показано розраховані акселерограми на вільній поверхні району Миролубівки.

Отримані результати вказують на збільшення PGA на вільній поверхні відносно PGA на корінних породах (в обох випадках) приблизно в 4 рази. Рис. 9 ілюструє зміну PGA з глибиною в напрямку від корінних порід до вільної поверхні.

З графіка амплітудного спектра Фур'є бачимо, що максимальні PGA спостерігаються в частотному діапазоні від 1,2 до 1,75 Гц (рис. 10).

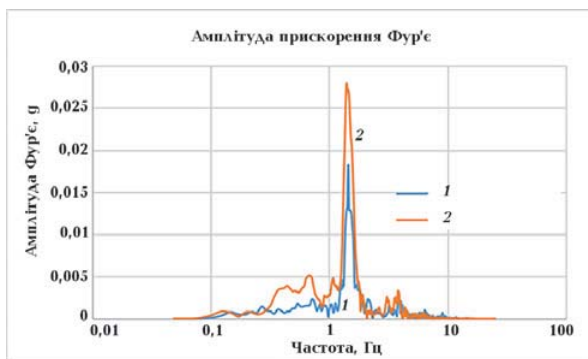


Рис. 10. Амплітудний спектр Фур'є сейсмічних коливань на вільній поверхні району Миролубівки м. Кривий Ріг: 1 — EQ ($PGA=0,06$ g); 2 — EQ ($PGA=0,10$ g).

Fig. 10. Amplitude Fourier spectrum of seismic motions on the free surface of Myrolyubivka district, Kryvyi Rih: 1 — EQ ($PGA=0.06$ g); 2 — EQ ($PGA=0.10$ g).

Таким чином, ґрунтова товща в районі Миролубівки, яка складена переважно суглинками та глинами, виявляє резонансні властивості в частотному діапазоні від 1,2 до 1,75 Гц. Теоретичне моделювання дало збільшення амплітуди сейсмічних коливань у вказаному діапазоні приблизно в чотири рази. Цивільні будівлі мають власні резонансні частоти в такому самому діапазоні (1—2 Гц), тому під час будівництва необхідно проводити детальні дослідження щодо запобігання резонансних ефектів і забезпечення сейсмостійкості будівель.

Вплив катастрофічних турецьких землетрусів 6 лютого на гідрогеодинамічне поле на території Кривбасу. Гідрогеологічні умови цієї території є доволі складними і характеризуються низкою чинників.

По-перше, у геологічному сенсі район представлений складним комплексом інтрузивних і метаморфічних порід докембрію, перекритих пухкими кайнозойськими відкладами, що мають велику строкатість літологічного складу.

По-друге, складна тектонічна будова площі обумовлює наявність більш протяжних зон подроблених і тріщинуватих порід, сприятливих для руху підземних вод в окремих районах, і майже повну відсутність подібних зон і великий розвиток насувних масивів різних кристалічних порід — в інших.

По-третє, наявність розвиненої яружно-балочної мережі, веде до несприятливих гідрогеологічних умов.

Результати гідрогеодеформаційного моніторингу, який проводить з грудня 2007 р. Дніпропетровська геофізична експедиція «Дніпрогеофізика» в розвідувальній свердловині завглибшки 815 м (рис. 11) з відносним статичним рівнем в ній води -106 м від денної поверхні [Пигулевский и др., 2009; Пигулевский, Свистун, 2011], засвідчують наявність загальних трендів у зниженні або підвищенні рівня води, але при цьому простежуються і часові інтервали їх швидкої (різкої) зміни, що пов'язано з дрібними неотектонічними рухами у Криворізько-Кременчуцькій шовній зоні. Графік вибірки коливань рівня підземної

води в моніторинговій свердловині з листопада 2022 р. по лютий 2023 р. з дискретом одне спостереження на добу (о 12:00) показано на рис. 11. На ньому бачимо, що коливання підземних вод пов'язане насамперед не лише з повільними неотектонічними рухами блоків земної кори, ф із більш швидкими геодинамічними процесами в зоні розлому [Тарасов, Бояркина, 2014; Li et al., 2023]. Останні є провісниками землетрусів, розшифрування яких підвищує ймовірність успішного прогнозу цих явищ [Nahornyi et al., 2020].

Зона Криворізько-Кременчуцького розлому на території Кривбасу, крім природного зниження рівня ґрунтових вод, що відображає повільні геодинамічні процеси в літосфері, також перебуває в стані високого мінливого рівня техногенного навантаження, яке пов'язане зі значними переміщеннями в просторі і часі величезних мас породи з кар'єрів і шахт у відвали та хвостосховища, що підвищує її чутливість до «швидких» неотектонічних процесів, які відбуваються у зонах розломів [Пигулевский, Свистун, 2011; Беседина и др., 2015]. Моніторинг таких процесів у середовищах за допомогою розташованих у їхніх межах моніторингових свердловин

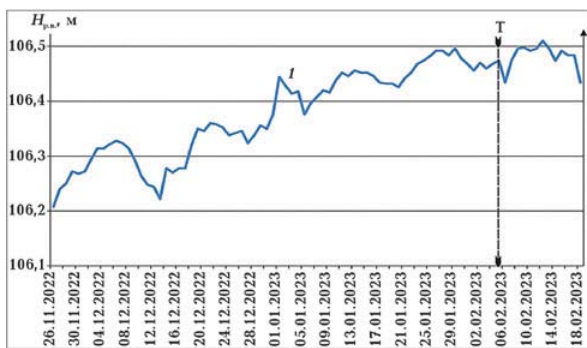


Рис. 11. Графік коливання рівня підземної води в глибокій моніторинговій свердловині з листопада 2022 р. по лютий 2023 р. (дискрет 24 год, відлік о 12 год (UTC)): 1 — рівень підземних вод в свердловині; Т — початок турецьких землетрусів.

Fig. 11. Graph of fluctuations of the groundwater level in a deep monitoring well from November 2022 to February 2023 (discrete 24 hours, counting at 12 hours (UTC)): 1 — level of groundwater in the well; T is the beginning of Turkish earthquakes.

дасть змогу виявити пружно-деформаційні зміни у тектонічній зоні, які відображають вияви потужних віддалених землетрусів та фіксують аномальні зміни перед сильними сейсмічними подіями. Величина впливу їх сейсmodинаміки може бути різною [Пигулевский и др., 2009]. Завдяки моніторинговим спостереженням фіксуються і локальні зміни геодинамічних процесів, що відбуваються після потужних землетрусів [Пигулевский, Свистун, 2011].

За зміни дискрету моніторингових спостережень (6 хв) у зазначеній свердловині (815 м) було зафіксовано реакцію підземної гідросфери на деформаційні процеси в літосфері Землі після турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р., першого — о 01 год 17 хв, 36,1 с з магнітудою 7,8 та другого — о 10 год 24 хв 49,6 с з магнітудою 7,5 (рис. 12). Результати аналізу отриманих даних засвідчують, що підземна гідросфера земної кори території Кривбасу дуже динамічна й чутлива не тільки до локальних змін, а й потужних зовнішніх тектонічних полів, які утворюють гідрогеодинамічну систему (гідрогеодеформаційне поле). Це дає змогу реєструвати її збурення на значній відстані від місця виникнення. Важливою властивістю згаданого поля є його реакція на зміни напруженого стану земної кори та верхньої мантії, що обумовлюється проце-

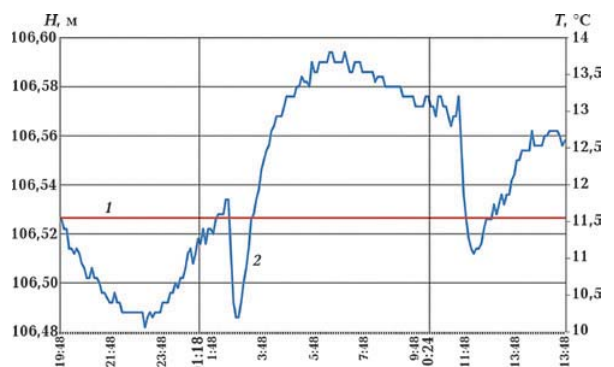


Рис. 12. Графік коливання рівня підземної води під час турецьких землетрусів 06 лютого 2023 р. (дискрет 6 хв): 1 — рівень підземних вод, м; 2 — температура підземних вод, °C.

Fig. 12. Graph of groundwater level fluctuations during the Turkish earthquakes on February 6, 2023 (discrete 6 min): 1 — groundwater level, m; 2 — underground water temperature, °C.

сами розуцільнення порід унаслідок геодинамічних зрушень у зонах розломів (Західний, Тарапаківський, Саксаганський, Східний та у дрібніших порушеннях), з подальшою зміною їх водонасиченості. Реакція підземних вод (див. рис. 12) на першу подію сталася о 2 год 24 (30) хв, тобто через 1 год 6 (12) хв з мінімумом у 2 год 42 (48) хв, амплітудою від 25 до 35 мм. Геологічне середовище відновилося о 3 год 30 хв. Реакцію підземних вод на другу подію зафіксовано в 11 год 30 (36) хв, тобто через 1 год 6 (12) хв з мінімумом в 12 год 06 (18) хв від 30 до 40 мм (див. рис. 12). Геологічне середовище відновилося о 12 год 36 (54) хв.

Як наведено в табл. 2 і 4, відстань від епіцентрів землетрусів до сейсмологічної станції «Кривий Ріг» дорівнює ~ 1309 км, а реакція геологічного середовища на фронт деформації розпочалася через 1 год 6 (12) хв. Отже, швидкість поширення фронту деформації у верхній частині літосфери дорівнює $\approx 19,0$ км/хв ($\pm 0,5$ км/хв).

З огляду на те, що було зафіксовано зниження рівня підземних вод у моніторинговій свердловині, можна зробити висновок, що після землетрусу відбулися короткоперіодні процеси розтягнення земної кори в цій частині Українського щита. **Втім за результатами спостережень в одній** свердловині неможливо однозначно встановити механізм процесу, який відбувався в зоні Криворізько-Кременчуцького розлому. Очевидним є лише те, що виникло загальне мікророзкриття зон Західного, Тарапаківського, Саксаганського, Східного розломів та їх сателітів. Взагалі, можливо допустити, що Європейська плита (південно-західна частина СЕП) зазнала вздовж лінії Середземне море — Чорне море (зона Тетису) насування на тектонічні плити — Анатолійську, Аравійську та Африканську. Передбачуваний нами процес охоплював весь південь і південний захід Європи, де відбулася ціла серія землетрусів різної магнітуди (див. рис. 1). При цьому на південь від гіпоцентрів потужних Турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р. вони не зафіксовані, що дає змогу припустити там існування «монолітної» області стиснення за

правостороннього зсуву (<https://www.emsc-csem.org>).

Висновки. 1. У результаті обробки цифрових записів турецьких землетрусів, зареєстрованих на сейсмологічних станціях України, і макросейсмічної інформації були отримані параметри інтенсивності струшування ґрунту в пунктах реєстрації: МІ05 (м. Одеса) і «Кривий Ріг» <3 балів, МІ06 (м. Кременчук) — 2 бали, МІ02 (м. Полтава) і МІ30 (с. Зелениця) — 1 бал.

2. Відповідно до карти-схеми ізосейст, згасання інтенсивності хвиль від турецьких землетрусів залежить від геотектонічної будови території України.

3. Моніторингові спостереження за рівнем води у розвідувальній свердловині зафіксували локальні зміни в геодинамічних (гідрогеодеформаційних) процесах, які відбулися після потужних турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р. о 01 год 17 хв 36,1 с з магнітудою 7,8 та о 10 год 24 хв 49,6 с з магнітудою 7,5. У літосфері на відстані ≈ 1300 км від епіцентрів землетрусів відбулися процеси у вигляді розуцільнення (розтягання) порід у зонах Західного, Тарапаківського, Саксаганського, Східного розломів та у дрібніших порушеннях. Розривно-тріщинні підземні води території Кривбасу відреагували на ці події через 1 год 6 (12) хв у вигляді пониження їх рівня на 2—3 см.

4. Швидкість поширення у верхній частині літосфери фронту деформації порід за моніторинговими спостереженнями становила $\approx 19,0$ км/хв ($\pm 0,5$ км/хв).

5. У результаті зафіксованих знижень рівня підземних вод у моніторинговій свердловині зроблено висновок, що після землетрусу відбулися короткоперіодні процеси розтягнення земної кори як у зоні Криворізько-Кременчуцького розлому, так і на Українському щиті.

6. Розраховані амплітудно-частотні характеристики геологічного середовища території м. Кривий Ріг показали, що максимальне пікове прискорення (PGA) на вільній поверхні збільшується відносно корінних порід приблизно в чотири рази. Максимальні PGA спостерігаються

в частотному діапазоні від 1,2 до 1,75 Гц.

7. Згідно з дослідженнями та розрахунками, місцеві землетруси інтенсивністю 4—5 балів можуть бути більш небезпечними для будівель Кривого Рогу, ніж землетруси такої самої потужності у зоні Вранча, Чорному морі або Туреччині.

8. Наведені дані засвідчують, що для під-

вищення рівня сейсмічної безпеки необхідно підвищувати вимоги до сейсмостійкості під час проєктування та будівництва нових або реконструкції старих будівель, з врахуванням сейсмічних властивостей ґрунтів [ДБН ..., 2014] та тектонічного стану території, через природні або техногенні процеси.

Список літератури

- Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Свинцов И.С., Пигулевский П.И., Свистун В.К., Щербина С.В. Отклик флюидонасыщенных коллекторов на лунно-солнечные приливы. Часть 1. Фоновые параметры приливных компонент в смещении грунта и уровне подземных вод. *Физика Земли*. 2015. № 1. С. 70—79.
- Геолого-геофизическая модель Криворожско-Кременчугской шовной зоны Украинского щита*. Ред. А.В. Анциферов. Киев: Наук. думка, 2006. 197 с.
- Геолого-геофизические критерии рудоносности и металлогения областей субдукции Украинского щита*. Ред. А.В. Анциферов. Донецк: Ноулидж, 2011. 285 с.
- Гинтов О.Б. Зоны разломов Украинского щита. Влияние процессов разломообразования на формирование структуры земной коры. *Геофиз. журн.* 2004. Т. 26. № 3. С. 3—24.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Ковачикова С., Логвинов И.М., Тарасов В.М., Усенко О.В. *Украинский щит (геофизика, глубинные процессы)*. Киев: Корвін прес, 2005. 210 с.
- Гордієнко Ю.О., Каплаушенко В.М. Сучасні інформаційно-комп'ютерні технології та мережа сейсмічних спостережень ГЦСК щодо упередження максимального сейсмічного ефекту від землетрусу в ближній зоні. *Вісник ЖДТУ. Сер. «Технічні науки»*. 2017. № 3(38). С. 61—71. [https://doi.org/10.26642/tn-2006-3\(38\)-61-71](https://doi.org/10.26642/tn-2006-3(38)-61-71).
- ДБН В.1.1-12:2014. *Будівництво в сейсмічних районах України*. (2014). Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1083#load>.
- Друмя А.В., Королев В.А., Москаленко Т.П., Про-
нишин Р.С., Пустовитенко Б.Г., Скляр А.М., Костюк О.П. Землетрясения Вранча 30 и 31 мая 1990 г. (макросейсмические данные). В кн.: *Землетрясения в СССР в 1990 году*. Москва: Изд. ОМФЗ РАН, 1996. С. 12—19.
- Захаров В.В., Мартинюк А.В., Токар Ю.Н. *Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200 000. Аркуші: М-36-XXXIV (Жовті Воги), L-36-IV (Кривий Ріг). Пояснювальна записка*. Київ: Геоінформ, 2002. 101 с.
- Кендзера О.В., Пигулевский П.Г., Андрущенко Ю.А. Особливості сейсмічності території Кривбасу. *Доп. НАН України*. 2021. № 6. С. 87—96. <https://doi.org/10.15407/dopovid12021.06.087>.
- Криворожская сверхглубокая скважина СГ-8*. Ред. Е.М. Шеремет. Донецк: Ноулидж, 2011. 556 с.
- Кульчицкий В.Е. Оценка параметров затухания интенсивности анизотропных макросейсмических полей. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 2. С. 138—149. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i2.2014.116127>.
- Пигулевський П.Г. Геотраверс Граніт: Оdesa — Кривий Ріг — Перещепине. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 6. С. 88—100. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273641>.
- Пигулевский П.И., Свистун В.К. Некоторые результаты автоматизированного мониторинга режима подземных вод асейсмичных территорий (на примере Днепропетровской области). *Минеральные ресурсы Украины*. 2011. № 2. С. 42—48.
- Пигулевський П.Г., Свистун В.К., Мечніков Ю.П., Кирилюк О.С., Лісовий Ю.В. Особливості диз'юнктивної тектоніки Криворізького залізорудного району. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 5. С. 154—163.

- Пигулевский П.И., Свистун В.К., Толкунов А.П. Использование данных мониторинга гидродеформационных характеристик подземных вод для прогнозирования тектонических процессов в массивах горных пород. *Науч. труды УкрНИИМИ НАНУ*. 2009. № 5. С. 122—131.
- Тарасов В.Н., Бояркина И.В. Момент инерции земного шара. *Омский научный вестник*. 2014. № 2(130). С. 9—11.
- Щербина С.В., Пигулевський П.Г., Гурова І.Ю., Амашукелі Т.А., Шумлянська Л.О., Калініченко О.А., Калітова І.А., Малицький Д.В., Нікулін В.Г., Вербицький С.Т. Сейсмічні події і тектоніка Кривбасу. *Геофиз. журн*. 2021. Т. 43. № 6. С. 248—265. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251566>.
- Тектонічна карта України. 1:1 000 000. Гол. ред. С.С. Круглов, Д.С. Гурський. Київ: Вид. УкрДГРІ, 2007.
- EduPro Civil Systems, Inc. ProShake 2.0. One-Dimensional, Equivalent Linear Ground Response Analysis. Retrieved from <http://www.proshake.com/>.
- Li, Y., Chen, X., & Chen, L. (2023). The Earth's Rotation-Related Seismicity as a Precursor to the 2023 Mw 7.8 Gaziantep, Turkey Earthquake. *Preprints*, 2023080209. <https://doi.org/10.20944/preprints202308.0209.v1>.
- Nahorny, V., Pigulevskiy, P., Svystun, V., & Shumlianska, L. (2020). To the question of verification of forecasting methods of earthquakes. *XIV Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*, 10—13 November 2020, Kyiv, Ukraine. *Extended Abstracts*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056080>.
- Pihulevskiy, P.G., Anisimova, L.B., Kalinichenko, O.O., Panteleeva, N.B., & Hanchuk, O.V. (2021). Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*, 1840(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018>.
- Pihulevskiy, P.H., Kendzera, O.V., Babiy, K.V., Anisimova, L.B., & Kyryliuk, O.S. (2023). Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 5—10.
- Sesetyan, K., Stucchi, M., Castelli, V., & Gomez Capera, A.A. (2023). *Kahramanmaras — Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report*. INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy. Retrieved from <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/>.
- Yoshida, N. (2014). *Seismic Ground Response Analysis*. Dordrecht: Springer, 365 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>.

Manifestations in Kryvbas of catastrophic Turkish earthquakes February 6, 2023

O.V. Kendzera¹, P.G. Pigulevskiy¹, Yu.A. Andrushchenko², Yu.V. Semenova¹, S.V. Shcherbina¹, V.K. Svystun³, O.O. Kalinichenko¹, O.I. Liashchuk², 2023

¹S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Main Center of Special Control of the State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Dnipropetrovsk geophysical expedition «Dniprogeofizika», Dnipro, Ukraine

We analyzed the impact of powerful Turkish earthquakes that occurred on February 6, 2023, including a magnitude 7.8 Mw earthquake at 01:17:36 (UTC) in Kahramanmarash—Gaziantep, a magnitude 6.7/6.3 Mw earthquake at 01:28:21 (UTC), and a magnitude 7.5 Mw earthquake at 10:24:50 in Ekinoz—Kahramanmarash, on the territory of Ukraine, particularly in the city of Kryvyi Rih. The study involved the examination of algorithms

for processing data recorded at seismic stations belonging to the S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Main Center for Special Control of the State Space Agency of Ukraine. The analysis of digital records from these Turkish earthquakes provided ground shaking intensity parameters at the recording points: Odesa and Kryvyi Rih had intensity levels below 3, Kremenchuk recorded 2, and Poltava and Kyiv registered 1. The resulting isoseismal map illustrates that the attenuation of wave intensity from the Turkish earthquakes depended on the geotectonic structure of the Ukrainian territory through which the seismic vibrations propagated.

The monitoring of the water level in a deep well recorded changes in geodynamic (hydrodeformation) processes following the powerful Turkish earthquakes on February 6, 2023. We found the level of fault-fracture groundwater in the territory of Kryvbas was affected by the earthquakes. The calculation of the propagation velocity in the upper part of the lithosphere of the rock deformation front showed a value of ≈ 19.0 km/min (0.5 km/min). Concurrently, a decrease in the groundwater level by 2–3 cm was recorded, making it possible to conclude that after the earthquake, short-period stretchings of the earth's crust occurred, both in the zone of the Kryvyi Rih—Kremenchutsky fault and over the Ukrainian Shield, in general.

The calculated amplitude-frequency characteristics for the geological environment on the territory of Kryvyi Rih revealed that the maximum acceleration of seismic vibrations on the free-soil surface increases relative to bedrock by about 4 times in the frequency range from 1.2 Hz to 1.75 Hz.

Key words: Turkish earthquakes, seismicity, geodynamics, hydrogeodynamics, groundwater, rock deformation, frequency characteristics.

References

- Besedina, A.N., Vinogradov, E.A., Gorbunova, E.M., Kabychenko, N.V., Svintsov, I.S., Pigulevskiy, P.I., Svistun, V.K., & Shcherbina, S.V. (2015). Response of fluid-saturated reservoirs to lunar-solar tides. Part 1. Background parameters of tidal components in ground displacement and groundwater level. *Fizika Zemli*, (1), 70–79.
- Antsiferov, A.V. (Ed.). (2006). *Geological-geophysical model of the Kryvorozh-Kremenchug suture zone of the Ukrainian Shield*. Kyiv: Naukova Dumka, 197 p. (in Russian).
- Antsiferov, A.V. (Ed.). (2011). *Geological-geophysical criteria of ore bearing and metallogeny of subduction regions of the Ukrainian Shield*. Donetsk: Noulidzh, 285 p. (in Russian).
- Gintov, O.B. (2004). Fault zones of the Ukrainian shield. The influence of fault formation processes on the formation of the structure of the earth's crust. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 26(3), 3–24 (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Zavgorodnyaya, O.V., Kovachikova, S., Logvinov, I.M., Tarasov, V.M., & Usenko, O.V. (2005). *Ukrainian Shield (geophysics, deep processes)*. Kiev: Koverin press, 210 p. (in Russian).
- Gordienko, Yu.O., & Kaplaushenko, V.M. (2017). State of the art information and computer technologies and the network of seismic observations of the MCSC in anticipation of the maximum seismic effect from an earthquake in the near zone. *Visnyk ZhDTU. Ser. «Tekhnichni nauky»*, (3), 61–71 (in Ukrainian).
- DBN V.1.1-12:2014. Construction in seismic areas of Ukraine. (2014). Retrieved from <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1083#load> (in Ukrainian).
- Drumya, A.V., Korolev, V.A., Moskalenko, T.P., Pronishin, R.S., Pustovitenko, B.G., Sklyar, A.M., Kostyuk, O.P. (1996). Vrancea earthquake of 30 and 31 May 1990 (macroseismic data). In *Earthquakes in the USSR in 1990* (pp. 12–19). Moscow: JIPE RAS Publ. (in Russian).
- Zakharov, V.V., Martyniuk, A.V., & Tokar, Y.N. (2002). State geological map of Ukraine. *Scale 1:200,000. Sheets: M-36-XXXIV (Yellow Waters), L-36-IV (Kryvyi Rig). Explanatory note*. Kyiv: Geoinform, 101 p. (in Ukrainian).
- Kendzera, O.V., & Pygulevsky, P.G., Andrushchenko, Yu.A. Peculiarities of the seismicity of the territory of Kryvbas. *Dopovidi NANU*, (6), 87–96. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.06.087> (in Ukrainian).

- Sheremet, E.M. (Ed.). (2011). *Kryvyi Rih super-deep well SG-8*. Donetsk: Noulidge, 556 p. (in Russian).
- Kulchitskiy, V.E. (2014). Valuation of extinction parameters of anisotropic macro-seismic wave intensities. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 36(2), 138—149. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i2.2014.116127> (in Russian).
- Pigulevskyy, P.G. (2023). Geotraverse Granite: Odesa—Kryvyi Rih—Pereschepine. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 44(6), 88—100. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273641> (in Ukrainian).
- Pigulevskiy, P.G., & Svistun, V.K. (2011). Some results of the groundwater regime automated monitoring in aseismic territories (on the example of the Dnipropetrovsk region). *Mineral resources of Ukraine*, (2), 42—48 (in Russian).
- Pigulevskyy, P.G., Svistun, V.K., Mechnikov, Y.P., Kyrylyuk, O.S., & Lisovoy, Y.V. (2016). Features of disjunctive tectonics of Krivoy Rog iron ore area. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 38(5), 154—163. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i5.2016.107829> (in Ukrainian).
- Pigulevskiy, P.G., Svistun, V.K., & Tolkunov, A.P. (2009). Using data from monitoring of hydrodeformation characteristics of groundwater for forecasting tectonic processes in rock massifs. *Scientific works of UkrNIMI NASU*, (5), 122—131 (in Russian).
- Tarasov, V.N., & Boyarkina, I.V. (2014). Moment of inertia of the globe. *Omskiy nauchnyy vestnik*, (2), 9—11 (in Russian).
- Shcherbina, S.V., Pigulevskyy, P.G., Gurova, I.Yu., Amashukeli, T.A., Shumlianska, L.O., Kalinichenko, O.A., Kalitova, I.A., Malyskiy, D.V., Nikulin, V.G., & Verbytskiy, S.T. (2021). A study of the properties of the tectonic structure of the Kryvyi Rih city based on statistical analysis of seismicity. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 43(6), 248—265. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251566>.
- Kruglov, S.S., & Gurskiy, D.S. (Eds.). (2007). *Tectonic map of Ukraine. 1:1.000.000*. Kyiv: UkrDGRI Publ. House (in Ukrainian).
- EduPro Civil Systems, Inc. ProShake 2.0. One-Dimensional, Equivalent Linear Ground Response Analysis. Retrieved from <http://www.proshake.com/>.
- Li, Y., Chen, X., & Chen, L. (2023). The Earth's Rotation-Related Seismicity as a Precursor to the 2023 Mw 7.8 Gaziantep, Turkey Earthquake. *Preprints*, 2023080209. <https://doi.org/10.20944/preprints202308.0209.v1>.
- Nahornyi, V., Pigulevskiy, P., Svystun, V., & Shumlianska, L. (2020). To the question of verification of forecasting methods of earthquakes. *XIV Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», 10—13 November 2020, Kyiv, Ukraine. Extended Abstracts*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056080>.
- Pihulevskiy, P.G., Anisimova, L.B., Kalinichenko, O.O., Panteleeva, N.B., & Hanchuk, O.V. (2021). Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*, 1840(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018>.
- Pihulevskiy, P.H., Kendzera, O.V., Babiy, K.V., Anisimova, L.B., & Kyryliuk, O.S. (2023). Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 5—10.
- Sesetyan, K., Stucchi, M., Castelli, V., & Gomez Capera, A.A. (2023). *Kahramanmaraş — Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report*. INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy. Retrieved from <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/>.
- Yoshida, N. (2014). *Seismic Ground Response Analysis*. Dordrecht: Springer, 365 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>.