

УДК 504.4.054

Г. І. РУДЬКО, д-р геол.-мінерал. наук, д-р геогр. наук, д-р техн. наук, професор (Державна комісія України по запасах корисних копалин), м. Київ, office@dkz.gov.ua, ORCID-0000-0001-7752-4310,

Є. О. ЯКОВЛІВ, д-р техн. наук (Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України), м. Київ, yakovlev@niss.gov.ua

РЕГІОНАЛЬНІ ТЕХНОГЕННІ ЗМІНИ ЕКОЛОГО-ГЕОДИНАМІЧНИХ УМОВ РОЗРОБКИ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ КРИВБАСУ

У статті наведено дослідження інженерно-геологічних умов Кривбасу. Визначено головні чинники техногенних змін екологічного стану геологічного середовища в процесі розробки родовищ залістистих кварцитів. Великий гірничодобувний комплекс Кривбасу є складною природно-техногенною геосистемою з переважно незворотним використанням сировинних ресурсів, відновлювана здатність якої є досить низькою. Крім того, в останні десятиріччя тут спостерігається активний розвиток інженерно-сейсмогеологічних процесів, зумовлений комплексною дією природної і техногенної сейсмічності. Для подальшого вдосконалення оцінок еколого-геологічного впливу негативних природних і техногенних чинників на ПТГС Кривбасу потрібно суттєво поліпшити системи моніторингу геологічного середовища через запровадження сучасніших технологій та створення постійних моделей.

Ключові слова: геологічне середовище, геохімічний ландшафт, Кривбас, геофільтраційна система, техногенні зміни, рудопородний масив, водопрпливи, сейсмічність.

G. Rudko, Dr. of Geological and Mineralogical Sciences, Dr. of Geographical Sciences, Dr. of Technical Sciences, Professor (State Commission of Ukraine for Mineral Resources), Kyiv, office@dkz.gov.ua, Ye. Yakovlev, Dr. of Technical Sciences (Institute of Telecommunications and Global Information Space, NAS of Ukraine), yakovlev@niss.gov.ua

REGIONAL TECHNOGENIC CHANGES IN ECOGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE DEVELOPMENT OF IRON ORE DEPOSITS IN KRYVBAS

The article deals with the study of geotechnical conditions in Kryvbas. The major factors of technogenic changes in an ecological state of the geological environment during development of ferruginous quartzite deposits have been determined. The big mining complex in Kryvbas is a complex natural-technogenic geosystem with the mainly irreversible use of raw material resources the renewable ability of which is quite low. One of the main factors of the environmental impact of PGTS Kryvbas is the formation of significant volumes of mineralized waters of man-made origin with the subsequent leakage of a large number of soluble salts beyond the boundaries of the basin. Besides, in the last decades the active development of engineering-seismic-geological processes caused by a complex action of natural and technogenic seismicity can be observed here. Fundamentally new changes in the ecological and geological conditions of Kryvbas can be considered associated with the growing influence of seismic and geophysical processes of natural and man-made origin (explosive and mechanical fluctuations of the rock mass) due to the active interaction of artificial fracturing, technogenic water saturation of the upper layer of rocks and existing tectonic disturbances. For further improvement of estimates of the ecogeological impact of negative natural and technogenic factors on Kryvbas NTGS it is necessary to improve essentially a geological environment monitoring system by means of implementation of up-to-date technologies and creation of currently operating working models.

Keywords: geological environment, geochemical landscape, Kryvbas, geofiltration system, technogenic changes, ore-bearing massif, water inflow, seismic activity.

Вступ. В Україні залізні руди видобувають на Кривбасі – у межах Південнобілозерського й Кременчуцького залізрудних районів. Тут нині склалися найскладніші еколого-геологічні умови видобутку мінеральної сировини, сформувалася регіональна природно-техногенна геосистема (далі – ПТГС) “гірничодобувний комплекс–довкілля” з переважанням незворотних змін життєзабезпечувальних складників навколишнього природного середовища: геохімічних ландшафтів, геологічного середовища, поверхневої гідросфери та біосфери [2, 5, 8–10].

Відповідно до виконаних оцінок загальна площа Криворізької ПТГС у межах зони відчуження (далі – ЗВ) становить 700 км² за сумарної площі гірничих відводів 350 км² (50 % ЗВ). Нині в межах Кривбасу діють п'ять гірничо-збагачувальних комбінатів (далі – ГЗК), на яких видобуток залізних руд здійснюють на десяти кар'єрах та на 23 (орієнтовно з допоміжними) шахтах обсягом до 83 млн т/рік. Загальна площа кар'єрів перевищує 42 км², їхній об'єм сягає 6,6 млрд м³

(6,6 км³) з глибинами 300–400 м. У межах басейну сформувалися 44 породні відвали загальною площею 69 км² і об'ємом понад 1,7 млрд м³. Десять функціювальних шламосховищ мають сумарну площу поверхні 71 км². У них заскладовано 1,6 млрд м³ відходів збагачування залізних руд.

Недосконалий гідрогеофільтраційний захист більшості гідротехнічних споруд, великі фільтраційні втрати з них та інженерних мереж промислових і житлових комплексів в умовах погіршення природного дренажу призвели до активного розвитку техногенного підтоплення, площа якого сягає 500 км² або 70 % загальної площі ПТГС Кривбасу [1, 2, 5, 11, 12].

Головні результати досліджень. Дослідження інженерно-геологічних умов Кривбасу, які провело Міністерство екології та природних ресурсів України, Інститут геологічних наук України, ДКЗ України, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Український державний геологорозвідувальний інститут та ін., засвідчили розвиток у верхньому шарі водоненасичених порід (зона аерації) процесу гіперфільтрації, під час якого надходження техногенних вод перевищує фільтраційну здатність підстильних

порід, що спричинило формування техногенного водоносного горизонту як гідрофізичного підґрунтя регіонального підтоплення промислово-міського комплексу Кривбасу. Водночас дренальний вплив шахт завглибшки до 1200–1500 м зумовив формування в тріщинуватій зоні рудно-кристалічних порід регіональної депресійної лійки, відносна рівновага рівнів якої в межах локальних субдепресій переважно забезпечується ненасиченою фільтрацією вод з техногенного водоносного горизонту (так званий режим “дощування”).

У геопросторовому плані депресійна лійка охоплює зони активного, сповільненого та утрудненого водообміну (відповідно – ЗАВ, ЗСВ та ЗУВ), що призводить до значних варіацій мінералізації шахтних і кар’єрних вод, ускладнює умови їхнього накопичення, поводження та водовідводу, а також умови розкриття і розробки рудних тіл.

За весь період індустріального розвитку Кривбасу в зоні впливу його ПТГС сформувалася депресійна лійка завдовжки понад 80 км та завширшки 6–7 км із середньою глибиною до 600 м, у межах гідрогеофільтраційної системи якої об’єм умовно осушених порід сягає 190 км^3 [1, 3, 12].

Загальна величина водовідводу за умов регіонального впливу вищезазначеної гідрогеофільтраційної системи (за орієнтовними оцінками) становить 36–40 млн $\text{м}^3/\text{рік}$.

Аналіз структури водного балансу Криворізької ПТГС (на початок 2010-х років) дав змогу встановити такі величини джерел формування загального водоприпливу в гірничі виробки:

- дренавання ємнісних запасів (порово-тріщинний складник) підземних вод під час розкриття гірничими виробками “свіжих” ділянок рудно-кристалічного породного масиву – до $0,2 \text{ м}^3/\text{сек}$ (орієнтовно 13 %);
- подавання води з поверхні для пилопридушення – до $0,25 \text{ м}^3/\text{сек}$ (18–20 %);
- техногенна інфільтрація з хвостосховищ – $0,35 \text{ м}^3/\text{сек}$ (до 30 %);
- техногенна інфільтрація з міських територій – до $0,23 \text{ м}^3/\text{сек}$ (18 %);
- техногенна інфільтрація з проммайdanчиків – $0,11 \text{ м}^3/\text{сек}$ (8,2 %);
- інфільтрація з річкової мережі (у дренавальному контурі депресійної лійки) – $0,03 \text{ м}^3/\text{сек}$ (до 2 %);
- природна інфільтрація атмосферних опадів (у дренавальному контурі депресійної лійки) – до $0,05 \text{ м}^3/\text{сек}$ (до 3,5 %).

Аналіз вищенаведених даних щодо структури формування балансу водоприпливів у гірничі виробки свідчить, що до 80 % їхнього загального обсягу формується завдяки техногенним джерелам, що потребує вдосконалення оцінок інженерно-гідрогеологічних умов розкриття і розробки рудних родовищ, а також схем підрахунку запасів. Крім того, витoki з них забезпечують розвиток комплексу небезпечних гідрогеофільтраційних, гідрогеодинамічних та гідрогеохімічних процесів:

- формування ділянок стійкого підтоплення й затоплення земель;
- зменшення міцнісної здатності покривних осадових порід та ускладнення інженерно-геологічних умов експлуатації житлових і промислових будівель;
- активізація зсувних, осідальних, карстово-суфозійних та інших небезпечних екзогенних геологічних процесів;
- зменшення стійкості бортів кар’єрів, укосів дамб і підроблених ділянок породного масиву;
- розвиток ділянок електрохімічної корозії залізобетонних і металевих підземних конструкцій з наступним скороченням термінів безпечної експлуатації;

– техногенне зростання (до 1–3 балів) сейсмічних струшувань природного й техногенного походження.

Головні чинники техногенних змін екологічного стану геологічного середовища в процесі розробки родовищ. Одним з провідних чинників екологічного впливу ПТГС Кривбасу є формування чималих обсягів мінералізованих вод техногенного походження з наступним витоком великої кількості розчинних солей за межі басейну. Головним джерелом сольової міграції є поверхневий і підземний стік р. Інгулець, яка є регіональною дренажною Кривбасу.

Результати аналізу величин мінералізації основних джерел формування водоприпливів у гірничі виробки шахт дають змогу дійти висновку, що здебільшого вона не перевищує $2,5\text{--}3,0 \text{ г}/\text{дм}^3$; тільки для порово-тріщинних джерел сягає $135\text{--}145 \text{ г}/\text{дм}^3$ і більше та для інфільтраційних витоків перевищує $20\text{--}25 \text{ г}/\text{дм}^3$.

Упродовж багатьох десятиліть загальне солевинесення з поверхневим і підземним стоком за межі ПТГС Кривбасу становило $0,036 \text{ т}/\text{сек} \approx 1,1 \text{ млн т}/\text{рік}$. Переважне надходження сольового стоку Кривбасу в басейн р. Інгулець супроводжується аномальним забрудненням річкового стоку, а також засоленням великих площ земельних угідь (десять тисяч гектарів Інгулецької системи, прилеглих територій Дніпропетровської, Херсонської та Миколаївської областей, рис. 1, 2).

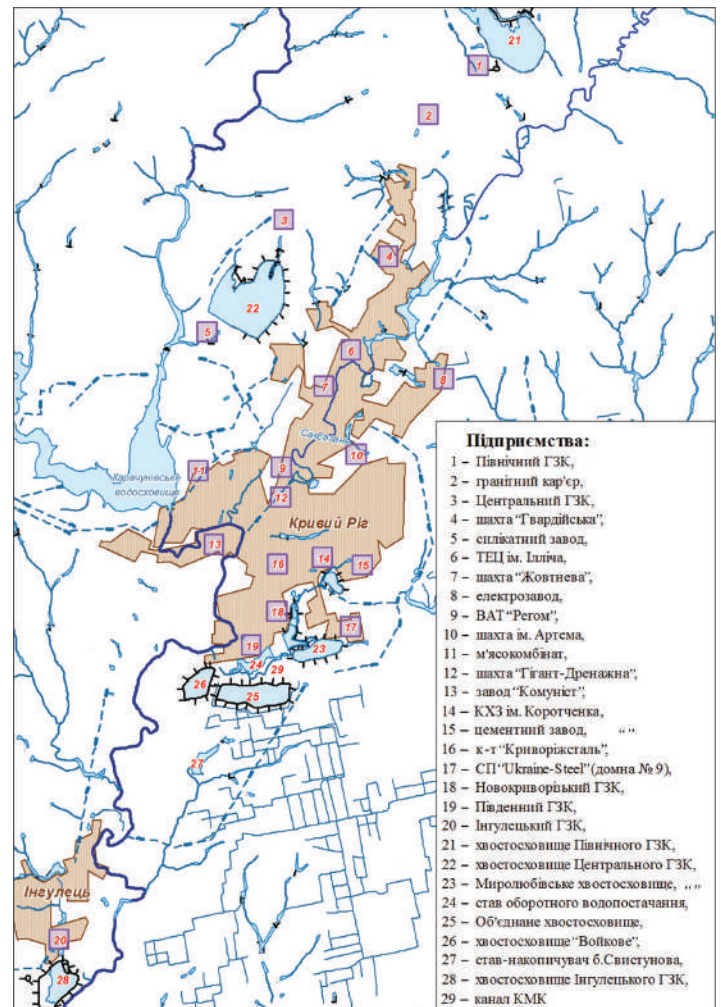


Рис. 1. Схема розміщення підприємств та об’єктів забруднення природних вод басейну рр. Інгулець та Саксагань (у межах Кривбасу)

Отже, екологічні межі ПТГС Кривбасу за умов суттєвого скорочення асиміляційного потенціалу геологічного середовища (далі – АПГС) регіону потребують сучасного уточнення на основі врахування незворотності техногенних змін більшості екологічних параметрів верхньої зони літосфери, яка є підґрунтям рівноважного функціонування й розвитку біосфери, гідросфери та приземної атмосфери [1, 3, 5].

Чіткіше це можна бачити з порівняння потенціалів відновлення біосфери та геологічного середовища за умов різного рівня порушення надр ПТГС Кривбасу й зони аварійного впливу ЧАЕС (табл. 1).

З табл. 1 можна дійти висновку, що провідним чинником зменшення геомеханічної стійкості рудно-породного масиву та зростання техногенної тріщинуватості й проникності

покривних і кристалічних порід є буровибухова технологія гірничодобувних робіт (далі – ГДР). За орієнтовними даними на Кривбасі щорічно відбувається до 200 масових вибухів (40–80 т і більше вибухової речовини – ВР), а загальне використання ВР сягає 80–90 тис. т/рік за видобутку до 90 млн т/рік рудопородної маси (далі – РПМ). Таким чином, середнє питоме використання ВР сягає 0,9 кг/1 т РПМ.

За нормативними даними середня енерговидатність вибухового перетворення 1кг ВР тринітролоуолового складу сягає:
 $q = 3,1 \text{ кДж/кг} = 3,1 \cdot 10^8 \text{ ерг/кг}$.

Отже, щорічне промислове використання на Кривбасі ВР у кількості $P_T = 90 \cdot 10^3 \text{ т}$ ($90 \cdot 10^6 \text{ кг}$) еквівалентне виділенню сейсмичної енергії E_c в кількості:

$$E_c = P_T \cdot q = 90 \cdot 10^6 \text{ кг} \times 3,1 \cdot 10^8 \text{ ерг/кг} = 0,28 \cdot 10^{17} \text{ ерг}$$

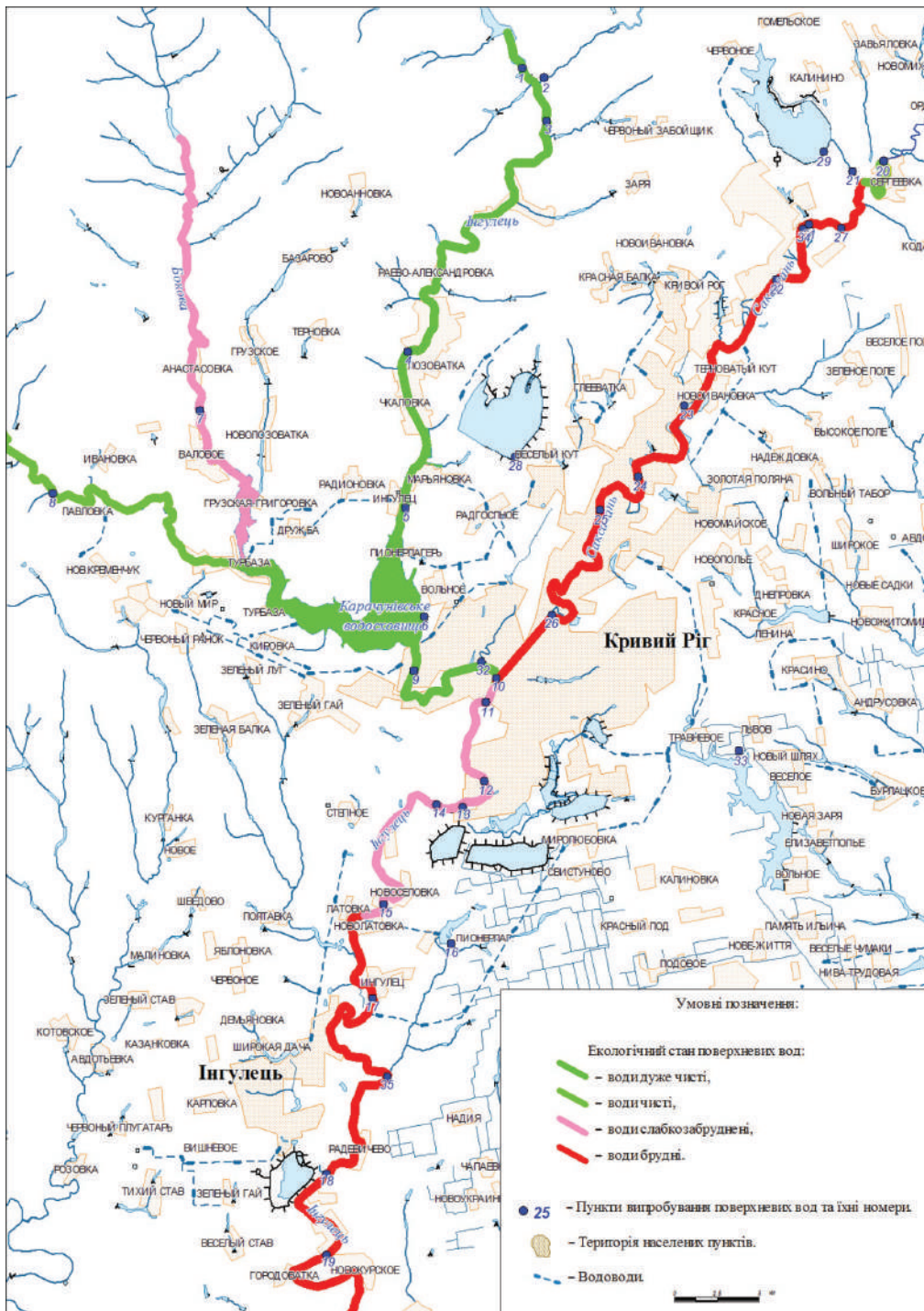


Рис. 2. Екологічна оцінка якості поверхневих вод у басейні р. Інгулець у періоди скидів надлишків зворотних вод у 2002–2003 і 2003–2004 рр.

Таблиця 1. Екологічне порівняння техногенних змін геологічного середовища зони впливу природно-техногенної геосистеми Кривбасу та зон відчуження і безумовного (обов'язкового) відселення Чорнобильської АЕС

Типи екологічних впливів на НПС	Рівень техногенних змін геологічного середовища	
	Територія ПТГС Кривбасу	Зона аварійного впливу Чорнобильської АЕС
1. Ландшафтно-геохімічні	Поліелементне незворотне забруднення геохімічних ландшафтів, донних відкладів з руйнуванням форм рельєфу	Автореабілітаційне очищення (до 90 % – до 2035 р. за сучасними нормативами геохімічних ландшафтів і верхньої зони ГС)
2. Літосферні – порушення рівноваги надр як верхньої зони геологічного середовища	Розвиток у межах ПТГС руйнівних просідань, зрушень, техногенного тріщиноутворення	Відсутність змін верхньої зони літосфери за межами проммайданчика
3. Гідрологічні: критичні зміни режиму та якості стоку поверхневих водних об'єктів (поверхнева гідросфера)	Регіональне стійке забруднення поверхневого стоку внаслідок надходження шахтних і технологічних вод, підроблення русел	Короткочасне радіонуклідне забруднення поверхневого шару наземних водних об'єктів
4. Гідрогеологічні: підземні води (підземна гідросфера)	Формування регіональної депресії зі зміщенням границь вод різної мінералізації зон активно, сповільненого та утрудненого водообміну (ЗАВ, ЗСВ, ЗУВ)	Слідові (на рівні регіонального фону) надходження радіонуклідів у ґрунті та обмежено в напірні водні горизонти
5. Газогеохімічний, включно з приземним шаром атмосфери в зоні життєдіяльності	Насичення верхньої зони літосфери й приземної атмосфери токсичними газами природного (радон, метан та ін.) і техногенного походження (вибухового тощо) у зоні впливу гірничих робіт	Короткочасне аварійне забруднення приземної атмосфери радіонуклідами та аерозолями, короткочасний природний або техногенний вітропилловий підйом
6. Інженерно-геологічний	Регіональне порушення рівноваги в системі “вода–мінеральний скелет порід”, активізація небезпечних екзогенних геологічних процесів	Практична відсутність змін інженерно-геологічних умов породного масиву (за винятком проммайданчика)
7. Інженерно-сейсмогеологічний	Зниження сейсмічної (інженерно-сейсмогеологічної) стійкості породного масиву в зоні впливу гірничих робіт на 1–3 бали, формування зон локальних гідромеханічних напруг та гірничих ударів (землетрусів), підвищення ризику деформацій та руйнувань площинних і лінійних споруд (трубопроводи, залізниці тощо)	Відсутній, можливі незначні деформації порід в основі будівель на проммайданчику ЧАЕС під час телесеїсмічних процесів (транзитних землетрусів)

За даними “Сводной таблицы примерных соотношений между магнитудой, энергией и эпицентральной сотрясаемостью” [12] локальне вибухове енерговиділення в скельному породному масиві в кількості 10^{17} – 10^{19} ерг еквівалентне сейсмічному струшуванню силою до 4-ох балів за шкалою МСК–64.

За індустріальний період розвитку ПТГС Кривбасу (із середини XIX ст.) з рудопородних геологічних структур Кривбасу було вилучено до 6 млрд т мінеральної сировини, тобто створено загальний об'єм гірничих виробок $V_{гв} \approx 2$ млрд m^3 . Таким чином, середня товщина умовного шару вилучення порід (так званого “дефіциту маси”) Δ у межах гірничого відводу Кривбасу загальною площею $S = 358$ km^2 становить:

$$\Delta = V_{гв} / S = 2 \cdot 10^9 m^3 / 358 \cdot 10^6 m^2 \approx 5,6 \text{ м.}$$

Для порівняння можна навести подібну оцінку цієї характеристики щодо ПТГС Донбасу в разі загального вилучення порід $V_{гв} = 10$ млрд m^3 на загальній площі гірничого відводу $S = 6,0$ тис. km^2 . За таких умов середнє вилучення порід становитиме:

$$\Delta = V_{гв} / S = 10 \cdot 10^9 m^3 / 6000 \cdot 10^6 m^2 = 1,7 \text{ м.}$$

Треба врахувати, що в геологічному розрізі Кривбасу переважають міцні рудокристалічні породи, які не здатні до пластичних деформацій за істотного “дефіциту маси” з одночасним регіональним розвитком техногенної тріщинуватості, тектонічних порушень та техногенного водоносного горизонту в покривних крихких породах (табл. 2, 3). У цих умовах, як свідчить сучасний досвід гірничодобувних робіт, періодичне виконання масових вибухів та інтенсивне струшування верхньої зони породного масиву формує високі ризики провальних деформацій поверхні в межах зон впливу площ сучасних і торішніх гірничих робіт [1, 3, 4, 7].

Крім того, наявність у верхній зоні геологічного розрізу техногенного водоносного горизонту й ділянок контакту поверхні ґрунтових вод з фундаментами будівель сприяє суттєвому під-

вищенню їхніх струшувань і ризику руйнівних деформацій. Показовим у плані подальшого техногенного ускладнення інженерно-сейсмогеологічних умов уже освоєних і нових родовищ Кривбасу можна вважати катастрофічне обвалення під час вибухових робіт породного масиву на шахті “Орджонікідзе” 2010 року (рис. 3) загальною площею 0,16 km^2 (160 тис. m^2) та завглибшки 40–45 м (загальний об'єм провалля до 7 млн m^3).

Виконані дослідження дають змогу зробити висновок, що великий гірничодобувний комплекс Кривбасу в просторово-часовому плані є складною ПТГС з переважно незворотним використанням мінерально-сировинних ресурсів, коли порушується рівноважна взаємодія системи “літосфера–біосфера” і відбувається забруднення всіх життєзабезпечувальних складників навколишнього природного середовища (ґрунтів, гідросфери, приземної атмосфери тощо) здебільшого з перевищенням гранично допустимої концентрації (ГДК).

За умов зупинення видобутку мінеральної сировини здатність до відновлення екологічних параметрів у межах зони ековпливу ГДР мають приземна атмосфера та поверхнева гідросфера внаслідок підвищеної величини масо-енергообміну. Відновлювальна здатність підземної гідросфери з малими швидкостями водообміну є незначною (у 1000 разів меншою), а в літосфері її майже немає.

У цих умовах збільшення руйнувань рівноваги між літосферою й біосферою з різними рівнями їхньої відновлювальної здатності в складі ПТГС можна розглянути за такою схемою впливу техногенних навантажень “комплекс гірничодобувних робіт–відновлювальна реакція біосфери”.

Для спрощення оцінок приймають схему монотонного (лінійного) зростання техногенних порушень згодом за залежністю:

$$P = qt, \quad (1)$$

Таблиця 2. Узагальнені еколого-геологічні дані про джерела формування та мінералізацію складників водопрпливів у гірничі виробки шахт і кар'єрів Кривбасу

№ з/п	Головні джерела формування водопрпливів	Величина водопрпливу, м ³ /сек (%)	Мінералізація вод джерел водопрпливу, г/дм ³	Потенційний еколого-геологічний вплив
1	Спрацювання ємнісних (статичних) запасів	0,23 (16,5)	40–145	Осушення породного масиву
2	Виробничо-технологічне подавання води у виробки	0,29 (21,0)	1,0–2,0	Зниження мінералізації шахтних вод
3	Інфільтрація з хвостосховищ	0,41 (32,0)	4,5–21,5	Активізація підтоплення земель, забруднення стоку поверхневих і ґрунтових вод
4	Інфільтрація з ділянок міської забудови	0,25–16,5	До 2–3	Активізація підтоплення, зниження міцності підгрунтя, розвиток корозії, зниження сейсмостійкості
5	Інфільтрація з ділянок промислової забудови	0,5 (10,6)	До 2–5	
6	Інфільтрація з річок	0,03 (2,0)	До 2–5	
7	Природна інфільтрація атмосферних опадів	0,051 (4,0)	До 1,5–2,5 M _{ср} = 20–25 Загальне солевинесення до 1,1 млн т/рік	Зниження мінералізації шахтних вод, стабілізація природного гідрогеохімічного фону
Усього			≈ 1,4	

Таблиця 3. Узагальнені дані щодо техногенно-геологічної структури розробки залізрудних родовищ Кривбасу

№ з/п	Гірничозбагачувальні комбінати	Кар'єри		Відвали		Шламсховища	
		Площа, км ²	Об'єм, км ³	Площа, км ²	Об'єм, км ³	Площа, км ²	Об'єм, км ³
1	Інгулецький	3,2	0,6	2,7	0,13	4,22	0,27
2	Південний	5,0	1,5	9,1	0,27	12,20	0,40
3	Новокриворізький	10,0	1,3	12,0	0,30	8,20	0,25
4	Центральний	3,9	1,7	9,2	0,30	12,70	0,30
5	Північний	9,4	2,2	9,8	0,45	17,70	0,30
6	Усього по Кривбасу (осушено до 50 км ² породного масиву, зони обвалення – до 17 км ²)	31,5	7,3	42,8	1,45	55,02	1,52

де q – щорічний приріст техногенних порушень геологічного середовища (верхньої зони надр), t – час функціонування ПТГС. Одночасно враховують, що процес гірничодобувних робіт супроводжується зменшенням екоресурсу біосфери від початкового R_0 зі швидкістю α до поточного:

$$R_t = R_0 - \alpha t. \quad (2)$$

З екологічних положень відомо, що коли

$$R_t = R_0 - \alpha t = [P = qt], \quad (3)$$

то в подібному еколого-ресурсному балансі є можливим перехід ПТГС у нерівноважний еколого-техногенний стан.

З огляду на те, що згідно із залежністю (3) нерівноважний стан ПТГС формується за умов такого еколого-ресурсного балансу $R_0 - \alpha t = qt$, то умовний час t^* цього еколого-техногенного стану дорівнюватиме:

$$t^* = R_0 / (\alpha + q) \quad (4)$$

Зважаючи, що для умов будь-якого ГДР $q > \alpha$, можна



Рис. 3. Загальний вигляд провалу денної поверхні на Кривбасі на полі шахти ім. Орджонікідзе (світлина І. М. Малахова)

дійти висновку, що порушення в процесі гірничодобувних робіт мінерально-породного балансу будь-якої геологічної структури дуже швидко призводить майже до незворотних змін екологічного стану ГС і пов'язаної з нею біосистеми.

Додатково можна зазначити, що мінімальні порушення екологічних параметрів довкілля в зоні впливу ГДР можливі тільки в разі максимального збереження масо-енергообміну літосфери, насамперед гідрогеомеханічної рівноваги рудо-породної товщі. Сьогодні більшість розвинутих ГДР України за умов чималих накопичень “дефіциту маси” внаслідок розробки з вилученням великих обсягів мінеральної сировини та цілковитим обваленням покривних порід у разі скорочення виробництва втрачають рівновагу ПТГС і формують комплекс негативних змін довкілля з неабияким погіршенням безпеки життєдіяльності.

До принципово нових чинників техногенних змін екологічних параметрів геологічного середовища Кривбасу треба зарахувати просторово-часовий розвиток в останні десятиріччя інженерно-сейсмогеологічних процесів, зумовлених комплексною дією природної і техногенної сейсмічності.

Еколого-геологічний вплив техногенних змін сейсмогеофізичного режиму геологічних структур Кривбасу. Активний розвиток інструментальних спостережень у світі за останні роки засвідчив, що для давніх платформ також характерні сучасні деформації, хоча й повільніші, ніж на їхніх краях. Деформації супроводжуються землетрусами. Ці висновки ініціювали ґрунтовніше дослідження даних про “внутрішньоплитові” землетруси.

На Східноєвропейській платформі (далі – СЄП), зокрема в межах України, вогнища землетрусів виявлено майже повсюдно. Магнітуда землетрусів здебільшого невелика – 3–4, рідше 5–5,5 балів, а інтенсивність струсів у епіцентрі в разі найсильніших подій не перевищувала 7 балів [1, 3, 4, 7]. Відповідно до історичних відомостей, а також згідно з картою ізосейстів і гіпоцентрів землетрусів локальні сейсмічні події, що проявилися з інтенсивністю струсів у 5–7 балів, відбувалися в низці регіонів України. Найпотужніші з них були в Кіровоградській області (поблизу межі з Черкаською – 7 балів (1873 р.), Донецькій – 6±1 бал (район Костянтинівки, 1937 р.), Харківській – 5–6 балів (1858 р. і 1913 р.) і Чернігівській – 5±1 бал (1905 р.).

Природно-техногенна геосистема Кривбасу розміщена в складній тектонічній зоні, тут відбувається зчленування великих тектонічних структур, що розрізняються історією розвитку, складниками порід і переважною орієнтацією складчастих і розривних структур.

Тому для виявлення сейсмонебезпечних зон на Українському щиті (УЩ) та суміжних ділянках підрозділи НАН України та Міністерства екології України [4, 7] дослідили загальні сеймотектонічні закономірності прояву сейсмічності на територіях інших давніх платформ (акад. В. І. Старостенко, чл.-кор. О. В. Кендзера). На прилеглих до УЩ територіях виділено Передкарпатсько-Дністровську, Прип'ятсько-Дніпровсько-Донецьку та Північнопричорноморську сеймотектонічні провінції. У межах Прип'ятсько-Дніпровсько-Донецької провінції (що важливо для оцінки сейсмонебезпечності геологічних структур Кривбасу в природному та техногенно порушеному стані) крайові зони порушень представлені як сейсмогенні – з $M_{\max} = 4,5$.

З погляду на сучасну природно-техногенну геодинамічну та еколого-геологічну нестабільність ПТГС Кривбасу, яка підсилюється регіональною техногенною тріщинуватістю,

на особливу увагу заслуговують морфоструктурно-неотектонічні вузли. Характерною їхньою ознакою є високий ступінь тектонічної роздробленості, що простежується у верхній частині осадового чохла, а також підвищений вплив на ускладнення інженерно-сейсмогеологічних умов техногенних перетворень рельєфу й активізації екзогенних геологічних процесів (підтоплення, зсувоутворень тощо).

Як зазначено, зокрема в ДБН В.1.1-12:2006 “Будівництво у сейсмічних регіонах України”, місцева руйнівна сила землетрусу залежить, крім енергії поштовху, від рельєфу місцевості, властивостей гірських порід, які її складають (літологічного складу ґрунтів), та водного режиму. На ділянках, складених крихкотілими водонасиченими ґрунтами, сейсмічне прискорення може бути в 1,5–2 рази більшим, ніж на тих ділянках, де залягають щільніші ґрунти.

Однак наведене не вичерпує всіх чинників, що формують сейсмічний ризик для складної структури залізорудних родовищ Кривбасу за умови активного виконання гірничодобувних робіт з використанням бурильно-вибухових технологій.

Виятком є підтоплені ділянки. Для них методом інженерно-гідрогеологічних аналогій Є. О. Яковлев [3, 11] обґрунтував залежність часу існування напружено-деформованого стану водонасичених порід підґрунтя (підвищеного порового тиску $t_{\text{пор}}$) під час проходження природного або техногенного сейсмопоштовху (швидкість 1,0–1,5 км/с) за умов підтоплення фундаментів споруд. Набагато більший час існування підвищеного порового тиску, порівнюючи з часом проходження сейсмопоштовху (частка секунди), формує небезпеку виникнення додаткових гідрогеомеханічних напруг під час афтершоків, унаслідок чого можливе локальне розрідження порід підґрунтя й розвиток критичних деформацій споруд.

Час існування первинного підвищення порового тиску в підґрунті з огляду на геометрію фундаменту загалом оцінюють за такою залежністю:

$$t_{\text{пор}} \approx 0,2 b^2 / a_p,$$

де b – мінімальний розмір фундаменту в плані, м; a_p – коефіцієнт рівнепровідності водонасичених порід підґрунтя, який визначають за залежністю:

$$a_p = k h / \mu,$$

де k – коефіцієнт фільтрації порід підґрунтя, м/добу; h – товщина шару ґрунтових вод, м; μ – коефіцієнт водовідатності (поруватості) порід ґрунтового горизонту.

Для супіщано-суглинистих різновидів $t_{\text{пор}}$ становить 1–10 діб.

Ризик критичного гідрогеомеханічного впливу порового тиску на зростання струшування й деформацій будівель та породного масиву засвідчують виявлені додаткові порушення конструкцій зруйнованого 4-го блоку ЧАЕС після землетрусу 30–31 травня 1990 року.

Принципово нові зміни еколого-геологічних умов Кривбасу можна вважати пов'язаними зі зростальним впливом сейсмогеофізичних процесів природного й техногенного походження (вибухові та механічні коливання породного масиву) унаслідок активної взаємодії штучної тріщинуватості, техногенного водонасичення верхнього шару порід і наявних тектонічних порушень.

До головних чинників порушень геомеханічної рівноваги породного масиву в межах шахтних і кар'єрних полів треба зарахувати велику кількість просторово-розподілених масових промислових вибухів (до 200 епізодів на рік) з додатковим формуванням техногенних тріщинуватих зон у межах шахтних і кар'єрних полів, розвитком імпульсних полів гід-

рогеомеханічних напружень з ризиком руйнівних деформацій породного масиву, денної поверхні, підгрунтя промислових і житлових споруд, об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ – трубопроводи, шляхи, мости тощо).

Крім того, треба зважати на те, що вибухові струшування породного масиву мають випадковий (стохастичний) характер, що не усуває прямої взаємодії з транзитними (зона Вранча) і локальними землетрусами [4, 7]. Зростання деформаційних проявів споруд, денної поверхні й порід у зонах геодинамічного впливу шахтних і кар'єрних гірничих робіт може бути зумовлене остаточними підвищеннями порового тиску в крихких осадових ґрунтах підгрунтя. Загалом на сучасному етапі функціонування техногенно-геологічних систем (далі – ТГС) Кривбасу “технологічний комплекс–ГС” треба зазначити неабияку невизначеність формування інженерно-сейсмогеологічних умов та реакції промислових і житлових споруд та ОКІ. Головним чином це пов'язано з тим, що під час вибухів і руху сейсмохвиль відбувається тимчасове індукування порового тиску, час існування якого залежить від проникності водонасичених порід і збільшується в глинистих і суглинистих слабопроникних породах. Крім того, осадові лесово-суглинисті просідні породи в межах Кривбасу мають ослаблені водонасичені прошарки, що за умов природних і техногенних струшувань може призводити до їхнього розрідження, порушення суцільності та небезпечних деформацій інженерних споруд.

За результатами сейсмогеофізичних досліджень [4, 7] встановлено, що, порівнюючи з локально розосередженими промисловими й житловими об'єктами, максимальний вплив природно-техногенні сейсмострушування мають на лінійні споруди (трубопроводи, шляхи, мости тощо). Водночас на ділянках розміщення всіх об'єктів має місце накопичення в підгрунті сейсмодеформаційних впливів з розвитком процесів втомленості, пластифікації або розрідження ґрунтів [4, 7, 9].

Аналіз змін екологічних параметрів ГС Кривбасу засвідчує, що додатковим ускладнювальним чинником інженерно-сейсмогеологічних умов Криворізької промислово-міської агломерації (ПМА) є зростання площ підтоплення й водонасичення поверхневого шару порід. Унаслідок цього зменшується загасання сейсмохвиль і підсилюється їхній деформаційний (руйнівний) вплив.

Сучасна гідрогеодинамічна схема Криворізької регіональної ПТГС переважно відображає порушені умови формування потоків техногенного водонасного горизонту й фрагментів ґрунтового та їхні зв'язки з низхідними фільтраційними потоками над депресійними ліяками в трищінному горизонті рудопородного масиву. За цих умов техногенно-ґрунтовий горизонт розвивається як головний шлях перерозподілу енергії сейсмічних струшувань та їхньої трансформації в поля порово-породних напружень у верхній зоні ГС.

У цих умовах, як свідчать дані комплексного аналізу матеріалів ДЗЗ, структури лінеаментних утворень і параметрів структурно-геологічної будови й тектоно-геофізичного плану Кривбасу [4, 7], інженерно-гідрогеологічний складник сейсмічної небезпеки регіону зумовлений переважно глибинами рівнів ґрунтових вод (РГВ), здатністю покривних порід до пластифікації, просідань, бубнявіння тощо. З результатів досліджень щодо формування гідрогеодеформаційних полів та їхнього впливу на інженерно-сейсмологічну стійкість ТГС (проф. Г. С. Варталян, проф. А. В. Лушчик, проф. Г. І. Рудько, проф. О. М. Трофимчук та ін., 1990, 2002) впливає, що збіль-

шення струшуваності (інтенсивності) найвірогідніше пов'язано з глибинами РГВ від поверхні землі такою залежністю:

$$\Delta I = K \cdot e^{-0,04h/2},$$

де ΔI – збільшення струшуваності, бали; h – глибина РГВ, м; K – коефіцієнт, який враховує мінливість інженерно-геологічних умов; за різними джерелами коливається від 1,0 (для простих інженерно-геологічних умов) до 1,8 (складні умови, наявність слабких недоуцільнених прошарків, мулових укралень тощо).

На ділянках формування ТГС житлової забудови, промайданчиків у межах ПТГС Кривбасу переважні глибини ґрунтових вод сягають 2–4 м. Таким чином, збільшення струшуваності ΔI з огляду на гідрогеодеформаційний вплив РГВ на порушення рівноваги системи “мінеральний скелет ґрунту–порова вода” сягатиме в разі глибини рівня ґрунтових вод 2–5 м (для складних інженерно-геологічних умов $K \approx 1,8$):

$$\Delta I \approx 1,8 \cdot e^{-0,04h/2} = 1,8 / (1,18 \div 1,67) \approx 1,5 \div 1,1 \text{ бала.}$$

Варто взяти до уваги, що розрахункові величини зростання струшуваності ΔI в еколого-геологічному плані більше наближені до зниження сейсмостійкості внаслідок короткочасових підвищень порового тиску у водонасичених піщано-суглинистих породах з таким зниженням зчеплення й можливістю локальних пливунотворень та концентрації напружень. У цих умовах дуже важливими показниками щодо інтегральних оцінок інженерно-сейсмологічних умов та їхніх прогнозних змін є величина можливого зменшення глибини ґрунтових вод у межах ПТГС Кривбасу [1, 3, 4, 7–10].

Зважаючи на можливість подальших техногенних змін інженерно-гідрогеологічного режиму ПТГС Кривбасу, особливо його гірничо-промислової частини (збільшення глибин шахт і кар'єрів, площ і напорів шламо-хвостосховищ тощо), удосконалення визначення параметрів еколого-геологічного впливу інженерно-сейсмогеологічних чинників потребує здійснення таких оцінок:

- 1) зміни структури потоків ґрунтових вод за умов подальшого зменшення їхніх глибин;
- 2) глобального ризику збільшення транзитних землетрусів зони Вранча (Румунія) та нових вогнищ місцевих землетрусів;
- 3) впливу скорочення площ у верхній зоні ГС інженерно-гідрогеологічних елементів (геоморфологічні, ландшафтні форми тощо) з підвищеним рівнем здатності до релаксації сейсмічних напружень і ризику локальних ущільнень ґрунту з тимчасовим збільшенням порового тиску та наступним зниженням водонасиченості;
- 4) впливу мінливості фільтраційних параметрів ґрунтового горизонту та порід зони потенційного водонасичення;
- 5) впливу на формування інженерно-сейсмогеологічних умов регіону Кривбасу таких гідрогеологічних чинників: наявність водонасичених глинистих прошарків, зон з низькими геодформаційними показниками (зокрема блоків рудокристалічних порід у межах лінеаментних структур) і можливістю тимчасових порушень суцільності ГС у зоні крихких осадових порід (пливунотворення, колоїдизації, концентрованого розсіювання сейсмічної енергії та ін.);
- 6) взаємозв'язку параметрів структурно-геологічного, тектоно-геофізичного, лінеаментного та інженерно-гідрогеологічного плану з часом зниження порового тиску в слабопроникних породах з огляду на те, що навіть зі сталим природним сейсмічним фоном у межах ПТГС Кривбасу зростає вплив техногенного сейсмічного складника.

У зв'язку з вищенаведеним можна зробити висновок, що поточна й прогнозна оцінки еколого-геологічного склад-

ника змін інженерно-сейсмогеологічних умов Кривбасу потребують використання пофакторних карт з відображенням генералізованої інформації ДЗЗ, удосконалення сейсмогеофізичного моніторингу в складі екомоніторингу довкілля, а також гідрогеофільтраційного прогнозного моделювання та сейсмомікрогеофізичного моніторингу об'єктів критичної інфраструктури ПТГС Кривбасу.

Висновки

1. Криворізька природно-техногенна геосистема є однією з найскладніших в Україні за сукупними еколого-техногенними й соціально-економічними параметрами.

2. Подальший розвиток ПТГС Кривбасу буде пов'язаний з переважним впливом техногенних чинників порушень рівноваги водо-енергообміну літосферного складника та гідрогеологічних характеристик геологічного середовища.

3. Наявна система моніторингу геологічного середовища потребує суттєвого вдосконалення з огляду на зростаючий вплив геоенергетичних та сейсμοінженерно-геологічних змін ПТГС Кривбасу.

Головними напрямками розвитку й реконструкції системи екомоніторингу Кривбасу мають стати запровадження технологій ГІС, дистанційного зондування Землі та створення постійних математичних моделей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Багрій І. Д., Блінов П. В., Белокопитова Н. А. та ін. Геоекологічні проблеми Криворізького басейну в умовах реструктуризації гірничодобувної галузі/І. Д. Багрій, П. В. Блінов, Н. А. Белокопитова, Ю. Г. Вилкул, Ю. Я. Власенко, П. Ф. Гожик, М. Г. Голярчук, С. Г. Грищенко, М. Ю. Євтушенко, Д. В. Земський. – К.: Фенікс, 2002. – 190 с.

2. Геологія і корисні копалини України: Атлас/гол. ред. Л. С. Галецький; НАН України, Ін-т геолог. наук, УЦПГТ “Геос-XXI століття”. – К.: ДП “Такі справи”, 2001. – 168 с.

3. Довгий С. О., Іванченко В. В., Коржнев М. М. та ін. Асиміляційний потенціал геологічного середовища України та його оцінка/[С. О. Довгий, В. В. Іванченко, М. М. Коржнев (наук. ред.), М. М. Курило, О. М. Трофимчук, С. М. Чумаченко, Є. О. Яковлев, М. В. Беліцька] НАН України, Інститут телекомунікацій і глобал. інформ. простору. – К.: Ніка-Центр, 2016. – 172 с.

4. Кендзера О. В. Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів (практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Суботіна НАН України)//Вісник Національної академії наук України. – 2015. – № 2. – С. 44–57.

5. Рудько Г. І., Плотніков О. В., Радованов С. В. Геолого-економічна оцінка окиснених залізистих кварцитів у залізисто-кременистих формаціях докембрію Українського щита/Г. І. Рудько, О. В. Плотніков, С. В. Радованов; Державна служба геології та надр України, Криворізький національний університет. – Чернівці: Бу-рек, 2012. – 328 с.

6. Сейсмический риск и инженерные решения/Под ред. Ц. Ломница и Э. Розенблота. – М.: Недра, 1981. – 374 с.

7. Старостенко В. І., Кендзера О. В., Лісовський Ю. В., Семінова Ю. В. Розвиток сейсмологічної мережі на території України для цілей сейсмічного захисту//Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. – К.: ІГНС, 2011. – Вип. 19. – С. 144–150.

8. Трофимов В. Т., Королєв В. А., Герасимова А. С. Классификация техногенных воздействий на геологическую среду//Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 1995. – № 5. – С. 96–107.

9. Трофимчук А. Н., Гомилко А. М., Савицкий О. А. Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред/А. Н. Трофимчук [и др.]; НАН Украины, Институт гидромеханики, Совет национальной безопасности и обороны Украины, Украинский ин-т исследований окружающей среды. – К.: Наукова думка, 2003. – 230 с.

10. Шнюков Е. Ф., Шестопалов В. М., Яковлев Е. А. и др. Экологическая геология Украины: справочное пособие/АН Украины, Институт геологических наук; отв. ред. Е. Ф. Шнюков [и др.]. – К.: Наукова думка, 1993. – 408 с.

11. Яковлев Е. А. О структуре оценки и управления экологическим риском геологической среды//Геологический журнал. – 1992. – № 3. – С. 11–16.

12. Яковлев Е. А., Литвак Д. Р., Кухар В. В. Применение принципов геоэнергетики при прогнозе региональных изменений гидро- и инженерно-геологических условий//Геологический журнал. – 1984. – № 1. – С. 69–75.

REFERENCES

1. Bahrii I. D., Blinov P. V., Bielokopytova N. A., Vylkul Yu. H., Vlasenko Yu. Ya., Hozhyk P. F., Holiarchuk M. H., Hryshchenko S. H., Yevtushenko M. Yu., Zemskiy D. V. Geoecological problems of the Kryvyi Rih basin in terms of mining restructuring. – Kyiv: Feniks, 2002. – 190 p. (In Ukrainian).

2. Haletskiy L. S. Geology and Minerals of Ukraine. – Kyiv: DP “Taki spravy”, 2001. – 168 p. (In Ukrainian).

3. Dovhyi S. O., Ivanchenko V. V., Korzhnev M. M., Kurylo M. M., Trofymchuk O. M., Chumachenko S. M., Yakovliev Ye. O., Belitska M. V. Assimilation potential of the geological environment of Ukraine and its estimation. – Kyiv: Nika-Tsentr, 2016. – 172 p. (In Ukrainian).

4. Kendzera O. V. Seismic hazards and protection against earthquakes (practical implementation of the development of the SI Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine)//Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. – 2015. – № 2. – P. 44–57. (In Ukrainian).

5. Rudko H. I., Plotnikov O. V., Radovanov S. V. Geological and economic evaluation of oxidized ferruginous quartzites in the iron-siliceous formations of the Precambrian Ukrainian Shield. – Chernivtsi: Bukrek, 2012. – 328 p. (In Ukrainian).

6. Lomnica C., Rozenblyut Je. Seismic risk and engineering solutions. – Moskva: Nedra, 1981. – 374 p. (In Russian).

7. Starostenko V. I., Kendzera O. V., Lisovskiy Yu. V., Semenova Yu. V. The development of a seismological network in Ukraine for seismic protection purposes//Zbirnyk naukovykh prats Instytutu heokhimii navkolyshnoho seredovyscha. – Kyiv: IHNS, 2011. – Iss. 19. – P. 144–150. (In Ukrainian).

8. Trofimov V. T., Koroljov V. A., Gerasimova A. S. Classification of technogenic impacts on the geological environment//Geojekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. – 1995. – № 5. – P. 96–107. (In Russian).

9. Trofymchuk A. N., Gomilko A. M., Savickij O. A. (2003). The dynamics of porous-elastic liquid-saturated environments. – Kiev: Naukova dumka, 2003. – 230 p. (In Russian).

10. Shnyukov Ye. F., Shestopalov V. M., Yakovlev E. A. Ecological geology of Ukraine: reference book. – Kiev: Naukova dumka, 1993. – 408 p. (In Russian).

11. Yakovlev E. A. On the structure of assessment and management of environmental risk of the geological environment//Geologicheskij zhurnal. – 1992. № 3. – P. 11–16. (In Russian).

12. Yakovlev E. A., Litvak D. R., Kuhar V. V. The application of the principles of geoenergy in the forecast of regional changes in hydro- and engineering-geological conditions//Geologicheskij zhurnal. – 1984. – № 1. – P. 69–75. (In Russian).

Рукопис отримано 7.02.2018.