

© М.В. Петльований¹¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕНИХ ЗОН ОБВАЛЕННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ВІД ВПЛИВУ ПІДЗЕМНОЇ РОЗРОБКИ КРУТОСПАДНИХ РУДНИХ ПОКЛАДІВ В УМОВАХ КРИВБАСУ

© М. Petlovanyi¹¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

FEATURES OF SURFACE SUBSIDENCE ZONES FORMED UNDER THE INFLUENCE OF UNDERGROUND MINING OF STEEPLY DIPPING ORE DEPOSITS IN THE KRYVYI RIH IRON ORE BASIN

Мета. Вивчення провальних зон у Криворізькому залізорудному басейні (КЗБ) з урахуванням їх просторового розташування, геометричних параметрів, динаміки розвитку та факторів формування, зумовлених застосованими системами розробки рудних покладів, а також оцінка їх техногенно-екологічного впливу на природні та інфраструктурні об'єкти регіону.

Методика. Дослідження ґрунтується на аналізі супутникових знімків та ГІС-інструментів Google Earth для ідентифікації та вимірювання геометричних параметрів провалів. Використано функцію побудови профілів рельєфу для визначення ширини, глибини та площі провальних зон, а також аналіз динаміки їх розширення у часі.

Результати. Ідентифіковано у Кривбасі станом на сьогодні 15 активних провальних зон загальною площею понад 170 га. Виявлено тенденцію зміни між геометричними параметрами провальних зон і геотехнічних умов розробки рудних покладів, що проявляється у варіації коефіцієнта форми провалу. Визначено динаміку змін площ провальних зон упродовж кількох десятиліть, що свідчить про поступове зменшення швидкості їх розширення після досягнення критичної глибини розробки. Зафіксовано нерівномірний характер розвитку окремих провалів: для частини зон характерне плавне розширення, тоді як в інших спостерігалися періоди раптових обвалень, пов'язаних із зсувними процесами у виробленому просторі. Доведено, що засипання пустими породами не забезпечує довготривалої стабільності та може спричиняти вторинні обвалення, особливо у зонах зі складними гідрогеологічними умовами або значними підземними пустотами.

Наукова новизна. Запропоновано використання коефіцієнта форми для оцінки геометричних параметрів провалів та умов їх формування. Виконано системний аналіз історичної динаміки змін площі провалів і встановлено закономірності їх розширення у просторі та часі.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування подальшого розвитку провальних зон, оцінки ризиків їх впливу на промислові та інфраструктурні об'єкти, а також для розробки альтернативних методів ліквідації провалів із метою довготривалої геомеханічної стабілізації регіону.

Ключові слова: провальні зони, залізорудна шахта, зсувні процеси, геометрична форма, динаміка розвитку, засипання пустими породами, техногенна та екологічна небезпека.

Вступ. Одним із ключових наслідків видобування корисних копалин є порушення верхнього шару літосфери, що супроводжується значними геомеханічними та екологічними змінами [1–3]. Геомеханічна трансформація надр

проявляється у формуванні зон просідання земної поверхні та кар'єрних пустот, які спричиняють зниження стабільності масиву гірських порід і зміну його напружено-деформованого стану. Екологічний вплив виражається у деградації ґрунтів, втраті їх родючості, зменшенні біорізноманіття та порушенні природного балансу екосистем [4, 5]. Ці техногенні процеси створюють серйозні виклики для сталого розвитку та ефективного управління природними ресурсами гірничодобувних регіонів.

Особливої уваги заслуговують деформації земної поверхні у формі зон осідання та обвалень, спричинені підземним видобутком корисних копалин, оскільки, на відміну від відкритих гірничих робіт, де контурами кар'єрів управляє людський фактор, їх утворення може мати динамічний і раптовий характер. Такі процеси є некерованими та важко передбачуваними, що значно ускладнює їх контроль та мінімізацію наслідків для техногенної безпеки населення, об'єктів поверхневої інфраструктури та стану довкілля.

При розробці традиційними системами розробки пологих і похилих пластових родовищ, наприклад, вугільних пластів, деформації земної поверхні відбуваються, здебільшого, у формі зон плавного осідання, що обумовлено поступовим перерозподілом напружень у масиві гірських порід та меншою глибиною залягання пластів [6]. Проте, при розробці крутоспадних покладів, таких як рудні родовища, на земній поверхні утворюються більш руйнівні форми – глибокі провальні зони [7]. У цьому випадку основна частина порід у висячому боці покладу залишається без опори, що спричиняє утворення зон концентрації напружень поблизу меж порожнини, яка утворюється в результаті видобутку. Це призводить до раптового руйнування порід у цих зонах через перевищення їх міцності. У результаті, провальні зони формуються швидше і мають динамічний характер, створюючи серйозні ризики для безпеки прилеглих територій.

Так, аналіз даних державного моніторингу стану земної поверхні показує суттєві відмінності у величинах деформацій земної поверхні в різних вугледобувних і рудних басейнах України [8]. У Львівській області, де розробляються тонкі пологі вугільні пласти, осідання земної поверхні сягають до 4,0 м. У Донецькій і Луганській областях величина осідань досягає 7,0 м через розробку похилих і крутих вугільних пластів на значній глибині. У Криворізькому залізорудному басейні (КЗБ) фіксується середня величина зон осідань земної поверхні вже 15,0 м, проте, крім цього земна поверхня значно порушена глибокими руйнівними формами – провальними зонами шахт глибиною 50–150 м, при цьому найглибший провал сягає позначки 280,0 м.

Згідно світової практики підземної розробки родовищ, проблеми попередження деформацій земної поверхні здатне вирішити застосування методів видобування корисних копалин із застосуванням закладання виробленого простору, особливо з формуванням монолітних закладних масивів [9–11]. Це пояснюється тим, що у міру відпрацювання рудного покладу за глибиною при його заміні монолітним закладним масивом формується штучна опора, яка сприяє перерозподілу напружень у масиві, компенсуючи руйнівні вертикальні та горизонтальні напруження, що забезпечує цілісність масиву висячого боку покладу.

Проте, на шахтах Кривбасу системи розробки із закладанням не знайшли поширення й вже понад 100 років підземна розробка рудних покладів здійснюється двома видами систем розробки: підповерхове обвалення руди та порід і підповерхово-камерна система розробки [12, 13]. Саме відсутність закладного масиву в підземних пустотах шахт спричинила масштабні руйнування земної поверхні глибокими провальними зонами [14], що у різні часи призвело до переселення людей з селищ, руйнування об'єктів інфраструктури й навіть загибелі людей. Всі 8 діючих шахт вже перетнули рівень критичної глибини розробки, коли проходила основна фаза зсувних процесів та обвалень і сьогодні геомеханічні процеси відбуваються у фазі стабілізації зсувних процесів. Проте, у регіоні фіксуються ознаки подальшого розвитку провальних зон в умовах другої фази, що потребує досліджень та систематизації.

Незважаючи на наукові досягнення вчених щодо розвитку геомеханічних процесів при розробці крутоспадних покладів Кривбасу, особливості утворених провальних зон на земній поверхні, їх геометричні параметри, складання типізації, вивчення динаміки їх розвитку після завершення активної фази зсувних процесів та аналіз ефективності існуючих методів ліквідації є недостатньо вивченими та потребують заповнення цієї наукової прогалини.

Метою дослідження Вивчення провальних зон у Криворізькому залізорудному басейні (КЗБ) з урахуванням їх просторового розташування, геометричних параметрів, динаміки розвитку та факторів формування, зумовлених застосованими системами розробки рудних покладів, а також оцінка їх техногенно-екологічного впливу на природні та інфраструктурні об'єкти регіону.

Методика досліджень. У роботі дослідження розвитку провальних зон шахт розглядаються на прикладі шахт КЗБ. Першочергово здійснюється ідентифікація існуючих відкритих провальних зон шляхом детального вивчення стану земної поверхні у програмі Google Earth вздовж західної частини м. Кривий Ріг, де простягається основний залізорудний пояс басейну. У зв'язку з недостатньою на сьогодні вивченістю поточного стану провальних зон досліджуються їх геометричні параметри. Для цього використано можливості програми Google Earth, яка дозволяє аналізувати рельєф місцевості та отримувати точні значення висотних відміток. Основним методом визначення параметрів провалів є функція «Показати профіль рельєфу», яка дає змогу будувати поперечні розрізи поверхні вздовж заданої лінії. За допомогою цього інструменту для кожної ідентифікованої провальної зони визначено її максимальну глибину (H) та ширину (B) в поперечному напрямку (вхрест простягання рудного покладу) (рис. 1). Одним з основних питань є визначення динаміки зміни площ провальних зон у часі після досягнення критичної глибини розробки рудних покладів, що характерно для всіх діючих шахт КЗБ. У дослідженні розглядається група з 5-ти існуючих сьогодні провальних зон, що ілюструється на рис. 2, утворених від впливу підземного видобутку діючої шахти «Козацька» та закритої шахти «Комсомольська».

Методика дослідження еволюції провальних зон у часі базується на використанні ГІС-технологій та аналізі історичних супутникових знімків, що дозволяє простежити динаміку змін їх геометричних параметрів.

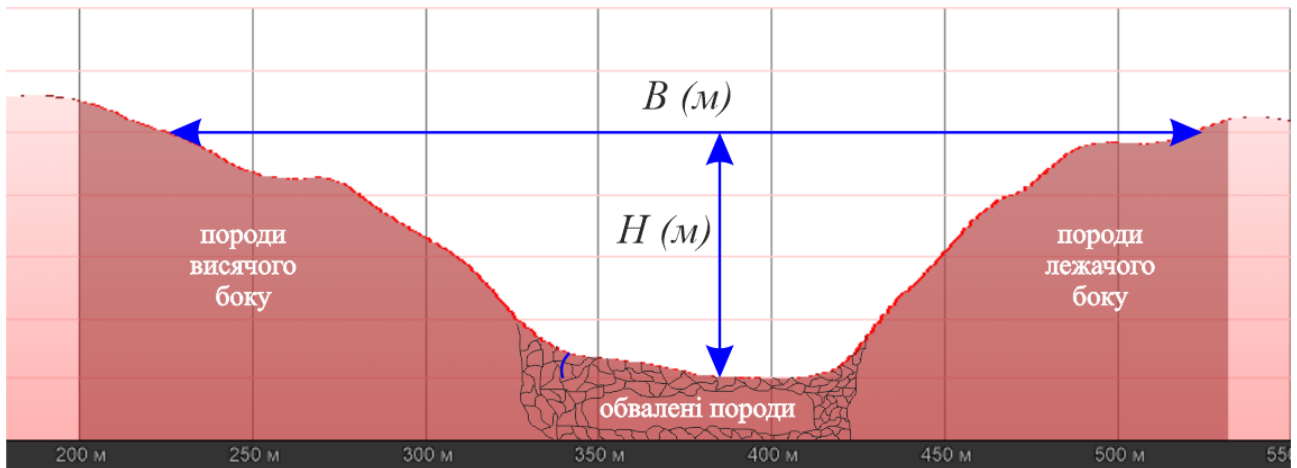


Рис. 1. Дослідження геометричних параметрів провальних зон за розрізом профілю рельєфу вхрест простягання рудного покладу



Рис. 2. Група досліджуваних провалів діючої шахти «Козацька» та закритої шахти «Комсомольська»

На першому етапі здійснюється збір даних про розташування провалів, включаючи супутникові зображення з 1984 по 2022 роки. Далі, у програмному середовищі Google Earth Pro проводиться оцифрування контурів провальних зон для кожного доступного року, що дозволяє визначити зміну їх меж та динаміку розвитку. Використовуючи можливості ГІС-аналізу, виконується розрахунок

площ провальних зон та створення часових рядів, що дозволяє виявити закономірності їх розширення. Наступним етапом є просторовий аналіз змін контурів провалів, що дозволяє встановити домінуючі напрямки їх розширення та можливий взаємозв'язок із гірничотехнічними чинниками. На фінальному етапі узагальнюються отримані результати та розробляються аналітичні графіки змін площ провальних зон у часі, що дозволяють оцінити ступінь активності зрушень і можливі загрози їх подальшого розширення.

Результати досліджень. Протягом усього періоду розробки запасів КЗБ, що триває вже 138 років, структура гірничорудної галузі зазнала суттєвих змін. У період з 1887 по 1940–1950 роки видобування багатих залізних руд здійснювався переважно у невеликих шахтах і кар'єрах, кількість яких перевищувала 100 та 40 відповідно. Оскільки рудні поклади, що розташовані близько до земної поверхні, поступово відпрацьовувались, виникла необхідність розробки глибших горизонтів для забезпечення стабільного видобутку. Крім того, потреба у повоєнному відновленні, розвиток нових технологій та зростання попиту на ресурси зумовили поступову переорієнтацію на глибші шахти, що сприяло подальшому інтенсивному розвитку підземного видобутку. Найбільшого розвитку підземне видобування зазнало з 1970-х років, і в той час у КЗБ функціонувало 10 рудоуправлінь, що об'єднували 24 шахти. Серед найвідоміших рудоуправлінь (рис. 3): Ім. Ілліча, Ім. Ф.Е. Держинського, Ім. Кірова, Ім. Фрунзе, Ім. К. Лібкнехта, Ім. Комінтерна, Ім. Р. Люксембург, Ім. XX партз'їзду, Ім. Леніна та Первомайське. Станом на 2024 рік у КЗБ 8 діючих шахт.

Внаслідок розробки покладів багатих залізних руд значною кількістю шахт у різні періоди часу на земній поверхні вздовж західної частини м. Кривий Ріг утворені десятки провальних воронок та зон зрушень, частина котрих засипані пустими породами кар'єрів та шахт. В результаті детального обстеження стану земної поверхні вздовж західної частини м. Кривий Ріг, де має місце простягання основної залізорудної смуги, запаси якої у різні часи відпрацьовувала значна кількість шахт станом на сьогодні ідентифіковано 15 відкритих провальних зон (рис. 3).

Аналіз рис. 3 показує, що сьогодні відкриті провальні зони існують переважно у гірничих відводах шахт «Ювілейна», «Козацька», «Ім. Колчевського» та «Тернівська», а також «Артема-1». Протягом тривалого часу частина провальних воронок у регіоні засипана пустими породами шахт та кар'єрів. Так, при нарощуванні та розвитку відвалу кар'єру «Південний» поступово були засипані 6 провальних воронок шахт колишнього рудоуправління Ім. Кірова. В умовах діючих сьогодні шахт «Ім. Фрунзе» та «Покровська» майже повністю засипані провальні зони та зони зрушення шахтними породами від проведення гірничих виробок. У гірничому відводі шахти «Криворізька» зони зрушення мають характер мульди просідання без розривних порушень земної поверхні, які проявляються у вигляді незначних терасових уступів глибиною 1,0–1,5 м. Утворення провальних воронок не зафіксовано, а у зоні просідання сформовані відвали пустих порід.

Ідентифікація 15 активних глибоких провальних зон на основі картографічного аналізу дозволяє визначити їхнє сучасне просторове розташування, проте для встановлення механізмів їхнього формування та динаміки розвитку

необхідно детально дослідити їхні геометричні параметри. Форма та розміри провалу є ключовими характеристиками, що відображають взаємозв'язок між масштабами деформацій земної поверхні та гірничотехнічними умовами, за яких відбувалося обвалення земної поверхні.

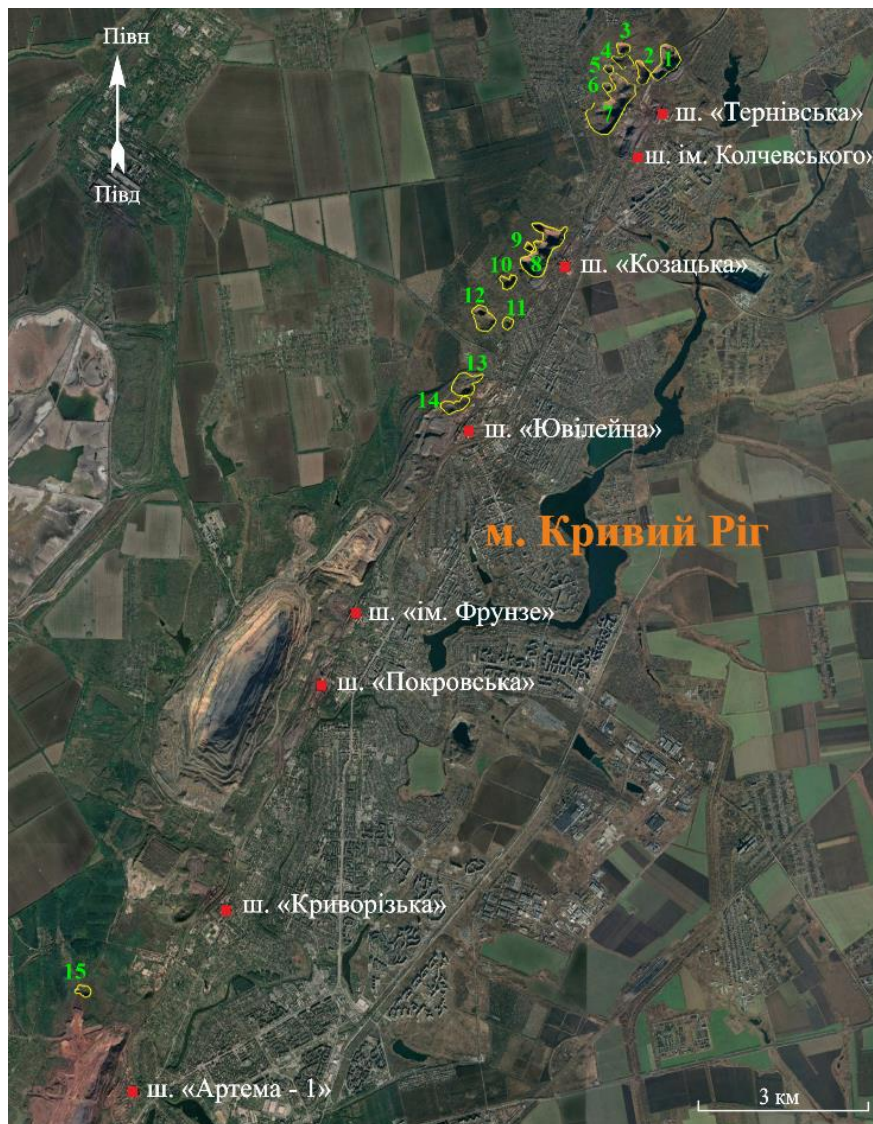


Рис. 3. Розташування основних крупних провальних зон шахт в околицях м. Кривий Ріг

Сьогодні не вистачає досліджень щодо вивченості фактичних значень геометричних параметрів існуючих провальних зон та їх подальшого порівняння з прогнозними значеннями для встановлення характеру їх розвитку. Геометричні параметри провальних, такі як максимальна ширина, глибина та загальна площа порушеної поверхні, є ключовими індикаторами розвитку деформацій, які можуть свідчити про активні або пасивні процеси зрушення. Визначення цих параметрів у поєднанні з аналізом гірничотехнічних умов формування провалів сприятиме науковому розумінню процесів фактичного провалоутворення й зсувів масиву гірських порід під впливом підземного видобутку.

У цьому контексті пропонується визначити коефіцієнт форми провалу (k_ϕ), що дозволяє встановити співвідношення між вертикальними і горизонтальними масштабами обвалення скельних порід та наносів та виявити тенденції їх утворення залежно від системи розробки рудних покладів:

$$k_\phi = \frac{H_{np}}{B_{np}}, \quad (1)$$

де H_{np} – глибина провальної зони; B_{np} – ширина провальної зони вхрест простягання рудного покладу.

Для систематизації фактичних провальних зон було визначено їх належність до шахт, що здійснювали чи здійснюють видобуток у досліджуваному регіоні, а також встановлено зв'язок між їх геометричною формою та видом системи розробки рудних покладів. Проаналізовано основні геометричні параметри провальних зон, включаючи площу, максимальну ширину та глибину, що дозволило оцінити масштаби деформаційних процесів.

Розраховано коефіцієнт форми провалу, який характеризує співвідношення глибини та ширини, що є важливим для типізації зон за їхньою морфологією та механізмом утворення. Результати вищезазначених досліджень сформовано у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика геометричних параметрів
основних існуючих провальних зон шахт КЗБ

Номер провалу	Шахта, рудоуправління	Система розробки рудних покладів	S , га	B , м	H , м	k_ϕ
1	«Тернівська»	Підповерхово-камерна – 85% Підповерхове обвалення – 15%	16,5	410	107	0,26
2			7,0	340	92	0,27
3			3,7	260	60	0,23
4			5,7	240	20	0,08
5			2,0	185	28	0,15
6			2,0	170	32	0,19
7	«Тернівська», «Ім. Колчевського»	Поверхово-камерна – 100% Системи розробки ш. «Тернівська»	42,0	530	108	0,20
8	«Козацька»	Поверхово-камерна – 31%	38,5	600	140	0,23
9		Підповерхово-камерна – 43%	1,7	150	60	0,40
10		Підповерхове обвалення – 26%	4,6	275	57	0,21
11	«Комсомольська-1» (закрита)	Підповерхово-камерна – 100%	3,4	180	280	1,56
12			12,0	280	115	0,41
13	«Ювілейна»	Підповерхове обвалення – 80%	13,5	370	50	0,14
14		Підповерхово-камерна – 20%	8,5	250	30	0,12
15	«Північна» (закрита) рудоуправління «Ім. Кірова»	Підповерхове обвалення – 100%	4,0	325	43	0,13

Примітка: S – площа порушеної земної поверхні; B – максимальна ширина провальної зони вхрест простягання рудного покладу; H – максимальна глибина провальної зони, k_ϕ – коефіцієнт форми провальної зони

Аналіз даних табл. 1 показує, що геометрична форма провальних зон має тенденцію до зміни залежно від прийнятої системи розробки рудних покладів на шахтах, що відображається у варіаціях коефіцієнта форми провалу. Провальні зони, що утворилися внаслідок застосування підповерхового обвалення руди та порід, демонструють значення у діапазоні до 0,15, що вказує на ширше горизонтальне поширення деформацій відносно їх глибини. У геотехнічних умовах застосування комбінації систем розробки в межах шахтного поля значення коливаються у межах 0,15–0,30, що свідчить про більшу глибину провалів при меншій горизонтальній амплітуді поширення. Найвищі значення 0,30–1,56 характерні для вузьких і глибоких провалів, що пов'язані з інтенсивним обваленням порід висячого боку при розробці переважно камерними системами розробки. Варіативність коефіцієнта форми навіть у межах однієї системи розробки пояснюється впливом різних фізико-механічних властивостей порід, глибини розробки, потужності рудних покладів та умов їх залягання. Подібні висновки за фізичним змістом наводяться й в інших дослідженнях [15], де зазначено, що при системах розробки з обваленням формуються прогнозовані зони зрушення з плавним осіданням, тоді як при камерних системах можливе утворення локалізованих провалів, що виникають раптово та залежать від глибини розробки й властивостей порід.

Аналіз площі провальних зон свідчить, що найбільші за площею зони (33 – 42 га) зі значним поширенням деформацій є характерними для діючих шахт, де застосовували систему підповерхового обвалення й в умовах яких розвинуті гірничі роботи як за простяганням рудних покладів, так за їх глибиною. Менші за площею провальні зони (1,7–20,0 га) спостерігаються переважно в умовах комбінації систем розробки камерної системи, де частина масиву залишається стійкою і процес обвалення має більш локальний характер. Наявні глибокі провальні зони в межах гірничих відводів шахт займають площу 170 га й можуть у випадку їх розширення створювати техногенну загрозу промисловій та цивільній інфраструктурі. Так, сьогодні провали 1–12 (див. рис. 2) загрожують інфраструктурі Тернівського та Покровського районів м. Кривий Ріг.

Представлені результати дозволяють класифікувати існуючі провальні зони за геометричними параметрами та виявити їх особливості, що наведено у табл. 2.

Визначення коефіцієнта форми провальних зон відкриває можливість для прогнозування масштабів зрушень та обвалень шляхом вирішення зворотної задачі. Так, використовуючи дані про визначені геометричні параметри провалу, фізико-механічні властивості порід, гірничотехнічні умови розробки покладів, можна аналітично оцінити межі поширення зони зсуву та глибину розвитку деформацій у масиві. Це дозволяє не лише відтворити закономірності розвитку провальних зон у минулому, а й визначити потенційні ризики для територій. Коефіцієнт форми провалу є важливим параметром при виборі ефективного способу його ліквідації, оскільки від співвідношення глибини до ширини залежить стійкість відкосів провалу і характер перерозподілу напружень у масиві. Оцінка коефіцієнта форми дозволяє підібрати ефективну стратегію ліквідації провальних зон з досягненням мінімізації геомеханічних ризиків, пов'язаних з розвитком подальших деформацій.

Таблиця 2

Класифікація провальних зон за їх геометричними параметрами

Тип провалу	Діапазон k_f	Характерна система розробки	Характеристика провальної зони
Неглибокі (пологі) провали	$\leq 0,15$	Підповерхове обвалення	Широкі, неглибокі провали, що формуються при деформаціях або обваленнях у слаботріщинуватих породах. Осідання поступове, значне горизонтальне розширення
Середньоглибокі провали	$0,15 - 0,3$	Комбінація підповерхово-камерна та підповерхове обвалення	Збалансоване співвідношення глибини та ширини, для комбінації систем розробки в межах шахтного поля, формуються в умовах помірної тріщинуватості порід
Глибокі провали з крутими відкосами	$0,3 - 0,5$	Переважно підповерхово-камерна	Різкі деформації масиву, часто пов'язані з раптовим обваленням порід висячого боку в утворенні пустоти. Ширина незначно перевищує глибину, вірогідні круті стінки провалу
Надглибокі та вузькі провали	$\geq 0,5$	Підповерхово-камерна	Локалізовані обвали з великою амплітудою осідання, пов'язані із зонами різкої втрати стійкості при утворенні значних пустот. Можуть утворюватися у високотріщинуватих породах

Проблему порушеного стану земної поверхні глибокими провальними зонами у Криворізькому залізорудному басейні можливо було попередити шляхом впровадження систем розробки із твердіючим закладанням саме на початковому етапі розробки покладів багатих залізних руд основними шахтами. На деяких шахтах частково застосовувались системи розробки з твердіючим закладанням, проте, подальша відмова та перехід на класичні системи розробки показали, що було прийняте неправильне рішення.

Потенційне впровадження технології закладання сьогодні вже не вирішить техногенних та геомеханічних проблем, адже на земній поверхні вже відбулось фактичне утворення численних глибоких провалів. Окрім зрозумілих техніко-економічних причин застосування існуючих традиційних для регіону систем розробки радянське керівництво тих часів можливо не передбачало потужного розвитку й урбанізації м. Кривий Ріг, яке сьогодні опинилось у важкій техногенно-екологічній ситуації. У теперішніх умовах перехід на діючих шахтах КЗБ до систем розробки з твердіючим закладанням є неможливим за декількома причинами.

По-перше, формування монолітного закладного масиву у відпрацьованих камерах при глибині шахт 1000–1400 м не зможе вирішити проблему збереження та деформацій стану земної поверхні, оскільки над рудним масивом, що відпрацьовується, знаходиться уже обвалений та дестабілізований масив гірських

порід, тому монолітне закладання здатне лише локально вплинути на покращення геомеханічної ситуації.

По-друге, можлива потенційна адаптація до технології твердіючого закладання тільки камерної системи розробки, а в межах однієї шахти у різному співвідношенні застосовується також система розробки з обваленням порід, яка не може бути переорієнтована під технологію закладання. Повний перехід на камерні системи розробки в межах однієї шахти призведе до суттєвих змін у порядку відпрацювання запасів і технології ведення основних та допоміжних процесів гірничих робіт.

По-третє, перехід до технології твердіючого закладання на глибинах ведення очисних робіт 1000–1400 м потребуватиме колосальних інвестиційних витрат на будівництво поверхневого закладного комплексу, прокладання складної горизонтально-вертикальної системи трубопроводів та інших закладних операцій, а враховуючи, що об'єм відпрацьованих балансових запасів в межах рудних полів перетнув 50%, це виглядає сьогодні малоймовірним. Окрім цього, закладні роботи підвищують собівартість видобутку 1 т руди на 20–30%.

Варто звернути увагу на важливий геомеханічний аспект щодо розвитку провальних зон. Криворізькими вченими зазначається [16], що при досягненні очисними роботами критичної глибини розробки завершується перший період відпрацювання плаstopодібних рудних покладів – період з інтенсивним зміщенням та обваленням земної поверхні. Другий період характеризується припиненням порушенням земної поверхні, локальним обваленням порід висячої сторони та стабілізацією тиску обрушених порід. Вчені відзначають, що останніми роками (орієнтовно з 2010 року) підземна розробка крутопохилих та похилих плаstopодібних рудних покладів відбувається у другому періоді, який характеризується припиненням порушенням земної поверхні, локальним обваленням порід висячого боку та стабілізацією тиску обвалених порід. З 2010 року зафіксоване останнє масштабне обвалення земної поверхні у КЗБ площею 16 га після виконання масового вибуху на шахті «Ім. Орджонікідзе» (нині – «Ім. Колчевського»), що призвело до руйнування поверхневої інфраструктури та людських жертв.

Професор Ступнік М.І. пропонує критичну глибину розробки розраховувати за формулою [16]:

$$H_{кр} = k \cdot L, \text{ м,}$$

де k – емпіричний коефіцієнт, який враховує довжину, потужність, кут падіння рудного покладу та стійкість вміщуючих порід; величина коефіцієнта змінюється від 0,90 для шахт південної групи (шахта «Ім. Артема №1») до 0,75 – для шахт рудників північної групи (шахта «Козацька», «Тернівська»); L – довжина рудного покладу за простяганням, м.

Отже, враховуючи вище викладене, доцільно визначити ступінь досягнутості залізорудними шахтами КЗБ рівня критичної глибини розробки та порівняти критичну глибину з досягнутою сьогодні фактичною. З цією метою у формі діаграми були порівняні ці два значення глибин ведення очисних робіт по шахтах КЗБ, що представлено на рис. 4. Аналіз даного рисунка показує, що всі 8 діючих

шахт за термін видобування залізних руд перетнули рівень критичної глибини розробки, що свідчить про те, що видобуток сьогодні відбувається у другому періоді відпрацювання рудних покладів КЗБ підземним способом, а саме – фази припинення активних розвитків геомеханічних процесів земної поверхні й стабілізації тиску обвалених порід. Таким чином, ефективність камерної системи розробки із твердіючим закладанням мала б місце при її застосуванні до рівня критичної глибини розробки, що дозволило би усунути в повному обсязі деформації земної поверхні, як це досягнуто на ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат» (Білозерське родовище) [17]. Найбільший ефект від застосування твердіючого закладання досягається на початковій стадії експлуатації родовищ.

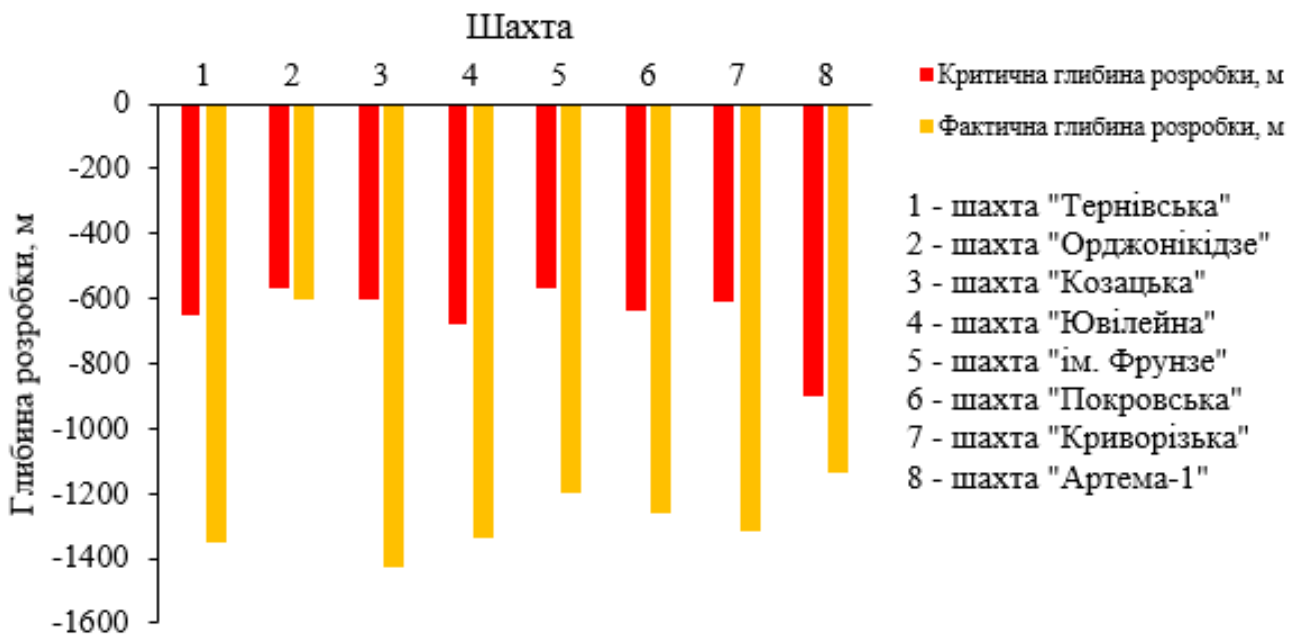


Рис. 4. Діаграма величин розрахункової критичної глибини розробки [18] та досягнутої фактичної глибини розробки по діючих шахтах Кривбасу

Аналогічного висновку щодо існування критичної глибини розробки дійшли китайські вчені [19], котрі досліджували осідання земної поверхні поліметалічного рудника Панлонг (Китай). Вчені встановили, що коли рівень видобутку сягнув рівня -700 м, швидкість розширення басейну осідань значно зменшилась і за межами цієї глибини осідання вже не розширюються помітно.

Важливим питанням залишається оцінка того, чи продовжується сьогодні збільшення розмірів провалів, чи вони перебувають у стадії стабілізації. Для цього необхідно не лише визначити поточні просторові характеристики провальних зон, але й проаналізувати їхню динаміку змін, що дозволить виявити тенденції розвитку та можливі ризики для прилеглих територій. Так, згідно методики досліджень була відтворена історична еволюція зміни провалу шахти «Козацька» (провал 8, рис. 3), яка ілюструється на рис. 5.

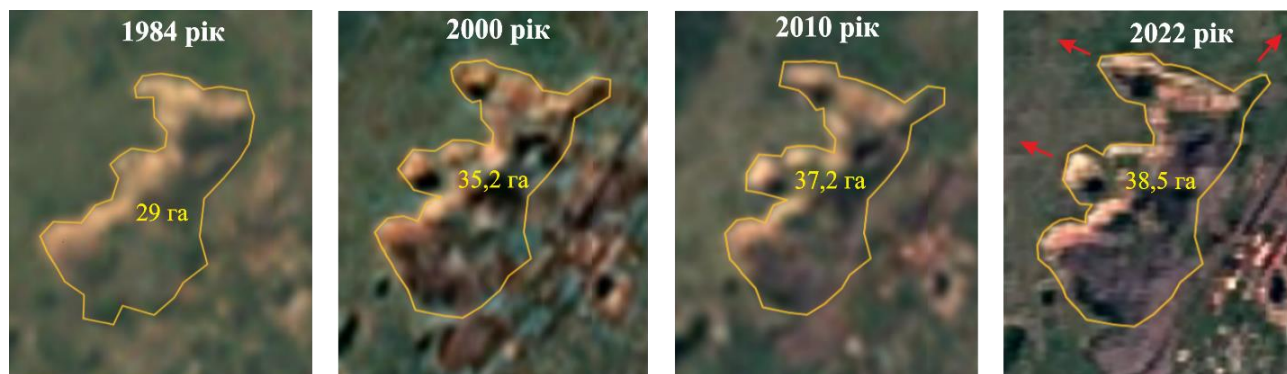


Рис. 5. Історична еволюція площі провальної зони шахти «Козацька»

Аналіз рис. 5 показує, що з 1984 по 2022 роки площа провальної зони збільшилась на 9,5 га або 25%, з 28 до 38,5 га. Зображення ілюструють, як просторово змінювалась площа провальної зони. Отже, провальна зона закономірно збільшується не тільки по мірі відпрацювання рудних запасів за простяганням рудного покладу, але й вхрест простягання покладу в напрямку порід висячого боку, що символізує про класичні механізми зсуву порід при відпрацюванні крутоспадних рудних покладів традиційними для КЗБ системами розробки.

Порівняння напрямів розвитку провалу рис. 5 з рис. 2, де зазначено розташування поверхневих об'єктів навколо провалу, показує, що сьогодні поступове розширення провальної зони з причин впливу залишкових і локальних деформаційних процесів, а також кліматичних факторів, а саме вітрової та водної ерозії, становить загрозу поверхневим природним об'єктам (лісові масиви, ґрунти) та інфраструктурі (промислові та цивільні будівлі).

Також було досліджено еволюцію зміни площі інших провальних зон з 1984 по 2022 роки, а саме провалів 9–12 (див. рис. 3), графіки яких представлені на рис. 6. Провали 8 та 10 виникли до 1984 року, тому відстежити початкову динаміку у програмі Google Earth є неможливим.

Аналіз графіків рис. 6 свідчить про різноманітність динаміки збільшення площі провальних зон. Так, площа провалу 10 протягом досліджуваного періоду змінювалась помірно, а провалів 8, 9, 11, 12 – з наявністю стрімкоподібного та динамічного характеру, що може свідчити про обвалення камерних пустот у періоди інтенсивної зміни площі. Загалом з графіків видно, що динаміка збільшення площі провалів зменшується приблизно з 2000-х років, що узгоджується з даними криворізьких вчених, згідно з якими розвиток провалів сьогодні перебуває в другій стадії – стадії згасання деформацій без істотних обвалів земної поверхні.

Проте, незважаючи на загасання активної фази провалоутворення, графіки рис. 6 свідчать про те, що провальні зони продовжують поступово розширюватися як за площею, так і, ймовірно, частково за глибиною, створюючи техногенно-екологічну небезпеку в регіоні та технологічні проблеми шахтам: ускладнення вентиляції, водовідливу та стійкості підземних гірничих виробок. Так, у зв'язку з розвитком провальної зони 12 (рис. 3) зазнало занепаду селище Краматорівка, розташоване північніше провалу.

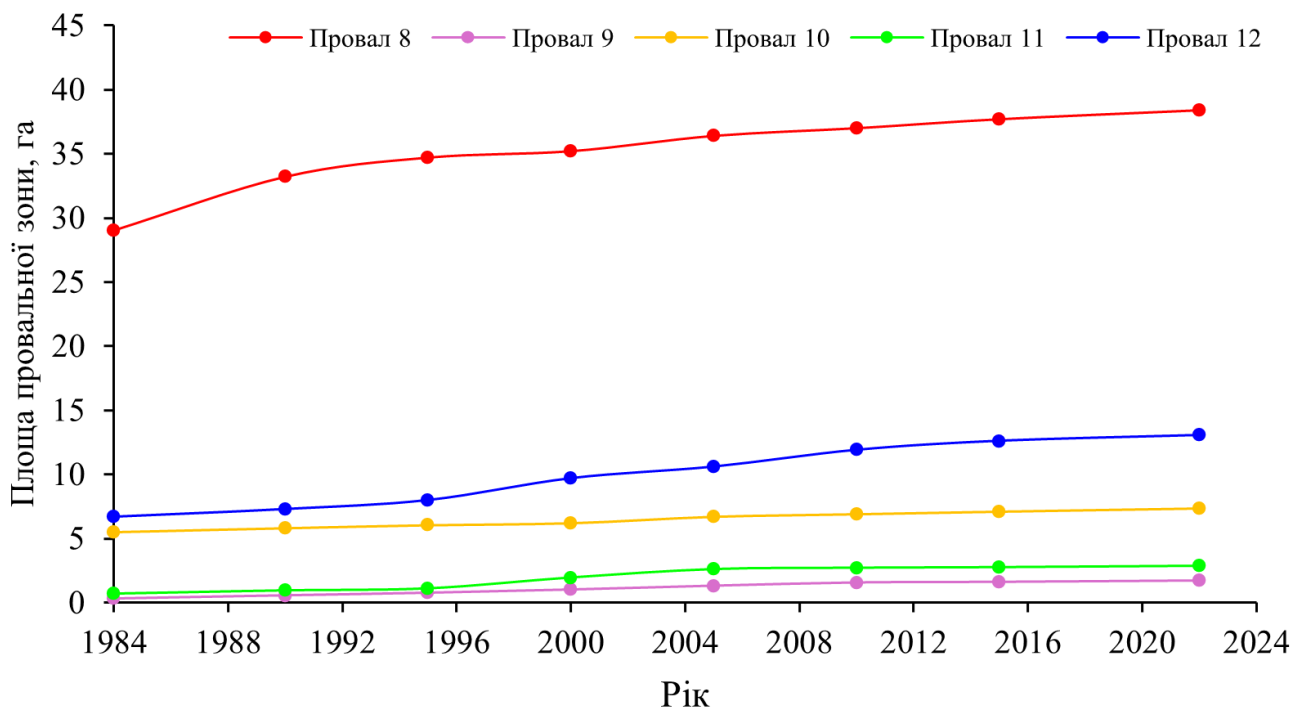


Рис. 6. Динаміка зміни площі порушеної земної поверхні досліджуваних провальних зон

Сьогодні у Криворізькому регіоні для ліквідації провальних зон шахт використовується засипання їх пустот пустими шахтними породами від проведення гірничих виробок або розкривними скельними породами кар'єрів (рис. 7), якщо їх відвали розташовано поруч із провальною зоною. Пусті породи фракцій 0–500 мм доставляються до краю провалу автосамоскидами, де виконується їх розвантаження в провальну зону. Протягом року шахти щорічно утилізують 200–300 тис. тонн утворених від проведення виробок пустих порід у провали.

(а)



(б)



Рис. 7. Засипання провальних зон шахтними породами: (а) – шахта «Козацька»; (б) – шахта «Тернівська» (фото Д. Антонова, Кривий Ріг, 2013 і 2014 роки)

На наш погляд, засипання пустими шахтними породами не вирішує проблему формування негативних геомеханічних процесів масиву гірських порід у зоні впливу провальної зони за наступними факторами: високі фільтраційні властивості та пористість насипного масиву; низькі фізико-механічні властивості,

особливо модуль деформації, який знижується при обводненні масиву від атмосферних опадів; високий ступінь неоднорідності насипного масиву; відсутність сили зчеплення між фракціями порід при їх водонасиченості; значне пиління при розвантаженні порід у провальну зону й забруднення довкілля.

У зв'язку зі здатністю до водонасичення фракційної суміші порід, яка засипається у провальну зону, під впливом атмосферних опадів, потрапляння та утримання води в середині насипного масиву може призвести до збільшення тиску на обвалені породи у днищі провальної воронки й викликати у майбутньому небажані геомеханічні процеси та вплинути на процеси видобування залізних руд в очисних блоках.

Значним проблемним аспектом є те, що засипання провальних зон пустими шахтними породами виконується лише за їх наявності безпосередньо біля промислових майданчиків шахт. Провальні зони, що виникли на значній відстані від промайданчиків шахт, не засипаються, що, очевидно, викликано декількома факторами:

- витратністю транспортування значних обсягів шахтних порід на збільшену відстань, зменшення темпів засипання провальних зон і необхідність залучення більшої кількості техніки;
- додаткове пилове забруднення навколишнього середовища при транспортуванні та розвантаженні порід;
- небезпечність пересування навантажених шахтними породами автосамоскидів для провальних зон шахт, що є нестабільними.

Заповнення не тільки близько розташованих, але й усіх утворених провальних зон шахт вимагає пошуків нових способів та підходів закладання, які були б мобільними та здатними доставляти закладний матеріал на більш віддалені відстані. Таким чином, у КЗБ провальні зони заповнюються пустими породами частково, здебільшого утворені біля промайданчиків шахт. Підтвердженням тому є графічне представлення на рис. 8.

На рис. 8а і б відмічено, які саме провальні зони засипаються пустими породами на шахтах «Козацька» та «Тернівська». З графічного представлення можна побачити, що більш віддалені провальні зони не заповнюються і, скоріше за все, не будуть заповнені за існуючим методом ліквідації провальних пустот у КЗБ. Складна ситуація, що пов'язана з відсутністю засипки провальних зон, віддалених від шахти або відвалів кар'єрів, підтверджується напруженою процедурою проходження проєктів шахт і кар'єрів щодо відведення нових земельних площ під нові відвали, а саме розділу з оцінки впливу на довкілля (ОВД). Так, у зауваженнях до проєктів у процедурі обговорення відзначаються часті зауваження місцевих екологічних організацій та населення щодо більшого приділення уваги засипання пустими породами провальних зон і закритих кар'єрів замість намірів створювати нові відвали.

Іншою техногенною проблемою для КЗБ є наявність непогашених підземних пустот старих закритих шахт. За деякими даними їх в регіоні налічується близько 50 млн м³ [20], при середніх об'ємах непогашеної очисної камери 50 – 70 тис. м³, небезпечних місць потенційних провалів може бути близько

150 – 200 у приповерхневих шарах надр навколо та у місті Кривий Ріг. Глибина цих шахт, зазвичай, становила до 200 м. Періодично непогашені пусті камери при відносно незначній потужності наносів (20 – 30 м) дестабілізуються з подальшим утворенням раптових провалів на земній поверхні. Ситуація ускладнена тим, що достовірно невідоме точне розташування непогашених старих пустот шахт, оскільки багато планів гірничих робіт з часом загублено або знищено під час Другої світової війни.

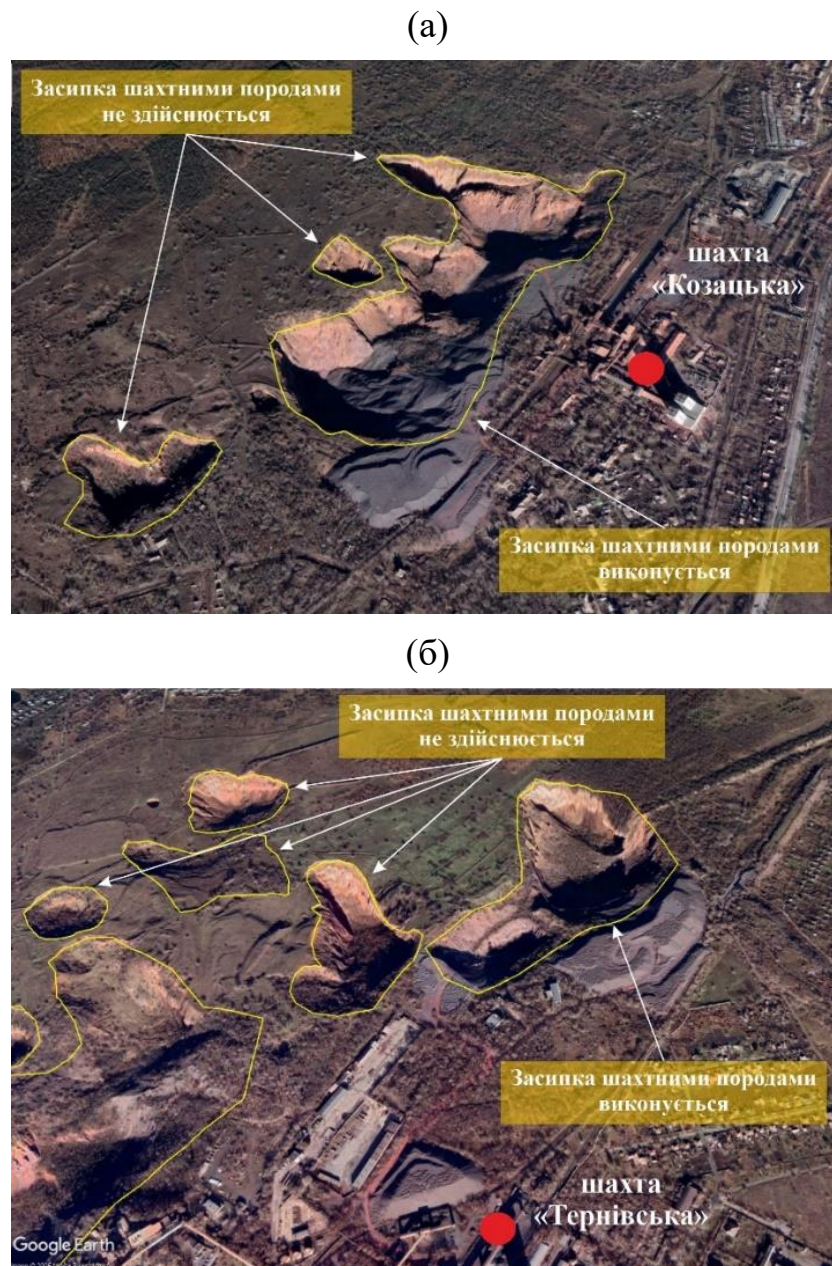


Рис. 8. Засипання пустими шахтними породами основних провальних зон шахт: (а) – шахта «Козацька»; (б) – шахта «Тернівська»

Отже, сьогодні набуває значної актуальності виявлення та дослідження цих небезпечних пустот комплексом геофізичних методів, створення геоінформаційної бази пустот і прогнозу ступеня небезпеки провалів. Такі заходи періодично

обговорювались серед науковців, органів державної та місцевої влади, проте дійсно дієві заходи сьогодні не застосовуються.

Існує суттєва небезпека потрапляння зазначених непогашених пустот старих закритих шахт у зони впливу провальних зон від діючих глибоких шахт (мульту зрушення), що може інтенсифікувати процеси їх раптового обвалення [15]. Низка шахт крім основних рудних покладів 5-го залізистого горизонту розробляли неглибокі лінзи, гнізда або дрібні поклади 6-го залізистого горизонту, внаслідок чого залишились непогашені камери поза зоною основного рудного покладу. Якщо звернути увагу на рис. 8а і б видно, що попереду основних провальних зон шахт «Козацька» та «Тернівська» виникли порівняно менші провали. Вірогідним є те, що зсувні процеси порід висячого боку при відпрацюванні основного рудного покладу шахт вплинули на непогашені неглибокі пустоти відпрацьованих дрібних покладів іншого залізистого горизонту, що спричинило інтенсифікацію їх провалу.

Іншим аргументом недостатньої ефективності процесу засипання провальних зон пустими породами з геомеханічної точки зору, а також впливу зсувних процесів від крупних провалів на непогашені пустоти старих шахт, є випадок утворення нової провальної зони, що виникла у березні 2024 року.

Особливості формування нової провальної зони та ймовірні умови її виникнення ілюструються на рис. 9. Навколо та під існуючим кар'єром «Південний» у минулому функціонувало декілька шахт рудоуправління «Ім. Кірова». У складі рудоуправління були 4 шахти: «Ім. Артема №1», «Східна», «Ім. Кірова», «Північна» та 1 кар'єр «Південний». Сьогодні досі функціонує шахта «Ім. Артема-1» та кар'єр «Південний». Ще до 1984 року поруч із західним бортом кар'єру утворилось 6 провальних зон від впливу шахт рудоуправління «Ім. Кірова». Скельні породи розкриву кар'єру «Південний» розміщувались у породному відвалі, що розташований також на західному борті кар'єру. У зв'язку з розвитком гірничих робіт і постійним утворенням розкривних порід було прийнято рішення засипати провальні воронки при розширенні породного відвалу. Останнім засипанням провалом при розширенні породного відвалу кар'єру був провал, позначений на рис. 9, який ліквідовано у 2015 році.

Проте, на початку весни 2024 року при розширенні породного відвалу кар'єру відбулось обвалення земної поверхні у крайній частині відвалу й утворилась нова провальна воронка діаметром по поверхні 80 м, діаметром у днищі 20 м та глибиною близько 70 м, що також ілюструється на рис. 9. Очевидно, що при нарощуванні породного відвалу близько до земної поверхні знаходилась непогашена очисна камера однієї з шахт колишнього рудоуправління «Ім. Кірова». Формування провалу, на наш погляд, відбулось у результаті синергетичного ефекту, а саме одночасного геомеханічного впливу попередньо засипаної пустими породами крупної провальної зони та додатковим навантаженням ваги порід відвалу на земну поверхню над очисною камерою. Судячи з фотографій характеру відслонень провальних зон того регіону, потужність наносних порід є незначною, близько 15–20 м. Вірогідно, у весняний період водонасиченість породного відвалу збільшилась, відповідно, і тиск налягаючих порід, а також, враховуючи

вплив зони зсуву крупного відвалу, відбулось раптове обвалення поверхні та відвалу у вироблений простір камери. При обваленні земної поверхні постраждалих не зафіксовано, проте, небезпека для працівників відвального господарства кар'єру залишається високою.

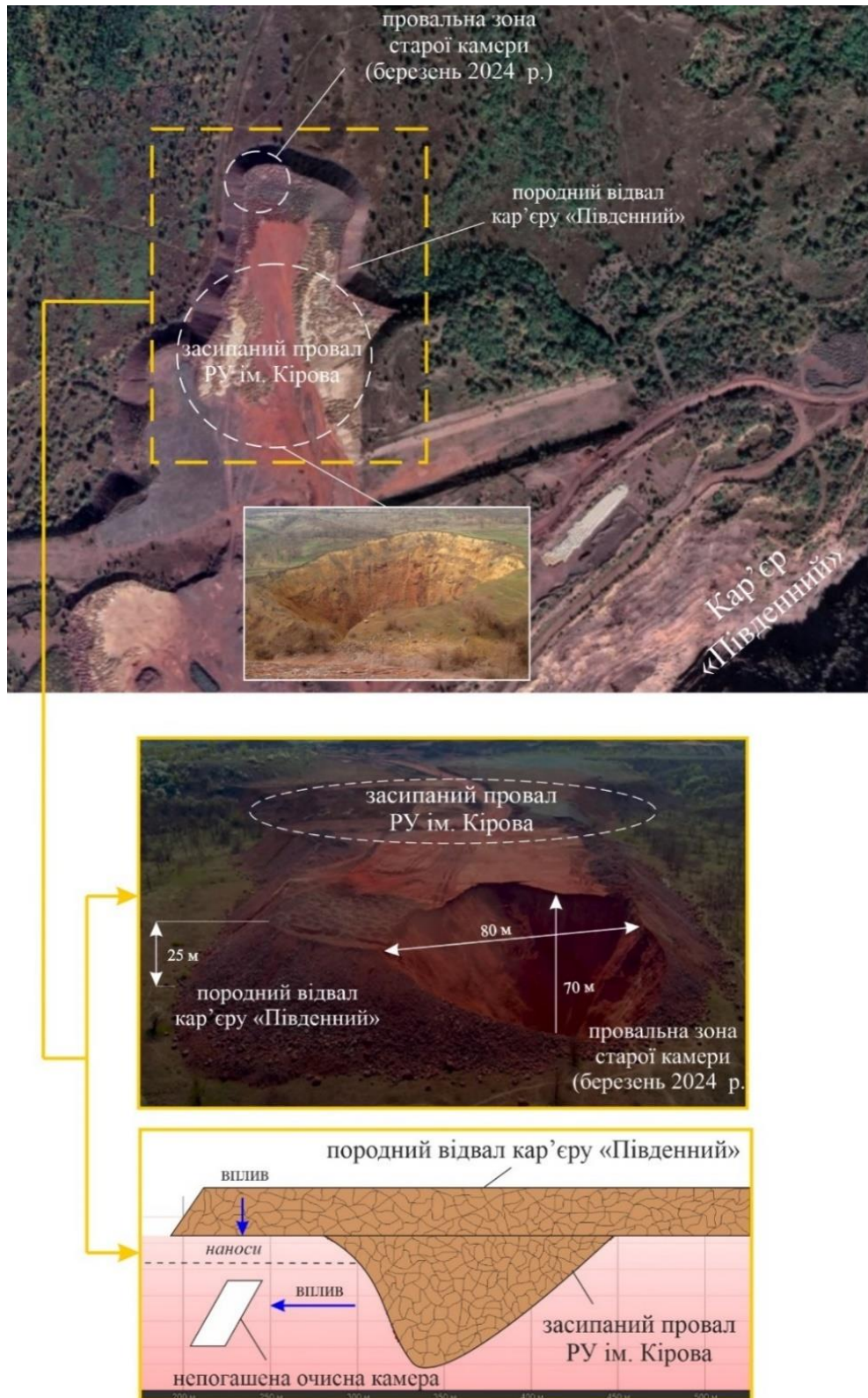


Рис. 9. Формування нової провальної зони на місці непогашеної підземної порожнини під впливом попереднього провалу, засипаного пустими породами

Проведений аналіз особливостей утворення провальних зон та проблемних аспектів ліквідації їх небезпеки свідчить про необхідність розробки нових підходів. Перспективним напрямом є розвиток наукових основ закладання зазначених техногенних пустот, які повинні бути сфокусовані на високій якості сформованого закладного масиву та його фізико-механічних властивостей, залучення більшого різноманіття промислових відходів у процес формування масиву, здатність блокувати деструктивні геомеханічні процеси у масивах гірських порід навколо провальних зон і забезпечувати мінімізацію розвитку осідання поверхні, особливо вхрест простягання рудного покладу. Саме цим проблемним аспектам повинні бути присвячені подальші наукові дослідження для підвищення рівня техногенно-екологічної безпеки у Криворізькому залізорудному басейні, де земна поверхня критично порушена впливом підземного видобування залізних руд.

Висновки. У результаті проведених досліджень вивчено типи та особливості розвитку провальних зон земної поверхні в зоні впливу підземної розробки крутоспадних покладів багатих залізних руд та їх впливу на техногенно-екологічну ситуацію Криворізького залізорудного басейну. Отримано наступні наукові та практичні результати:

1. У КЗБ станом на сьогодні ідентифіковано 15 глибоких провальних зон від функціонування діючих і закритих шахт, що розробляли запаси багатих залізних руд підповерхово-камерними системами розробки, які займають площу 170 га.

2. Запропоновано визначити коефіцієнт форми провалу, що дозволяє встановити співвідношення між вертикальними і горизонтальними масштабами обвалення скельних порід та наносів і виявити тенденції їх утворення залежно від системи розробки рудних покладів. Розроблено класифікацію типів провальних зон за їх геометричними параметрами та умовами формування.

3. Встановлено, що геометрична форма провальних зон має тенденцію до зміни залежно від прийнятої системи розробки рудних покладів на шахтах, що відображається у варіаціях коефіцієнта форми провалу. Варіативність коефіцієнта форми навіть у межах однієї системи розробки пояснюється впливом різних фізико-механічних властивостей порід, глибини розробки, потужності рудних покладів та умов їх залягання.

4. Визначено, що всі 8 діючих шахт за термін видобування залізних руд перетнули рівень критичної глибини розробки, що свідчить про те, що видобуток сьогодні відбувається у другому періоді відпрацювання рудних покладів КЗБ підземним способом, а саме – фази припинення активних розвитків геомеханічних процесів земної поверхні та стабілізації тиску обвалених порід.

5. Досліджена історична динаміка зміни площі групи провальних зон навколо шахти «Козацька». Площа основної провальної зони шахти з 1984 по 2022 роки збільшилась на 9,5 га або 25%, з 28 до 38,5 га. Визначено, що сьогодні провальна зона закономірно збільшується не лише у міру відпрацювання рудних запасів за простяганням рудного покладу, але й вхрест простягання покладу в напрямку порід висячого боку.

6. Визначено різноманіття динаміки збільшення площі провальних зон. Зафіксовано, що площа деяких провалів протягом досліджуваного періоду змінювалась помірно, інших – з наявністю стрімкоподібного та динамічного характеру, що може свідчити про обвалення камерних пустот у періоди інтенсивної зміни площі. Графіки ілюструють, що динаміка збільшення площі провалів зменшується приблизно з 2000-х років, що свідчить про перебування зсувних процесів у другій стадії – стадії згасань деформацій без істотних обвалів земної поверхні.

7. Встановлено, що незважаючи на загасання активної фази провалоутворення, провальні зони продовжують поступово розширюватися як за площею, так і, ймовірно, частково за глибиною, створюючи техногенно-екологічну небезпеку населенню, природнім та інфраструктурним об'єктам в регіоні, а також технологічні проблеми шахтам: ускладнення вентиляції, водовідливу та стійкості підземних гірничих виробок.

8. Наведено аргументи недостатньої ефективності процесів засипання провальних зон пустими породами, що проявляється у вибірковості цього підходу та потенційних геомеханічних ризиках. По-перше, засипання провальних зон здійснюється при їх безпосередній близькості до промайданчів шахт через високі витрати на транспортування та складність робіт у нестабільних умовах. По-друге, випадок появи провалу у 2024 році показує, що засипані ділянки залишаються нестабільними та можуть спричинити вторинні обвалення під додатковим впливом навантажень і зміни гідрогеологічних умов. Це вказує на необхідність альтернативних методів ліквідації провалів для досягнення довготривалої геомеханічної стабільності земної поверхні.

Перелік посилань

1. Maus, V., Giljum, S., da Silva, D.M., Gutschlhofer, J., da Rosa, R.P., Luckeneder, S., Gass, S.L.B., Lieber, M., & McCallum, I. (2022). An update on global mining land use. *Scientific Data*, 9(1), 433. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01547-4>
2. Шустов, О.О., Петльований, М.В., Зубко, С.А., & Шерстюк, Є.А. (2019). Геомеханічні проблеми стійкості природно-техногенних масивів рудних родовищ. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 58, 154–165.
3. Hendrychová, M., Svobodova, K., & Kabrna, M. (2020). Mine reclamation planning and management: Integrating natural habitats into post-mining land use. *Resources Policy*, 69, 101882. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101882>
4. Žibret, G., Gosar, M., Miler, M., & Alijagić, J. (2018). Impacts of mining and smelting activities on environment and landscape degradation – Slovenian case studies. *Land Degradation & Development*, 29(12), 4457–4470. <https://doi.org/10.1002/ldr.3198>
5. Kovrov, O., Pavlychenko, A., & Kulikova, D. (2024). Development of the wastewater treatment technology for the mine “Ternivska” of the Kryvyi Rih iron ore plant. *Environmental Technology*, 46(6), 908–921. <https://doi.org/10.1080/09593330.2024.2371080>
6. Cao, J., Huang, Q., & Guo, L. (2021). Subsidence prediction of overburden strata and ground surface in shallow coal seam mining. *Research Square*. Preprint. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-393197/v1>
7. Ling, W., Zhu, Z., Feng, X., Wang, L., Wang, W., Li, Z., & Qiu, J. (2024). Procedure design and reliability analysis for prediction of surface subsidence of a metal mine induced by block caving method – A case study of Pulang copper mine in China. *Minerals*, 14(10), 1011. <https://doi.org/10.3390/min14101011>

8. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. (2022). Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України.
9. Kuzmenko, O., Dychkovskiy, R., Petlovanyi, M., Buketov, V., Howanec, N., & Smolinski, A. (2023). Mechanism of interaction of backfill mixtures with natural rock fractures within the zone of their intense manifestation while developing steep ore deposits. *Sustainability*, 15(6), 4889. <https://doi.org/10.3390/su15064889>
10. Behera, S.K., Mishra, D.P., Singh, P., Mishra, K., Mandal, S.K., Ghosh, C.N., Kumar, R., & Mandal, P.K. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*, 309, 125120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125120>
11. Yang, K., Zhao, X., Wei, Z., & Zhang, J. (2021). Development overview of paste backfill technology in China's coal mines: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(48), 67957–67969. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16940-6>
12. Письменний, С.В. (2019). Визначення стійкого прогону оголення при розробці складноструктурних рудних покладів камерною системою розробки. *Гірничий вісник*, 105, 142–148.
13. Stupnik, N.I., & Pismennii, S.V. (2012). Perspektivnie tekhnologicheskie varianti dalneishei otrabotki zhelezorudnikh mestorozhdenii sistemami s massovim obrusheniem rudi. *Вісник Криворізького національного університету*, 30, 3–7.
14. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Sai, K., Chebanov, M., & Lozynskyi, V. (2024). Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344>
15. Stupnik, N.I., & Kalinichenko, V.A. (2013). Problemi monitoringa dnevnoi poverkhno-sti v polyakh zakritikh i deistvuyushchikh shakht Krivorozhskogo zhelezorudnogo basseina. *Збірник наукових праць Науково-дослідного гірничорудного інституту ДВНЗ «Криворізький національний університет»*, 54, 17–22.
16. Ступнік, М.І., & Кучерявенко, І.А. (2011). Визначення параметрів зони зсуву земної поверхні при підземній розробці крутоспадних плаstopодібних рудних покладів значного простягання. В *Матеріалах міжнародної науково-практичної конференції «Школа підземної розробки»*, 212–218.
17. Kuzmenko, A.M., & Petlyovani, M.V. (2014). Vliyanie strukturi gornogo massiva i poryadka otrabotki kamernikh zapasov na razubozhivanie rudi. *Геотехнічна механіка*, 118, 37–45.
18. Ступнік, М.І., & Маланчук, Є.З. (2011). Визначення параметрів зон зсуву і обвалення наносних глинистих порід при підземній розробці рудних родовищ. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, 3(55), 178–182.
19. Qiu, X., He, X., Cao, R., Qiu, H., Shi, X., Gou, Y., Li, X., & Zhi, W. (2024). Study on the surface subsidence trend of fill mining in underground mines with different mining depths. *Advances in Civil Engineering*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/4407757>
20. Вілкул, Ю.Г., Євтехов, В.Д., & Ступнік, М.І. (2017). Техногенні порушення надр Криворізького басейну. Наслідки та напрямки їх мінімізації. *Форум гірників*, 31–37.

ABSTRACT

Purpose. The study aims to investigate subsidence zones in the Kryvyi Rih Iron Ore Basin, considering their spatial distribution, geometric parameters, development dynamics, and formation factors determined by the applied ore deposit mining systems, as well as to assess their techno-environmental impact on natural and infrastructural objects in the region.

Methods. The research is based on the analysis of satellite imagery and GIS tools in Google Earth for the identification and measurement of geometric parameters of subsidence zones. The terrain profiling function was utilized to determine the width, depth, and area of the collapse zones, as well as to analyze the dynamics of their expansion over time.

Findings. As of today, 15 active subsidence zones with a total area exceeding 170 hectares have been identified in the Kryvyi Rih Iron Ore Basin. A correlation has been revealed between the geometric characteristics of the subsidence zones and the geotechnical conditions of ore deposit extraction, expressed through variations in the collapse shape coefficient. The historical dynamics of subsidence area changes over several decades indicate a gradual decrease in expansion rates after reaching the critical mining depth. However, irregular development patterns have been observed, with some zones undergoing steady expansion while others experienced sudden collapses linked to shear processes within the mined-out voids. It has been proven that backfilling with waste rock does not ensure long-term stability and can contribute to secondary collapses, especially in areas with complex hydrogeological conditions or significant underground voids.

Originality. A collapse shape coefficient has been proposed for assessing the geometric parameters of subsidence zones and the conditions of their formation. A systematic analysis of the historical dynamics of subsidence area changes has been conducted, establishing trends in their spatial and temporal expansion.

Practical implications. The obtained results can be applied for predicting further development of subsidence zones, assessing their risks to industrial and infrastructural objects, and developing alternative backfilling methods to ensure long-term geomechanical stability in the region.

Keywords: *subsidence zones, iron ore mine, shear processes, geometric shape, development dynamics, backfilling with waste rock, techno-environmental hazard.*