

Т. С. КОПТЄВА, PhD (Науки про Землю),
доцент кафедри суспільно-економічних дисциплін і географії
e-mail: koptevatania36@hnpu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9405-16744>
Харківський національний педагогічний університет імені Г.С.Сковороди,
вул. Алчевських, 29, Харків, 61000, Україна

ФОРМУВАННЯ ПРОВАЛЬНОГО РЕЛЬЄФУ В УМОВАХ ГІРНИЧОПРОМИСЛОВИХ ЛАНДШАФТІВ КРИВОРІЗЬКОЇ ЛАНДШАФТНО-ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Мета. Встановлення закономірностей формування та розвитку провального рельєфу як перехідного ярусу двоярусної структури гірничопромислових ландшафтів Криворізької ландшафтно-технічної системи та оцінка його впливу на сучасну морфодинаміку Криворізької ландшафтно-технічної системи.

Методи. Польові спостереження, геоморфологічний аналіз, порівняльно-аналітичний метод, картографічне моделювання, ГІС-аналіз.

Результати. Встановлено, що провальний рельєф є одним з ключових морфологічних елементів двоярусної структури гірничопромислових ландшафтів Криворізької ландшафтно-технічної системи. Визначено, що найінтенсивніші зони зрушення фіксуються в межах ВАТ «Суша Балка», рудоуправлінь ім. Колачевського, ім. Галковського, Олександрівського рудника та шахти Козацька. Зафіксовано дві групи провальних процесів: закономірні, пов'язані з плановою гірничою діяльністю, та випадкові, спричинені неконтрольованими геодинамічними чинниками. Виявлено також, що провальні утворення формуються не лише над шахтними виробками, а й у межах відвалів, розташованих над ними. Найбільші провальні форми, зокрема провальної зони шахти Козацької та зона Галковського кута, демонструють високу інтенсивність сучасних деформацій земної поверхні. Геоморфологічний аналіз дозволив виявити структурно-морфологічні особливості двоярусної будови гірничопромислових ландшафтів і простежити взаємозв'язок між поверхневими та підземними процесами. Порівняльно-аналітичний метод дав змогу зіставити сучасний стан провальних утворень із даними попередніх спостережень, виявивши тенденцію до збільшення площі зон деформацій. Картографічне моделювання забезпечило побудову картосхем просторового розподілу провальних зон у межах основних рудоуправлінь, а ГІС-аналіз – візуалізацію просторових зв'язків між поверхневими й підземними ярусами.

Висновки. Провальний рельєф є невід'ємним компонентом двоярусної структури гірничопромислових ландшафтів Криворізької ландшафтно-технічної системи, який формується як перехідний ярус, що поєднує поверхневі та підземні рівні, забезпечуючи морфогенетичний зв'язок між ними. Провальні процеси мають закономірний і випадковий характер, що свідчить про складну геодинамічну активність техногенно-трансформованих масивів. Отримані результати підтверджують необхідність подальшого моніторингу техногенних процесів для запобігання розвитку небезпечних ситуацій і стабілізації ландшафтно-технічної системи.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: двоярусність, гірничопромисловий ландшафт, Криворізька ландшафтно-технічна система, поверхневий ярус, підземний ярус, провальний рельєф, провальна лійка, середній ярус

Як цитувати: Коптєва Т. С. Формування провального рельєфу в умовах гірничопромислових ландшафтів Криворізької ландшафтно-технічної системи. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2025. Вип. 44. С. 47-59. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-04>

In cites: Koptieva, T. S. (2025). Formation of failure relief in the conditions of mining landscapes of the Kryvyi Rih landscape-technical system. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (44), 47-59. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-04> (in Ukrainian)

Вступ

Криворізька ландшафтно-технічна система (КЛТС) є унікальним і фактично єдиним в Україні, Європі та й світі прикладом

території, що зазнала повної ландшафтно-трансформації внаслідок тривалої гірничопромислової діяльності [1]. У межах цієї сис-

теми природні ландшафти повністю заміщені техногенними формами – відвалами, кар’єрами, провальними, шахтами, що утворюють складну двоярусну структуру. У межах КЛТС гірничопромислові ландшафти займають більше 40 тис. га. У їх структурі переважають відвальні та кар’єрні ландшафтні комплекси (67 %), промислові майданчики, водні антропогенні й дорожні ландшафти [2].

Така масштабна трансформація природного середовища зумовила формування нових морфогенетичних процесів і специфічних форм рельєфу, серед яких особливе місце посідає провальний рельєф. Провальні форми рельєфу є результатом підземних гірничих робіт, деформацій земної поверхні та вторинних екзогенних процесів [3, 4]. Вони становлять перехідний ярус у двоярусній структурі гірничопромислових ландшафтів, поєднуючи верхній техногенний рівень (поверхневий ярус) із нижнім (підземним ярусом). Саме в межах цього перехідного ярусу відбуваються найінтенсивніші морфодинамічні процеси – просідання,

суфозія, ерозія, акумуляція та саморегуляція техногенних форм.

Дослідження провального рельєфу як перехідного ярусу в структурі Криворізької ландшафтно-технічної системи має важливе наукове та прикладне значення, дозволяє не лише глибше зрозуміти морфогенетичну природу гірничопромислових ландшафтів, але й оцінити їх екологічну стабільність, ризики подальших деформацій і потенціал рекультивації територій, порушених гірничими роботами.

Певна кількість праць науковців присвячена дослідженню провального рельєфу гірничопромислових ландшафтів, серед них Денисика Г. І. [1, 3, 5, 6], Задорожньої Г. М. [3, 7], Казакова В. Л. [2, 5, 8], Коптевої Т. С. [1, 9 – 11], Сметани М. Г. [12, 13], Черного Г. І. [14] та інші.

Проблематика даного питання ґрунтовно розглянута в численних зарубіжних дослідженнях, зокрема у працях Hodge R. [4], Moffat K., Zhang A. [15], Kemp D. [16], Behera A., Rawat K [17], Żemła-Siesicka A. [18] та інші.

Об’єкт та методи дослідження

Об’єктом дослідження є гірничопромислові ландшафти Криворізької ландшафтно-технічної системи, які сформувалися внаслідок тривалої гірничодобувної діяльності та характеризуються складною просторово-функціональною організацією.

Предметом дослідження є провальний рельєф як перехідний ярус у двоярусній структурі гірничопромислових ландшафтів КЛТС.

У дослідженні застосовано комплекс методів: польові спостереження – для фіксації морфологічних особливостей провальних зон;

геоморфологічний аналіз – для визначення структурно-морфологічних параметрів двоярусної будови гірничопромислових ландшафтів; порівняльно-аналітичний метод – для зіставлення сучасного стану провальних утворень із попередніми спостереженнями; картографічне моделювання – для побудови картограм просторового розподілу провальних зон; геоінформаційні технології (ГІС-аналіз) – для візуалізації взаємозв’язку поверхневих і підземних ярусів та прогнозування подальшої динаміки техногенних деформацій.

Результати та обговорення

Криворізька ландшафтно-технічна система (КЛТС) є системою, яка утворилася 150 років тому назад і за такий незначний період часу повністю видозмінила натуральні ландшафти у антропогенні [1, 5]. Особливе значення у КЛТС мають гірничо-промислові ландшафти, які являють собою складні динамічні системи на яких зумовлюється виникнення похідних процесів та явищ. Вони виступають провідними чинниками у формуванні поверхневого ярусу гірничопромислових ландшафтів і спричиняють виникненню природно-техногенних надзвичайних ситуацій [9, 15].

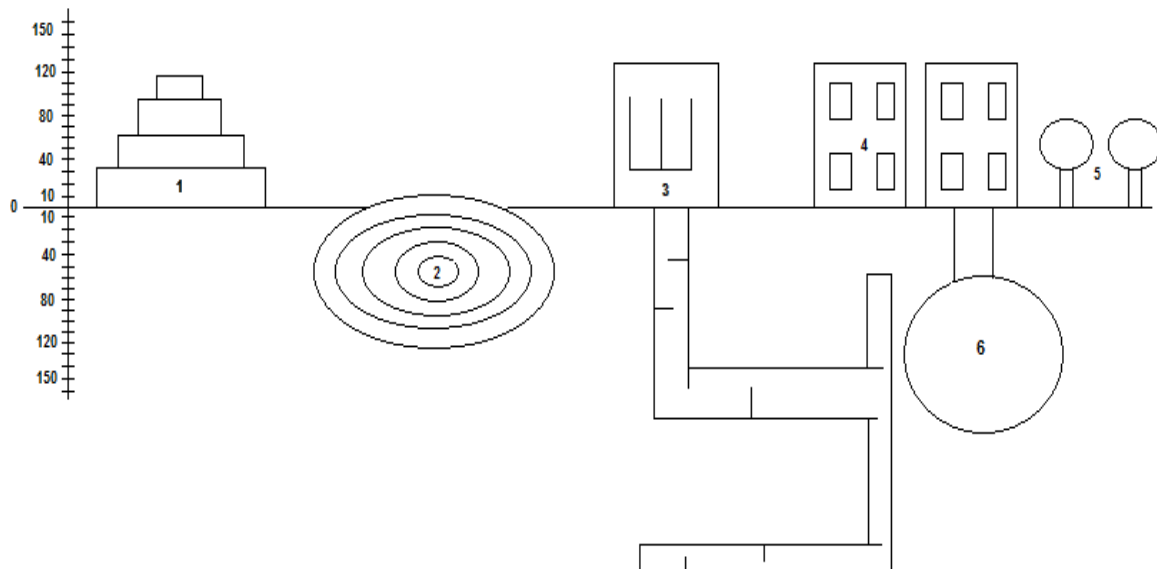
На рис. 1. поверхневий ярус гірничопромислових ландшафтів КЛТС представлений

поверхневими об’єктами та спорудами: кар’єри, відвали, шламосховища, гірничо-збагачувальні комбінати та ін. [9]. При активному видобутку залізної руди КЛТС на поверхневному ярусі з’являються похідні процеси та явища, які зумовлюють до виникнення техногенних небезпечних ситуацій особливо це простежується у зонах зрушення денної поверхні КЛТС. Підземний ярус гірничопромислових ландшафтів поділяється на шахти (стволи, квершлагги, штреки, гезенки), штольні і просадочні воронки [9, 6].

Умовно простежити двоярусність можна на рис. 2, де показано двоярусність гірничопромислового та селитебних ландшафтів КЛТС.



Рис. 1 – Поділ поверхневого та підземного ярусів
Fig. 1 – Division of surface and underground tiers



Умовні позначення/ Legend:

- 1- відвали (гірничопромисловий ландшафт) – поверхневий ярус / spoil tips (mining landscape) – surface layer
- 2- кар'єри (гірничопромисловий ландшафт) – поверхневий ярус/ quarries (mining landscape) – surface layer
- 3- шахта (гірничопромисловий ландшафт) – підземний ярус / mine (mining landscape) – underground level
- 4- житлова зона (селитебний ландшафт) – поверхневий ярус / residential area (settlement landscape) – surface layer
- 5- садово-паркова зона (селитебний ландшафт) – поверхневий ярус / garden and park area (settlement landscape) – surface layer
- 6- швидкісний трамвай (селитебний ландшафт) – підземний ярус/ high-speed tram (residential landscape) – underground level

Рис.2 – Двоярусність гірничопромислових та селитебних ландшафтів КЛТС
Fig. 2 – Two-tier structure of mining and settlement landscapes of the KLTS

Відповідно, похідні процеси і явища у гірничопромислових ландшафтах КЛТС зумовлюють виникнення перехідного ярусу в дво-ярусній структурі. Перехідний ярус фор-

мується внаслідок розвитку гравітаційного та провального рельєфу на території КЛТС, які є результатом тривалого техногенного навантаження та природно-геоморфологічних проце-

сів, що відбуваються після завершення гірничих робіт. Саме цей ярус відіграє важливу роль у забезпеченні морфогенетичного зв'язку між техногенними та природними компонентами ландшафтної структури.

Гравітаційний рельєф – це рельєф, який утворюється під дією сили гравітації Землі. Активізація гравітаційних процесів починається відразу після створення гірничопромислового ландшафту, а особливого розвитку досягає після його відпрацювання [3]. Найбільша інтенсивність гравітаційних процесів спостерігається у перші роки формування гірничопромислових ландшафтів, коли порушені породи перебувають у нестійкому стані, а максимальної потужності вони досягають після завершення експлуатації гірничих об'єктів [16].

Найбільш поширеним проявом гравітаційного рельєфу є гравітаційний рельєф схилів, який формується під впливом гравітаційного переміщення порід на бортах кар'єрів, відвалах і терасах [3]. Основними формами гравітаційного рельєфу схилів є обвали, осипи, дефлюкційні схили та зсуви, що мають різну морфометрію й інтенсивність розвитку залежно від фізико-механічних властивостей порід і ступеня зволоження [9].

Унікальними формами гравітаційного рельєфу в ландшафтах зон техногенезу є зони зрушення земної поверхні, які утворюються внаслідок підземного видобутку корисних копалин [17]. Вони характеризуються складною морфологічною будовою, проявами тріщинуватості, деформацій та осідань, що створюють передумови для подальшого розвитку провального рельєфу – одного з ключових елементів перехідного ярусу КЛТС.

Як показано на рис. 3 кар'єрно-відвальні і шахтні ландшафтні комплекси сформувалися майже по всій території КЛТС. Провальний рельєф розвивається переважно саме в цих зонах, де поєднання порушеної геоструктури та техногенного навантаження створює сприятливі умови для його утворення. На їх поверхні формується характерний провальний та просадочний рельєф [10].

Провальний рельєф найбільш активно розвивається у північній та центральній частинах КЛТС. Він є кінцевим результатом процесів зрушення гірських порід, що активізуються внаслідок застосування при гірничодобувних роботах системи підповерхневого обвалення [12]. Сутність цієї системи полягає у штучному обваленні покрівлі підземних порожнин значних сумарних обсягів, які утворюються після відпрацювання шахтами верхніх

горизонтів рудоносних пластів (до глибини 300 м) [19]. Обвалені породи заповнюють вироблений простір, знижуючи ризик раптових провалів, але водночас сприяючи поступовому зрушенню земної поверхні [20].

За спостереженнями Г. І. Черного [14], зрушення земної поверхні зазвичай розпочинається через один–два місяці після завершення відпрацювання покладу або після виїмки більшої частини ціликів на певному горизонті [14]. Водночас обвалення можуть мати і неконтрольований характер, спричинений дією сили тяжіння або проведенням буровибухових робіт у межах гірничих відводів.

На території КЛТС найбільш інтенсивні зони зрушення фіксуються в межах ВАТ «Суша Балка», Олександрівський рудник, РУ ім. Колачевського (Саксаганський рудник) та РУ ім. Галковського (колишня назва РУ ім. Кірова) (рис. 4). За оцінками В. П. Палієнка, площа зон зрушення та провалів у межах КЛТС перевищує 3,3 тис. га [3].

Формування провального рельєфу зумовлюється сукупністю низки чинників, серед яких провідну роль відіграють фізико-механічні властивості гірських порід, будова породного масиву та система його поверхні ослаблення, що перетинають масив [8]. Важливе значення мають також гідрогеологічні умови, розміри та просторове положення покладів і гірничих виробок у породному середовищі, а також гірничотехнічні чинники, пов'язані зі способом розробки та інтенсивністю гірничих робіт [10].

Комплексна дія зазначених чинників зумовлює формування унікальних територій, на яких виникають специфічні сучасні техногенні ландшафти – провальні зони. Ці зони являють собою результат тривалих процесів деформації земної поверхні, спричинених як природними, так і техногенними впливами [18]. Основними морфологічними елементами провальних зон виступають провальні лійки, улоговини, каньйони, зсувні тераси та зони плавних рухів земної поверхні (рис. 5). У своїй сукупності вони формують складну просторово-структурну організацію рельєфу, що є характерною ознакою сучасних техногенно-трансформованих ландшафтів Криворізької ландшафтно-технічної системи [13].

Провальні лійки за своїми морфометричними параметрами належать до форм мезорельєфу. Вони, як правило, групуються та приурочені до зон родовищ залізних руд пластового типу, що зумовлено особливостями геологічної будови та характером під-

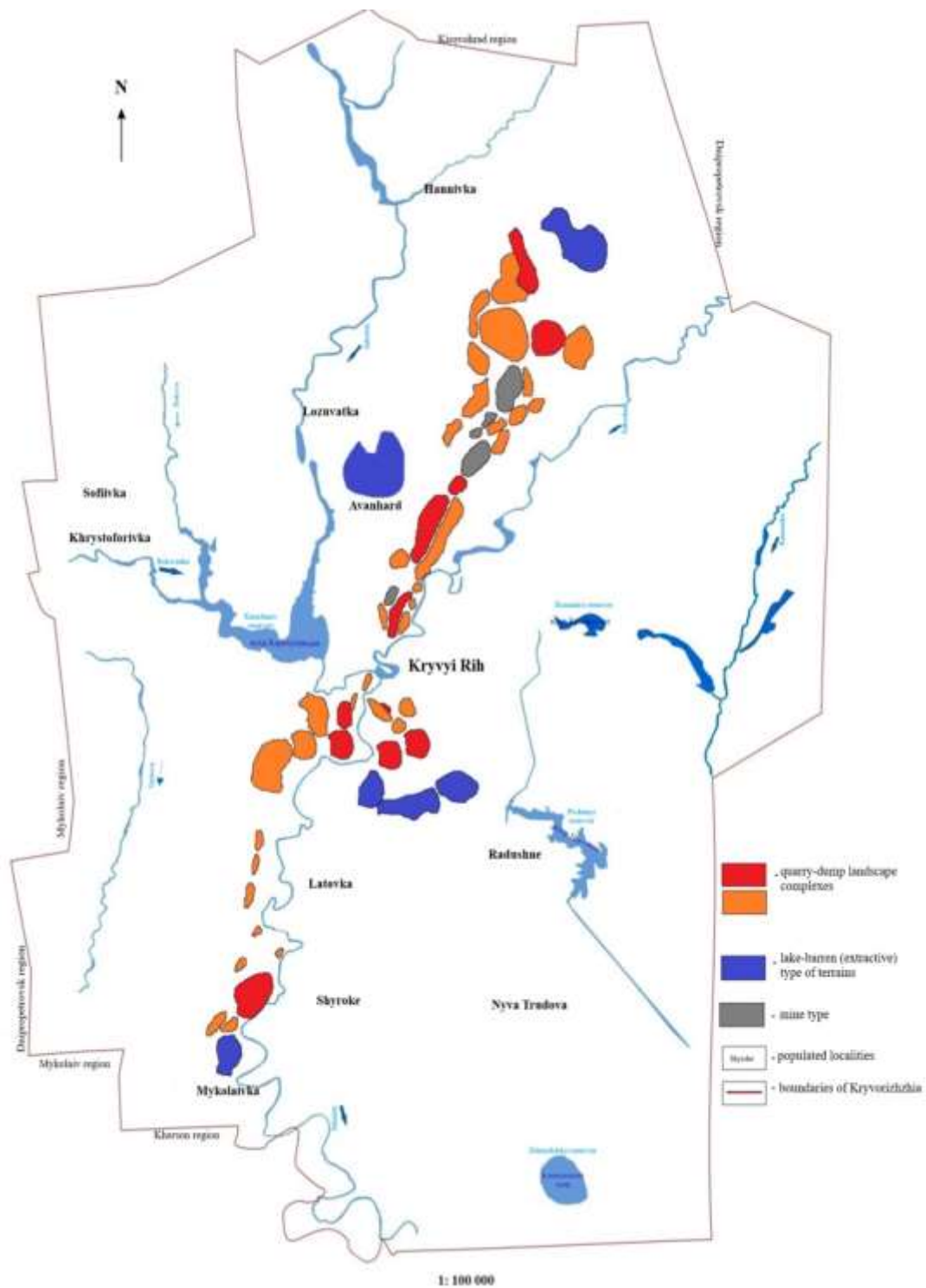


Рис. 3 – Типи гірничопромислових ландшафтів КЛТС [4]
Fig. 3 –Types of mining landscapes in KLTS [4]



Рис. 4 – Зони зрушення РУ ім. Колачевського
Fig. 4 – Areas of change at the Kolachevsky mining administration

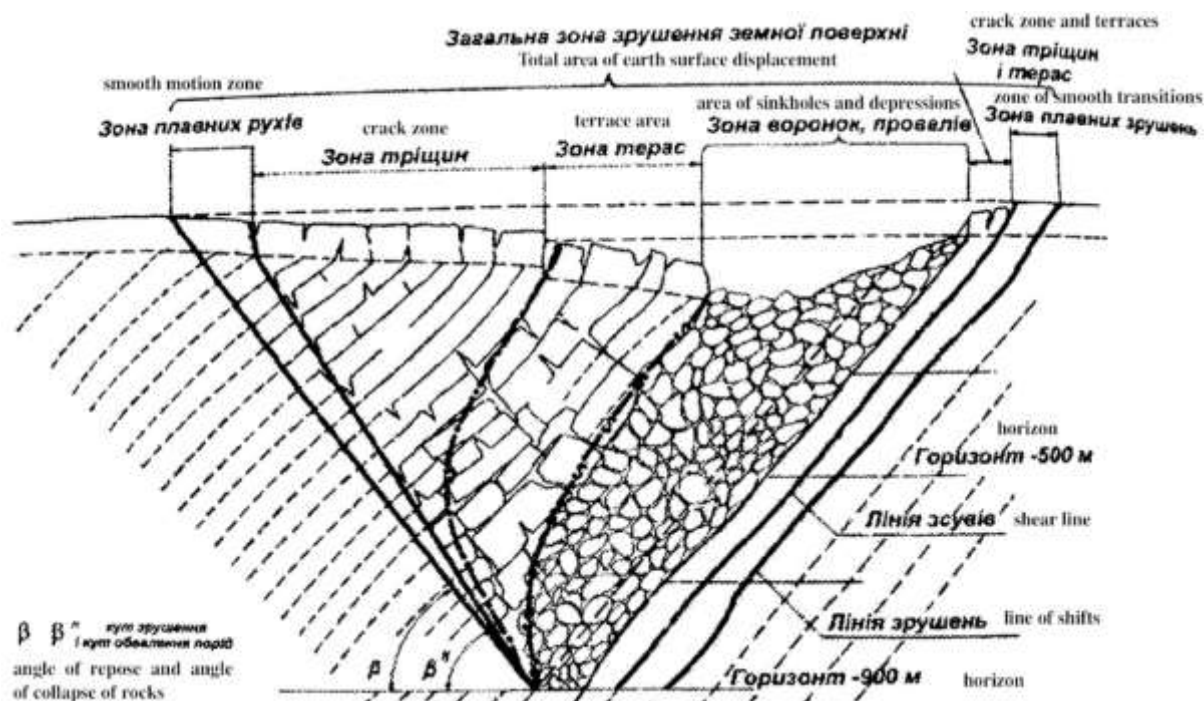


Рис. 5 – Загальна схема зони зрушення земної поверхні [14]
Fig. 5 – General diagram of the earth's surface displacement zone [14]

земних гірничих робіт [3]. Сучасні провальні лійки характеризуються значними розмірами: їхня глибина сягає 100–150 м, а діаметр варіює від кількох десятків до 200–500 м [6]. Для кожної лійки притаманна виражена морфологічна структура, у межах якої простежуються основні морфометричні елементи – бровка, схили та днище, переважно

конусоподібної форми, що відображає закономірності формування та подальшої еволюції провального рельєфу [3].

Глибокі провальні лійки можуть з'єднуватися та утворювати масштабні провальні западини, які В. Л. Казаков пропонує називати провальними улоговинами та провальними каньйонами [2]. Довжина улого-

вин сягає 400-500 м, каньйонів – до 1000 м. Єдиний подібний провальний каньйон сформувався в провальній зоні шахті Козацькій.

Провальний каньйон продовжує інтенсивно деградувати, становлячи катастрофічну небезпеку як для природного середовища, так і для населених пунктів, розташованих поблизу. Його глибина сягає 133 м, що робить цю форму рельєфу найбільшою не лише в межах Криворізької ландшафтно-технічної системи, а й у всій Європі.

Структурно провальний каньйон складається з кількох локальних обвалів, які

поступово зливаються, утворюючи єдину глибоку провальну зону. З метою запобігання подальшому розвитку деформацій і недопущення техногенної катастрофи провальну зону поступово засипають пустими породами залізрудного походження. Однак, незважаючи на вжиті заходи, процеси деструкції тривають — зона провалля продовжує розширюватися, формуючи складну систему тріщин, розломів і зсувів (рис. 6).

Варто зазначити, що провальна зона простягається широкими смугами та безпосередньо межує зі старовинним рудником. Цей



Рис. 6 – Провальна зона залізрудної шахти Козацької

Fig. 6 – Collapsed area of the Kozatska iron ore mine

приклад яскраво ілюструє механізм двоярусної будови гірничопромислового ландшафту, у якому поверхневі та підземні яруси функціонують як єдина динамічна система трансформацій, характерна для регіонів з високою інтенсивністю гірничодобувної діяльності [11].

Перші форми провального рельєфу на території Криворізької ландшафтно-технічної системи зафіксовані ще у 1930-х роках XX ст., і процес його розвитку триває дотепер. Зокрема, 13 червня 2010 року внаслідок обвалення склепіння камер виробок горизонту – 477 м шахти РУ Колачевського [3] утворилася провальна лійка площею близько 16 га та глибиною 80–82 м (по лежачому блоці) і 5–20 м (по висячому блоці), глибина всієї провальної лійки 220 м. Ця форма, відома під назвою

«Гніздо Дракона» на території шахти Козацької нині є об'єктом дослідження, а також використовується у сфері промислового альпінізму та техногенного туризму КЛТС.

Паранько І. С. [21] зазначав, що процес утворення провалів має двоїстий характер і поділяється на закономірні та випадкові. Закономірні провалля формуються передбачувано, оскільки їхнє виникнення та подальший розвиток є невід'ємною складовою гірничовидобувного процесу, що зумовлено особливостями застосованих технологій розробки родовищ [18]. Випадкові провалля, навпаки, утворюються під дією непередбачуваних чинників, які активізують процеси зрушення та обвалення гірських порід поза межами запланованого техногенного впливу. На територіях

гірничих відводів переважають закономірні форми зрушень, однак аналіз просторового розповсюдження провалів свідчить, що з часом зростає частка випадкових утворень, що відображає ускладнення геодинамічних процесів у межах техногенно трансформованих масивів [22].

Утворення чергової провальної лійки було зафіксовано 17 серпня 2010 року на території Центрально-Міського району, її глибина сягала близько 20 м. За припущеннями Г. М. Задорожньої, формування цієї лійки було пов'язане з самообваленням порід у межах відпрацьованих дореволюційних шахтних горизонтів, де з часом відбулося ослаблення порід та порушення їхньої стійкості [3]. Крім

того, 14 січня 2011 року внаслідок землетрусу силою 3,9 балів було утворено провальну лійку на території провальної зони РУ ім. Галковського. Вона розташована в межах прогнозованої зони зрушення, що формується під впливом гірничих робіт на глибині близько – 1045 м.

Нещодавно, 29 березня 2024 року, на території РУ імені Галковського, поблизу Галковського кута, утворилося масштабне провалля із морфометричними параметрами: ширина близько 100 м, глибина — до 200 м [10]. Варто зазначити, що провалля продовжує розширюватися, демонструючи активний розвиток морфодинамічних процесів у зоні техногенного навантаження (рис. 7).



Рис. 7 – Провальна лійка на території Галковського кута КЛТС
Fig. 7 – Collapsed funnel on the territory of the Galkovsky corner of the KLTS

Важливо зазначити, що провальний рельєф утворюється не тільки безпосередньо над підземними виробками, а й можуть сформуватися на багатоярусних відвалах, відсипаних над підземними виробками [3]. Дослідження було виконано на території Саксаганського району, м. Кривий Ріг, біля кар'єру Південного ГЗК, біля провалля Чаша, утворилася нове провалля у відвалі кар'єра Південного ГЗК і тут простежується приклад двоярусної структури гірничо-промислових ландшафтів.

На рис. 8 чітко виокремлені межі відвалу, який переходить у провальну зону, а далі у підземний ярус. Спочатку на цій ділянці здійснювався видобуток залізної руди закритим (шахтним) способом, у

результаті чого у підземному ярусі сформувалася розгалужений простір шахтних виробок і порожнин. Після завершення підземного видобутку, на поверхні цієї території було сформовано масивний відвал пустої породи залізородного походження, який будучи потужним техногенним утворенням, здійснював значний тиск на породи, що перекривали підземні пустоти. З часом перекриття поступово втрачало стійкість, особливо в зонах найбільшого навантаження, що призвело до просідання території під відвалом. Наслідком цього стало утворення провальної лійки в структурі самого відвалу.

Таким чином, на цій ділянці зафіксовано процес, коли: первинна (поверхнева) структура відвалу зазнала деформацій, се-



Рис. 8 – Поверхневий ярус (відвал та зона зрушення), який переходить у середній ярус
Fig. 8 – Surface layer (deposit and displacement zone), which transitions into the middle layer



Рис. 9 – Підземний ярус (підземні виробки та порожнини)
Fig. 9 – Underground level (underground workings and cavities)

редній ярус (провальна зона) сформувався як зона просідання і руйнування, а підземний ярус визначився наявністю попередніх гірничих виробок, які виступили рушійною силою даної території. У результаті наочно на рис. 8 і рис. 9 простежується яскравий приклад прояву двоярусної структури гірничопромислового ландшафту, де відбувається взаємодія двох ярусів зі середнім: верхнього – поверхневого (відвалу), середнього (провальної зони) та нижнього-підземного (підземні виробки і

порожнини). Така морфоструктурна побудова є характерною для територій з багаторівневим техногенним навантаженням та свідчить про складну постексплуатаційну динаміку антропогенних ландшафтів.

На рис.8 і 9 простежується низка морфологічних елементів – бровка, схили, днище (переважно конусоподібної форми), схили ускладнені продуктами флювіальних та гравітаційних процесів (борознами, рівчакми, осипами).

Висновки

Криворізька ландшафтно-технічна система є унікальним прикладом природного середовища, повністю трансформованого антропогенною діяльністю. Формування провального рельєфу в межах КЛТС є результатом тривалої дії техногенних і природних чинників, серед яких провідну роль відіграють особливості гірничих робіт, фізико-механічні властивості порід і гідро-геологічні умови. Провальні процеси розвиваються насамперед у межах шахтних і кар'єрно-відвальних ландшафтів, де поєднання порушеної геоструктури та інтенсивного техногенного навантаження створює сприятливі умови для формування деформацій земної поверхні.

Найбільші зони зрушення спостерігаються на територіях рудоуправлінь і шахт, зокрема ім. Галковського, Колачевського та на промислових майданчиках ВАТ «Суша Балка».

Провальні лійки, улоговини та каньйони характеризуються значними морфометричними параметрами – глибиною до 150 м і діаметром до 500 м, що робить їх типовими формами мезорельєфу техногенного поход-

ження. Особливо небезпечними є масштабні провальні утворення, такі як провальний каньйон шахти «Козацька», глибина якого сягає 133 м, що є найбільшим показником у Європі. Активний розвиток цих форм супроводжується поширенням тріщин, розломів і зсувів, що свідчить про складну геодинамічну ситуацію в регіоні. Дослідження останніх років показують, що провальні процеси можуть розвиватися не лише над підземними виробками, а й у межах багоярусних відвалів, утворених над ними, де спостерігається прояв двоярусної будови гірничопромислових ландшафтів. Взаємодія поверхневого, провального та підземного ярусів формує складну морфоструктурну систему, яка відображає постексплуатаційну динаміку гірничопромислових ландшафтів.

Таким чином, Криворізька ландшафтно-технічна система демонструє характерний приклад просторово-структурної та морфодинамічної еволюції територій інтенсивного гірничого освоєння, де техногенні процеси залишають тривалий слід у геоморфологічній будові та екологічному стані регіону.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувалась етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

В роботі не використано ресурс штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Денисик Г. І., Коптева Т. С. Криворізька ландшафтно-технічна система: розвиток, сучасний стан, шляхи оптимізації. *Фізична географія та геоморфологія*. 2021. № 105–107. С. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.17721/phgg.2021.1-3.03>
2. Казаков В. Л. Геоморфологія провальних зон Кривбасу. *Охорона довкілля : екологічні, освітянські, медичні аспекти* : Матер. IV Всеукр. конф. III ч. Кривий Ріг, 1999. С. 29–31.
3. Денисик Г. І., Задорожня Г. М. Похідні процеси та явища в ландшафтах зон техногенезу : монографія. Вінниця : Вінницька обласна друкарня, 2013, 220 с.

4. Hodge, R. A., Ericsson M., Löf O., Löf A., Semkowich, P. The global mining industry: Corporate profile, complexity, and change. *Mineral Economics*, 2022, 35(3–4), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00343-1>
5. Денисик Г. І., Казаков В. П., Ярков С. В. Сингенез рослинного покриву у ландшафтах зон техногенезу : монографія. Вінниця : ПП «Едельвейс і К», 2012, 240 с.
6. Денисик, Г. І., Козинська, І. П. Промислові ландшафти регіону видобутку уранових руд в Україні: монографія. Умань, Візаві, 2015, 282.
7. Задорожня Г. М. Просторово-часовий аналіз похідних процесів та явищ гірничопромислових ландшафтів Кривбасу. *Наукові записки Вінницького педуніверситету. Серія Географія*. 2010. Вип. 20. С. 82–90. URL: <https://dspace.vspu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/27d4b5b6-e9bb-4a0a-a546-1b0d1d6f81a8/content>
8. Казаков В. Л. Посттехногенний морфоскульптурний геоморфогенез. *Проблеми екології та екологічної освіти* : Матер. IV міжнар. наук.-практ. конф. Кривий Ріг: Етюд-сервіс, 2005. С. 64–67. URL: <https://dspace.vspu.edu.ua/items/ec40ca9a-2910-4a01-b585-670ce6a845f3>
9. Коптева Т. С. Поверхневий кар'єрно-відвальний ярус гірничопромислових ландшафтів Криворізької ландшафтно-технічної системи. *Ландшафтознавство*. 2025. Т. 7. № 1. С. 95–105. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2025-7-95-105>
10. Koptieva T. The sinkholes of the surface tier of mining landscapes in the Kryvyi Rih landscape-technical system. *Ideas and Innovations in Earth Sciences: Proceedings of the 10th International Geosciences Conference of Young Researchers*, Kyiv, Ukraine, May 23–24, 2024. 2024. P. 125–127. URL: <https://dspace.hnpu.edu.ua/handle/123456789/16038>
11. Коптева Т. С. До питання вивчення двоярусності антропогенних ландшафтів. *Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки*. 2024. № 2. С. 107–113. <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2024.2.14>
12. Сметана М., Гринько С. До класифікації ландшафтно-техногенних систем Криворіжжя. *Проблеми ландшафтного різноманіття України* : зб. наук. праць. Київ, 2000. С. 101–104.
13. Сметана М. Г., Гринько С. В. До класифікації провалів Криворіжжя. *Проблеми фундаментальної та прикладної екології* : Матер. III Міжнар. наук. конф. – Кривий Ріг : І.В.І., 2001. С. 120–122.
14. Черний Г. І. Зрушення порід лежачого боку в Криворізькому басейні. Київ : Вид-во АН УРСР, Інститут гірничої справи, 1959, 67 с.
15. Moffat K., Zhang A. Mining industry risks, and future critical minerals supply chains: A resilience framework. *Resources Policy*, 2024, 80, Article 102498. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102498>
16. Kemp D. Tailings facility failures in the global mining industry: Will a 'paradigm shift' improve the safety of tailings storage facilities? *Business Strategy and the Environment*, 2021, 30(2), 1191–1204. <https://doi.org/10.1002/bse.2613>
17. Behera A., Rawat, K. S. A brief review paper on mining subsidence and its geo-environmental impact. *Materials Today: Proceedings*, 2023. Article <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.183>
18. Żemła-Siesicka A., Szypuła B., Myga-Piątek U., Piechota A. How to assess landscape changes caused by land subsidence due to deep coal mining? Methodology tested in the mining area of Jastrzębie coal company (Southern Poland). *Environmental Impact Assessment Review*. 2025. Article 108025. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108025>
19. Козинська І. П. Підземний варіант промислових ландшафтів регіону видобутку уранових руд в Україні. *Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія: Географія*. Вінниця, 2015. Вип. 27, №1-2. С. 58–66.
20. Li, M.-G., Chen, J.-J., Xu, Y.-S., Tong, D.-G., Cao, W.-W., & Shi, Y.-J. Effects of groundwater exploitation and recharge on land subsidence and infrastructure settlement patterns in Shanghai. *Engineering Geology*. 2021. 282. Article 105995. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.105995>
21. Паранько І. С. Кривий Ріг – потенційна зона виникнення техногенно-природних і техногенних надзвичайних ситуацій. *Геолого-мінералогічний вісник*. 2005. № 1. С. 5–11.
22. Ahmed Z. The dynamic linkage between natural resources, human capital, and urbanization on ecological footprint in China. *Resources Policy*, 2020, 68, Article 101740. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101740>

Отримано: 17.09.2025 / Переглянуто: 10.11.2025 / Прийнято: 21.11. 2025 / Опубліковано: 30.12. 2025

T. S. KOPTIEVA, PhD (Earth Sciences),

Associate Professor of the Department of Socio-Economic Disciplines and Geography

-mail: koptevatania36@hnpu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9405-16744>

H. S. Skovoroda Kharkiv National Pedagogical University,

29, Alchevskykh Str., Kharkiv, 61000, Ukraine

FORMATION OF FAILURE RELIEF IN THE CONDITIONS OF MINING LANDSCAPES OF THE KRYVYI RIH LANDSCAPE-TECHNICAL SYSTEM

Purpose. To establish the patterns of formation and development of the failed relief as a transitional tier of the two-tier structure of mining landscapes of the Kryvyi Rih landscape-technical system and to assess its impact on the modern morphodynamics of the Kryvyi Rih landscape-technical system.

Methods. Field observations, geomorphological analysis, comparative-analytical method, cartographic modelling, GIS analysis.

Results: The relief is one of the key morphological elements of the two-tier structure of the mining landscapes of the Kryvyi Rih landscape-technical system. It was determined that the most intense zones of displacement are recorded within the boundaries of Sukha Balka OJSC, the Kolachevsky and Galkovsky ore management departments, the Oleksandrivsky mine, and the Kozatska mine. Two groups of sinkhole processes have been recorded: regular ones associated with planned mining activities and random ones caused by uncontrolled geodynamic factors. It has also been found that sinkholes form not only above mine workings, but also within the dumps located above them. The largest subsidence forms, in particular the subsidence zone of the Kozatska mine and the Galkovsky corner zone, demonstrate the high intensity of modern deformations of the earth's surface. Geomorphological analysis revealed the structural and morphological features of the two-tier structure of mining landscapes and traced the relationship between surface and underground processes. The comparative-analytical method made it possible to compare the current state of subsidence formations with data from previous observations, revealing a tendency towards an increase in the area of deformation zones. Cartographic modelling enabled the construction of maps showing the spatial distribution of subsidence zones within the main ore mining areas, while GIS analysis enabled the visualisation of spatial connections between surface and underground layers.

Conclusions: The collapsed relief is an integral component of the two-tier structure of the mining landscapes of the Kryvyi Rih landscape-technical system. It is formed as a transitional tier that connects the surface and underground levels, providing a morphogenetic link between them. Collapse processes are regular and random in nature, indicating the complex geodynamic activity of technogenically transformed massifs. The results obtained confirm the need for further monitoring of technogenic processes to prevent the development of dangerous situations and stabilise the landscape structure of the region.

KEYWORDS: *two-tier structure, mining landscape, Kryvyi Rih landscape-technical system, surface tier, underground tier, sinkhole relief, sinkhole, middle tier*

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. Furthermore, the author has fully adhered to ethical norms, including avoiding plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

The work does not use artificial intelligence resources.

References

1. Denysyk, H. I., & Koptieva, T. S. (2021). Kryvyi Rih landscape-technical system: development, current state, and ways of optimization. *Physical Geography and Geomorphology*, (105–107), 25–29. <https://doi.org/10.17721/phgg.2021.1-3.03>
2. Kazakov, V. L. (1999). Geomorphology of sinkhole zones of Kryvbas. In *Environmental Protection: Ecological, Educational, and Medical Aspects* (pp. 29–31). Kryvyi Rih. (in Ukrainian)
3. Denysyk, H. I., & Zadorozhnyia, H. M. (2013). Derivative processes and phenomena in the landscapes of technogenesis zones: *monograph*. Vinnytsia: Vinnytsia Regional Printing House. (in Ukrainian)
4. Hodge, R. A., Ericsson, M., Löf, O., Löf, A., & Semkowich, P. (2022). The global mining industry: Corporate profile, complexity, and change. *Mineral Economics*, 35(3–4), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00343-1>
5. Denysyk, H. I., Kazakov, V. P., & Yarkov, S. V. (2012). Syngeneses of plant cover in landscapes of technogenesis zones: *monograph*. Vinnytsia: PP “Edelweiss and K”. (in Ukrainian)
6. Denysyk, H. I., & Kozynska, I. P. (2015). Industrial landscapes of the uranium ore mining region in Ukraine: *monograph*. Uman: Vizavi,. (in Ukrainian)

7. Zadorozhnyia, H. M. (2010). Spatio-temporal analysis of derivative processes and phenomena of mining-industrial landscapes of Kryvbas. *Scientific Notes of Vinnytsia State Pedagogical University. Series: Geography*, (20), 82–90. Retrieved from <https://dspace.vspu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/27d4b5b6-e9bb-4a0a-a546-1b0d1d6f81a8/content> (in Ukrainian)
8. Kazakov, V. L. (2005). Post-technogenic morphosculptural geomorphogenesis. In *Problems of Ecology and Environmental Education: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference* (pp. 64–67). Kryvyi Rih: Etiud-Service. Retrieved from <https://dspace.vspu.edu.ua/items/ec40ca9a-2910-4a01-b585-670ce6a845f3> (in Ukrainian)
9. Koptieva, T. S. (2025). Surface quarry-dump tier of mining-industrial landscapes of the Kryvyi Rih landscape-technical system. *Landscape Science*, 7(1), 95–105. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2025-7-95-105> (in Ukrainian)
10. Koptieva, T. S. (2024). The sinkholes of the surface tier of mining landscapes in the Kryvyi Rih landscape-technical system. In *Ideas and Innovations in Earth Sciences: Proceedings of the 10th International Geosciences Conference of Young Researchers*, Kyiv, Ukraine, May 23–24, 2024 (pp. 125–127). Retrieved from <https://dspace.hnpu.edu.ua/handle/123456789/16038>
11. Koptieva, T. S. (2024). On the study of two-tieredness of anthropogenic landscapes. *Slobozhanskyi Scientific Bulletin. Series: Natural Sciences*, (2), 107–113. <https://doi.org/10.32782/naturalspu/2024.2.14> (in Ukrainian).
12. Smetana, M., & Hrynko, S. (2000). On the classification of landscape-technical systems of Kryvorizhzhia. In *Problems of Landscape Diversity of Ukraine: Collection of Scientific Papers* (pp. 101–104). Kyiv. (in Ukrainian)
13. Smetana, M. H., & Hrynko, S. V. (2001). On the classification of sinkholes of Kryvorizhzhia. In *Problems of Fundamental and Applied Ecology: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference* (pp. 120–122). Kryvyi Rih: I.V.I. (in Ukrainian)
14. Chernyi, H. I. (1959). Displacement of the footwall rocks in the Kryvyi Rih Basin. Kyiv: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Mining Affairs, 67 p. (in Ukrainian)
15. Moffat, K., & Zhang, A. (2024). Mining industry risks, and future critical minerals supply chains: A resilience framework. *Resources Policy*, 80, 102498. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102498>
16. Kemp, D. (2021). Tailings facility failures in the global mining industry: Will a 'paradigm shift' improve the safety of tailings storage facilities? *Business Strategy and the Environment*, 30(2), 1191–1204. <https://doi.org/10.1002/bse.2613>
17. Behera, A., & Rawat, K. S. (2023). A brief review paper on mining subsidence and its geo-environmental impact. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.183>
18. Żemła-Siesicka, A., & Szypuła, B., & Myga-Piątek, U., & Piechota, A. (2025). How to assess landscape changes caused by land subsidence due to deep coal mining? Methodology tested in the mining area of Jastrzębie coal company (Southern Poland). *Environmental Impact Assessment Review*, 108025. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108025>
19. Kozynska, I. P. (2015). The underground variant of industrial landscapes in the uranium mining region of Ukraine. *Scientific Notes of Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University. Series: Geography*, 27(1–2), 58–66. (in Ukrainian)
20. Li, M.-G., & Chen, J.-J., & Xu, Y.-S., & Tong, D.-G., Cao, W.-W., & Shi, Y.-J. (2021). Effects of groundwater exploitation and recharge on land subsidence and infrastructure settlement patterns in Shanghai. *Engineering Geology*, 282, 105995. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.105995>
21. Paranko, I. S. (2005). Kryvyi Rih – a potential zone of technogenic-natural and technogenic emergencies. *Geologo-Mineralogical Bulletin*, 1, 5–11 (in Ukrainian).
22. Ahmed, Z. (2020). The dynamic linkage between natural resources, human capital, and urbanization on ecological footprint in China. *Resources Policy*, 68, 101740. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101740>

Submission received: 17.09.2025 / Revised: 10.11.2025 / Accepted: 21.11. 2025 / Published: 30.12. 2025