

УДК 622.83:504.53:528.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-3>

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗВИТКУ ПРОВАЛЬНИХ ЗОН ШАХТ ТА ЇХ ВПЛИВУ НА РОСЛИННИЙ ПОКРИВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Петльований Михайло Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри гірничої інженерії та освіти

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-8911-4973

Бучавий Юрій Володимирович,

кандидат біологічних наук, доцент,

доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-3282-2810

Легеца Юлія Олександрівна,

доктор юридичних наук, професор,

професор кафедри цивільного, господарського та екологічного права

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-4896-3178

Дослідження спрямоване на вивчення просторово-часових змін провальної зони залізорудної шахти та кількісну оцінку її довготривалого деструктивного впливу на рослинний покрив прилеглих територій. В основу методики покладено просторово-часовий аналіз даних дистанційного зондування Землі за період 1941–2025 рр., який включає опрацювання історичної аерофотозйомки, а також сучасних матеріалів супутників Landsat і Sentinel-2. Для оцінки стану фітоценозів у буферних зонах 0–50, 50–100 м та на контрольній ділянці розраховано нормалізований вегетаційний індекс NDVI. Встановлено, що розширення провалу з 7,8 до 38,5 га достовірно описується логарифмічною залежністю та чітко поділяється на дві фази: активну до 1990 р. та стадію затухання. Доведено наявність вираженого просторового градієнта деградації рослинного покриву: у ближній буферній зоні 0–50 м частка щільної фітомаси становить лише 8,8%, а середні показники NDVI за останнє десятиріччя мають стійкий негативний тренд. Визначено, що у фазі затухання геомеханічних процесів просторовий розвиток провалу не зупиняється, а продовжується у вигляді кумулятивного ефекту, формуючи стрес для рослинного покриву прилеглих територій. Рекомендовано розвивати напрям від переходу від низькоефективної засипки провалів пустими породами до застосування технологій монолітного закладання утворених відкритих техногенних пустот на основі відходів збагачення залізних руд для надійного блокування зсувів та консервації порушених земель.

Ключові слова: провальна зона, дистанційне зондування, вегетаційний індекс NDVI, рослинний покрив, деградація земель.

Petlovanyi Mykhailo, Buchavyi Yurii, Leheza Yuliia. Study of the evolution of mine collapse zones and their effect on vegetation cover using remote sensing techniques

The study is aimed at investigating the spatio-temporal evolution of a subsidence zone at an iron ore mine and providing a quantitative assessment of its long-term destructive impact on the vegetation cover of adjacent territories. The methodology is based on a spatio-temporal analysis of remote sensing data for the period 1941–2025, including the processing of historical aerial photographs as well as modern satellite imagery from Landsat and Sentinel-2 missions. To evaluate the condition of phytocoenoses within buffer zones of 0–50 and 50–100 m, as well as at a control site, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated. It was established that the expansion of the subsidence area from 7.8 to 38.5 ha is reliably described by a logarithmic relationship and can be clearly divided into two phases: an active phase until 1990 and a subsequent attenuation stage.

The presence of a pronounced spatial gradient of vegetation degradation has been demonstrated: within the nearest buffer zone (0–50 m), the proportion of dense vegetation cover is only 8.8%, while the mean NDVI values over the past decade exhibit a persistent negative trend. It has been determined that during the attenuation phase of geomechanical processes, the spatial development of the subsidence zone does not cease but continues in the form of a cumulative effect, thereby imposing sustained stress on the vegetation cover of surrounding areas. It is recommended to shift from low-efficiency practices of backfilling subsidence zones with waste rock toward the implementation of monolithic paste backfilling technologies based on iron ore beneficiation tailings, ensuring reliable stabilization of ground movement processes and effective reclamation of disturbed lands.

Key words: subsidence zone, remote sensing, NDVI, land degradation, vegetation cover.

Вступ. Видобуток мінеральних ресурсів має пріоритетне значення для розвитку економік багатьох країн та є основою створення високих технологій, виробництва товарів та надання послуг [1; 2]. Гірничодобувна галузь формує близько 6,9% глобального валового внутрішнього продукту, забезпечуючи людство критично важливими матеріалами [3; 4]. Проте, існує і негативна сторона цього інтенсивного технологічного процесу, що характеризується значним та часто руйнівним, незворотнім впливом на природне навколишнє середовище. При розробці родовищ корисних копалин як відкритим, так і підземним способами безпосередньо найбільшого впливу зазнає верхній шар літосфери [5–7]. Вилучення значних обсягів гірничої маси з надр викликає масштабне порушення геомеханічної рівноваги масиву гірських порід, що призводить до зниження його стійкості та деформацій земної поверхні, а також обумовлює необхідність складування багатотоннажних відходів видобутку та переробки на земній поверхні. Так, внаслідок видобутку мінеральної сировини у світі щорічно вилучається, за деякими оцінками, понад 150 млрд т гірничої маси, з яких виходить близько 60–65 млрд т корисних копалин, при цьому утворюється 72 млрд тонн пустих порід і 13 млрд т хвостів збагачення [8].

Україна сьогодні входить до топ-20 країн світу за площею земель, зайнятих об'єктами гірничодобувної промисловості [9]. Згідно національної доповіді про стан навколишнього середовища [10], видобутком мінеральних ресурсів зайнято понад 52,7 тис. га земельних площ, серед яких найбільшого впливу зазнають Дніпропетровська, Донецька та Житомирська області. Серед усіх гірничодобувних галузей України особливо виразною, з точки зору позитивного економічного та негативного екологічного впливу, є залізорудна. Незважаючи на вагомий прибуток до державного бюджету від експорту продукції гірничо-металургійного комплексу, у найбільш крупному та важливому Криворізькому залізорудному басейні внаслідок масштабного відкритого та підземного видобутку склалась важка техногенно-екологічна ситуація. Особливо гостро сьогодні у Кривбасі постають проблеми значних та руйнівних деформацій земної поверхні, які на відміну від вугільних родовищ характеризуються більш глибокими формами деформацій у вигляді провальних зон та масштабне накопичення на земній поверхні багатотоннажні відходи видобутку та переробки залізної руди, що займають значні площі та чинять забруднення довкілля [11–13].

Сьогодні для превентивної оцінки впливу підземних гірничих робіт на стан земної поверхні пріоритетне значення мають непрямі методи дослідження, зокрема дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) [14; 15]. Використання багатоспектральних супутникових даних дозволяє забезпечити високу періодичність моніторингу та об'єктивність аналізу масштабних територій гірничих відводів та їх впливу на рослинний стан земної поверхні. Значний масив сучасних наукових праць сконцентрований на вивченні деформацій земної поверхні та трансформації верхнього ґрунтово-рослинного шару внаслідок розробки переважно пологих пластових родовищ, а саме вугільних родовищ [16; 17]. У таких умовах основна увага дослідників зосереджена на механізмах формування мульд осідання, де зрушення відбуваються порівняно плавно, а також на питаннях моніторингу ефективності подальшої біологічної рекультивації цих земель [18; 19]. Проте, незважаючи на вагомий досягнення поза увагою наукової спільноти залишається аналіз еволюції саме утворених масштабних провальних зон, що характерні для інтенсивного підземного видобутку залізних руд та ймовірно поступову деградацію фітоценозів на прилеглих територіях, що потребує застосування вегетаційних індексів, зокрема NDVI. Представлене дослідження спрямоване на заповнення зазначених наукових прогалин шляхом комплексного вивчення просторово-часової динаміки розвитку провальної зони діючої залізорудної шахти та кількісної оцінки її довготривалого деструктивного впливу на стан рослинного покриву прилеглих буферних територій.

Методи та методики дослідження. У представленою дослідженні просторово-часова динаміка зміни провальної зони залізорудної шахти та її вплив на ґрунтово-рослинний покрив прилеглої території розглядається на прикладі шахти «Козацька» ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат». Географічно підприємство розташоване на західній околиці міста Кривий Ріг і геологічно приурочене до центральної частини Саксаганського рудного району Кривбасу (рис. 1).

Історія підземного видобутку в межах сучасного гірничого відводу шахти бере початок із 1907 року. Упродовж понад століття експлуатація родовища здійснювалася під різними назвами, зокрема шахти «Ходзинська», «Червона Гвардія», Рудоуправління ім. Р. Люксембург, «Гвардійська». Шахта «Козацька» розробляє крутоспадні поклади багатих залізних руд із кутом падіння 54–65° та горизонтальною потужністю від 10 до 30 м. На сьогодні ведення очисних робіт здійснюється на глибинах 1300–1400 м системами підповерхового обвалення руди та

порід, а також камерними системами. Тривалий період інтенсивного відпрацювання рудних тіл без закладання виробленого простору закономірно призвів до зсувних процесів і утворення на земній поверхні масштабної провальної зони. Провальна зона має витягнуту форму з наступними параметрами: протяжність за простяганням становить близько 1000 м, розмір навхрест простягання в межах 300–570 м, а глибина досягає 100–120 м. Саме історична еволюція площі цієї провальної зони та оцінка його її впливу на процеси деградації рослинного покриву прилеглих ландшафтів є основним предметом подальшого аналізу.

Динаміка зміни площі провальної зони на земній поверхні є прямим індикатором інтенсивності процесів зрушення у підробленому масиві гірських порід при розробці рудних покладів. Для відтворення еволюції та оцінки масштабів розвитку провальної зони ш. «Козацька» застосовано вдосконалену методику просторово-часового аналізу, що базується на використанні широкого масиву даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) за період 1941–2025 рр. Основну базу дослідження розвитку провальної зони ш. «Козацька» на ранніх етапах склали архівні матеріали німецької аерофоторозвідки (1941–1944 рр.) та декласифіковані знімки американських систем 1960–1980 рр. (місії Corona та Hexagon,), отримані з відкритого веб-порталу історичних просторових даних [20]. Моніторинг за період з 1984 року і дотепер здійснювався на основі даних супутникових зображень Landsat 4, 5, 7, 8, 9 через ГІС-платформу Google Earth Pro з використанням інструменту «Історичні знімки». Процедура обробки візуальних даних передбачала оцифрування контурів провальної зони для кожного доступного хронологічного зрізу, що дозволило кількісно зафіксувати приріст площі порушених земель та сформулювати репрезентативний динамічний часовий ряд. Отримані результати просторового аналізу використано для встановлення векторів домінуючого розширення провалів і виявлення їхніх кореляційних зв'язків із гірничо-геологічними чинниками відпрацювання шахтних полів. На заключному етапі виконано математичну апроксимацію емпіричних даних із побудовою графічних залежностей зміни площі в часі, що дозволило оцінити кінетику зрушення масиву гірських порід та спрогнозувати подальший розвиток деформацій земної поверхні.

Територією дослідження, де вивчалась змінність рослинності були прилеглі до провальної зони ш. «Козацька» буферні зони на відстані від її контуру до 50 і до 100 м відповідно, а також

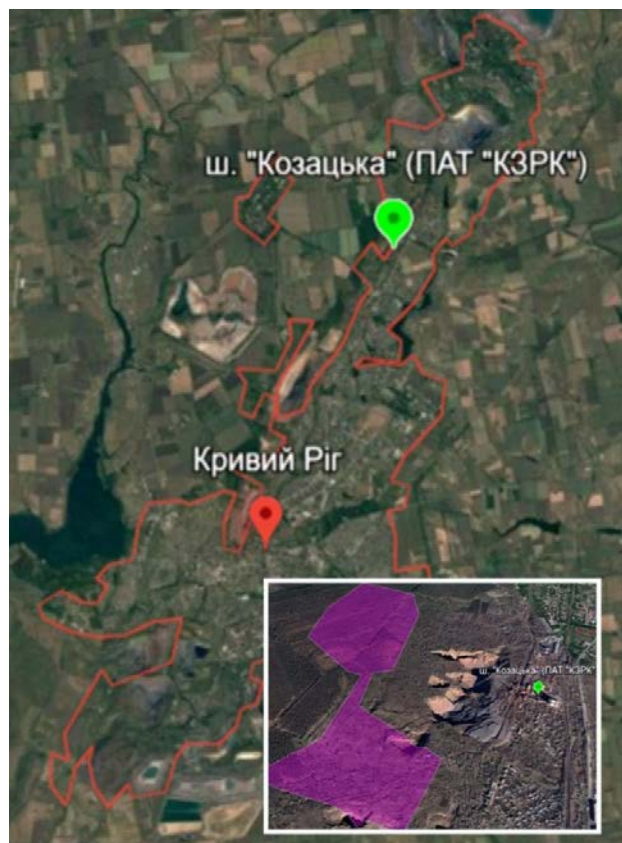


Рис. 1. Геопросторове розташування ш. «Козацька» та досліджуваної утвореної провальної зони

контрольна ділянка лісостепового ландшафту, без ознак впливу гірничих робіт на відстані 500 м у північно-східному напрямку від основної провальної зони ш. «Козацька». Слід зазначити, якщо при дослідженні динаміки розвитку у просторі й часі приймалась загальна провальна зона ш. «Козацька», то при дослідженні зміни рослинного покриву провальна зона поділена на провал 1 (основний) та провал 2, що виник у 1990 році, адже між ними ще досі зберігається ділянка ґрунтового-рослинного покриву 50 м. На досліджуваній території визначалися характеристики змін рослинності за період 2016–2025 рр. Для оцінки змін характеристик рослинних угруповань на дослідженій території у просторі та часі використовувались технології дистанційного зондування, а саме багатоспектральні аерофотознімки від супутнику Sentinel-2, який веде місію з 2015 р. Перевагою використання знімків даного супутнику є відносно висока роздільна здатність кольорових та інфрачервоного каналів, необхідних для розрахунку вегетаційних індексів, а також частота зйомки в середньому раз на тиждень і доступний репозиторій архівних аерофотознімків онлайн-ресурсу Copernicus Open Hub Access [21].

Для оцінки характеристик рослинних угруповань використовувався нормалізований вегетаційний індекс NDVI, який ототожнюється із фотосинтетично активною фітомасою та має сьогодні широке застосування через простоту розрахунку й чітку інтерпретацію його значень. Даний індекс розраховується за формулою:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED).$$

де *RED* – значення відбиття від земної поверхні, що надходить на сенсор супутника в червоному діапазоні; *NIR* – відповідно в інфрачервоному діапазоні.

Таким чином, значення NDVI завжди перебуватиме в діапазоні від -1 до 1 та може бути охарактеризовано наступним чином для зонування земної поверхні: NDVI < 0 – водні об'єкти, каміння, забудова тощо; від 0 до 0,3 – відкритий ґрунт; від 0,3 до 0,4 – розряджена або пригнічена рослинність; від 0,4 до 0,5 – нормальна рослинність степового ландшафту; вище за 0,5 – густа рослинність, деревостан тощо. Фізичний сенс цього індексу полягає в тому, що у видимій області спектру (0,4–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній області (0,7–1,0 мкм) знаходиться область максимального відображення клітинних структур листа. Тобто висока фотосинтетична активність, що пов'язана, як правило, з густою рослинністю веде до меншого відображення у видимій області спектру і більшому в інфрачервоній.

Відбір та аналіз аерофотознімків для аналізу індексу NDVI здійснювався з врахуванням відсутності хмар на відповідний період часу та у піковий період вегетативної активності зелених насаджень, який зазвичай припадає на другу половину червня. Попередня обробка аерофотознімків здійснювалася в програмі SNAP 12 із подальшим експортом вегетаційних індексів та композитних *RGB* зображень до зформованої геоінформаційної системи в програмі

ESRI ArcGIS Desktop 10 для проведення геопросторового аналізу (Spatial Analyst).

Результати дослідження та дискусія.

У результаті комплексної обробки, просторової прив'язки та векторизації масивів даних дистанційного зондування Землі було відтворено еволюційну картину формування зони зрушення над відпрацьованим простором ш. «Козацька». Для візуалізації масштабів та характеру техногенного впливу відібрано найбільш репрезентативні просторово-часові фрагменти, що ілюструють основні етапи деформації земної поверхні впродовж 84-річного періоду моніторингу (рис. 2). Представлений хронологічний візуальний ряд демонструє не лише кількісний приріст площі провальної зони, але й фіксує якісні зміни контурів руйнування та просторову асиметрію розвитку відносно головної осі простягання рудного покладу.

Аналіз рис. 2 свідчить, що найбільш ранній із доступних знімків стану земної поверхні в межах гірничого відводу ш. «Козацька» датується 1941 роком. На знімку чітко зафіксовано дві первинні ізольовані провальні воронки загальною площею 7,8 га, між якими також візуалізуються невеликі кар'єри, що відпрацьовували виходи рудного тіла під наноси.

Враховуючи історичні дані про те, що підземна розробка старими шахтами на цій ділянці розпочалася ще у 1907 році, а системний інтенсивний видобуток розгорнувся з 1923 року, можна стверджувати, що розвиток початкових обвалень земної поверхні припадає на часовий інтервал 1923–1941 рр. У подальші десятиріччя гірничі роботи активно розвивалися по площі найбільшого рудного покладу «Східний-Північний», що супроводжувалося формуванням значних об'ємів підземного виробленого простору. Як наслідок, інтенсифікація процесів зрушення та руйнування налягаючої товщі порід призвела до поступового розширення локальних провальних воронок та їхнього закономірного

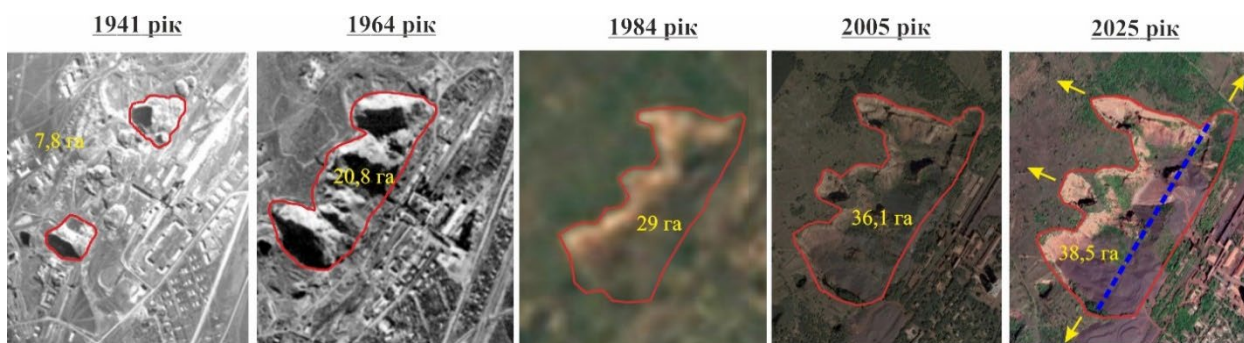


Рис. 2. Хронологічні фрагменти розвитку провальної зони ш. «Козацька»

поєднання в єдину суцільну провальну зону з вже поступовим збільшенням її контуру.

Слід відзначити, що просторовий розвиток провальної зони ш. «Козацька» має чітко виражений анізотропний характер і визначається геометрією рудного покладу та умовами зрушення масиву гірських порід. Аналіз сучасного стану на 2025 р. показує, що основне розширення провальної зони відбувається вздовж простягання покладу, що підтверджується орієнтацією витягнутої форми провалу та напрямком його подовження, який збігається з напрямком простягання рудного покладу (синя пунктирна лінія). Водночас у поперечному напрямку виділяються локальні ділянки інтенсивного розростання по периферії провальної зони, які приурочені до бортів та ділянок із підвищеною тріщинуватістю масиву та проявами екзогенних процесів й призведе до поступового утворення нових тріщин на земній поверхні зі сторони висячого боку. Такий характер просторового розвитку обумовлює поступове залучення до зони впливу прилеглих територій, зокрема природних ландшафтів, ділянок ґрунтового-рослинного покриву та елементів інфраструктури, розташованих у напрямках подальшого поширення провалу, що створює потенційні ризики їх деградації та потребує розробки нових заходів з його блокування. Важливо зазначити, що засипка провальних зон пустими шахтними породами вірогідно не вирішить проблеми, адже насипний

масив володіє пустотністю та здатністю до ущільнення.

У результаті визначення зміни площі провальної зони ш. «Козацька» за супутниковими знімками у певний проміжок часу виявлена залежність зміни у часі, що ілюструється на рис. 3. Аналіз результатів показує виражену динаміку зміни площі провальної зони шахти у часі, при цьому характер залежності найбільш точно, як з математичної, так і з геомеханічної точок зору, описується логарифмічною функцією. Така математична модель адекватно відображає фізичну суть механізму зсувних процесів, де початковий інтенсивний розвиток обвалення земної поверхні змінюється ефектом поступового затухання та просторової стабілізації обваленого масиву гірських порід і, як наслідок, провальної зони на земній поверхні. Хронологічний аналіз графіка дозволяє виокремити дві виразні фази прояву деформацій земної поверхні.

Перша фаза, що включає період 1941–1990 рр., характеризується інтенсивним руйнуванням земної поверхні та активним формуванням провальних форм і за цей період площа порушених земель стрімко зростає з 7,9 до 33,2 га, а приріст складає понад 320%. Виявлена кількісна динаміка повністю узгоджується з уявленнями криворізьких вчених, зокрема з дослідженнями проф. М. І. Ступніка [22] щодо наявності певної критичної глибини розробки,

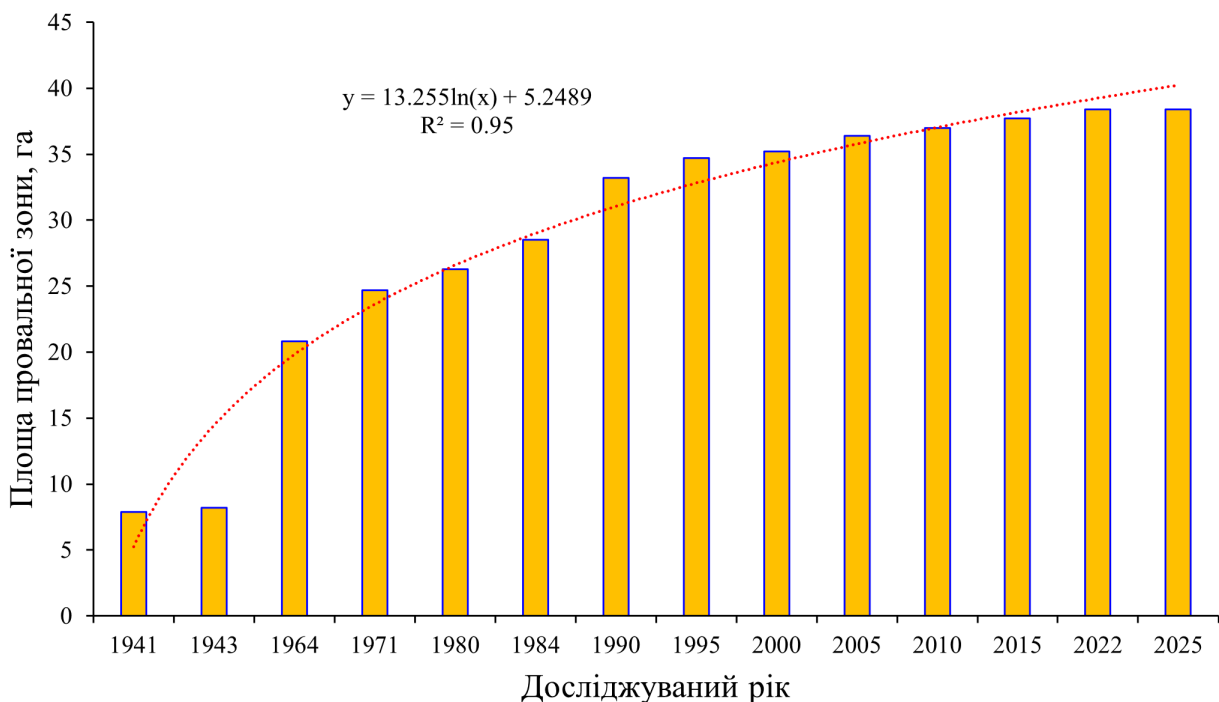


Рис. 3. Динаміка зміни площі провальної зони ш. «Козацька» за період 1941–2025 рр.

після досягнення якої активна стадія зрушення припиняється. Таке геомеханічне явище пояснюється тим, що обвалені у вироблений простір породи формують торцевий розпір та зацмелення, підтримуючи підроблений масив. Для гірничо-геологічних умов ш. «Козацька» така критична глибина становить близько 600 м. Враховуючи, що глибина гірничих робіт у 1964 році складала 550 м, а до 1986 року досягла 1100 м, саме в цей період відбувся перехід через критичну позначку й простежується найбільш виражена кінетика розширення провалу.

Друга фаза, яка наступила орієнтовно з 1990 років і дотепер, ідентифікується як стадія затухання процесів деформації вже без ознак масштабних активних руйнувань. Так, за останні 35 років приріст площі значно сповільнився і склав 5,2 га, тобто 15,6%. Проте, отримані результати дослідження акцентують увагу на важливому аспекті, якому раніше не приділялося достатньої уваги, – незважаючи на настання фази відносно стабілізації, просторове розширення провальної зони не зупиняється повністю, а продовжується зі зниженою швидкістю. На погляд авторів такий геомеханічний феномен пояснюється синергетичним ефектом комплексної дії гірничотехнічних та природних факторів. З одного боку, в порушеному масиві висячого боку ще реалізуються залишкові деформації, зумовлені вторинним ущільненням обрушених порід та їх частковим перепуском у вироблений простір під час відпрацювання глибших горизонтів. З іншого боку, відкрита провальна зона зазнає впливу екзогенних кліматичних чинників, а саме водної та вітрової ерозії, внаслідок яких відслонення скельних бортів і наносні породи продовжують руйнуватися та сповзати у провальний простір.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що поступове розширення провальних зон створює постійну загрозу для прилеглої інфраструктури, а також сприяє деградації ґрунтового покриву та природних екосистем, що функціонують на контакті з активною провальною зоною. У подальшому досліджується стан рослинності на прилеглий території до провальної зони ш. «Козацька».

Для наочного відображення характеристик зміни рослинності на прилеглий до провальної зони території було виконано картографування досліджених ділянок за вегетаційними індексами, результати якого представлено на рис. 4. Верхня пара мап (рис. 4, а, б) візуалізує просторовий розподіл вегетаційного індексу NDVI за літні періоди 2016 і 2025 років. Візуальний аналіз засвідчує помітне погіршення стану

рослинного покриву в межах буферних зон довкола провальних зон у 2025 році порівняно з 2016 роком, тоді як на контрольній ділянці фітомаса залишається візуально стабільною. Результати зонально-статистичного аналізу, проведеного у межах досліджуваних полігонів, кількісно підтверджують цю тенденцію. Так, станом на 2016 рік середньозважені значення індексу становили 0,400 і 0,420 для ближньої (50 м) та дальньої (100 м) буферних зон відповідно, і 0,450 для контрольної ділянки. Проте, у 2025 році ці показники деградували до 0,361 та 0,385 для відповідних буферних зон, у той час як на контрольному полігоні значення залишилося майже незмінним (0,448). Загалом значення NDVI впродовж усього періоду моніторингу варіювали в діапазоні від -0,071 до 0,700, що було прийнято за єдину базову макрошкалу для коректного порівняльного картографування. Значення NDVI за весь період спостережень в межах досліджених ділянок перебували в діапазоні від -0,071 до 0,7, що стало базовою шкалою для відображення на мапах.

На нижній парі мап (рис. 4, в, г) представлено усереднені значення NDVI за період 2016–2025 рр., отримані шляхом калькуляції відповідних растрів, що дає більш вагому характеристику стану рослин через нівелювання сезонних (річних) коливань. Отже, за період 2016–2025 рр. усереднені показники NDVI становили 0,425 і 0,445 для ближньої та дальньої буферної зони відповідно, та 0,493 для контрольної ділянки.

Нижня права мапа (рис. 4, г) уточнює розподіл за класами NDVI на досліджених ділянках. Результати зонально-статистичного розподілу площ за класами NDVI представлені у табл. 1. Аналіз даних таблиці кількісно підтверджує виражену зміну структури та якості рослинного покриву залежно від віддаленості від краю провальних зон.

Так, у ближній буферній зоні, на відстані 0–50 м від провальних зон, ступінь озеленення становить 75%, при цьому на розряджену рослинність припадає 21%, на нормальну рослинність 45%, і лише 9% на щільну рослинність. З віддаленням від епіцентру провальних зон у буферній зоні на відстані 50–100 м) чітко простежується тенденція до покращення фітоценозів. Основним індикатором послаблення техногенного впливу провальної зони є якісна трансформація класів NDVI. Визначено, що площа розрідженої рослинності зменшується майже вдвічі до 12,9%), проте частка нормальної рослинності зростає до 54,7%, а щільної – до 19,8%. Для об'єктивного порівняння, еталонна контрольна ділянка лісостепового ландшафту,

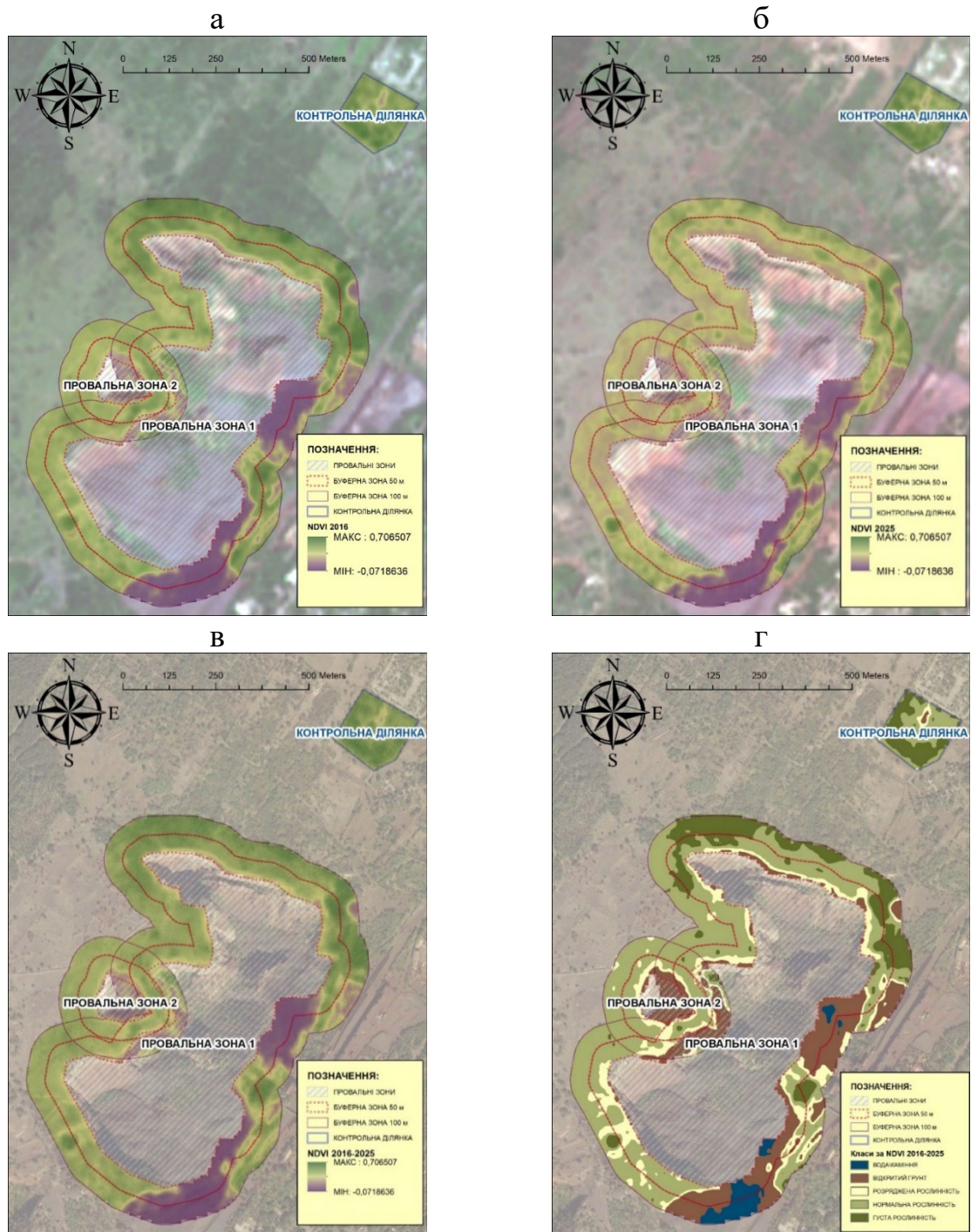


Рис. 4. Аналіз динаміки стану рослинності за показником NDVI: а – ситуація на червень 2016 р.; б – ситуація на червень 2025 р.; в – усереднені значення за період 2016–2025 рр.; г – класифікація за усередненими значеннями NDVI за період за період 2016–2025 рр.

яка не зазнає впливу гірничих робіт, демонструє принципово інший зонально-статистичний розподіл. Визначено, що ступінь її озеленення сягає понад 98%, причому майже половина площі 49,1% вкрита щільною здоровою рослинністю, ще 44,8% припадає на нормальну вегетацію, а розріджені ділянки та відкриті ґрунти складають лише 4,3 та 1,8% відповідно.

Детальний зонально-статистичний розподіл доводить, що провальна зона виступає не лише фактором повного руйнування земної поверхні під час масового обвалення, але й фактором пригнічення прилеглих природних екосистем у подальшій перспективі. Важливо, що негативний вплив має яскраво виражений градієнтний характер прояву, що призводить до помітного

розрідження фітомаси у міру наближення до контуру провальної зони.

Для більш детального розуміння часової еволюції стану фітоценозів проаналізовано динаміку середньозважених значень NDVI, що дозволяє простежити характер реакції рослинності у досліджуваних буферних зонах і на еталонній ділянці протягом десятирічного періоду моніторингу (рис. 5).

Аналіз гістограми (рис. 5) свідчить про наявність виражених міжрічних коливань значень вегетаційного індексу NDVI, що є природним явищем, зумовленим регіональною мінливістю гідрометеорологічних умов. Так, наприклад,

фіксуються контрастні показники вегетації у сприятливому 2021 році порівняно із більш посушливими 2022 і 2025 роками. Проте, важливим результатом є те, що ці коливання відбуваються синхронно на всіх трьох ділянках, зберігаючи при цьому чітку просторову закономірність.

Детальний аналіз часового ряду дозволяє виявити стійку негативну тенденцію та спадний тренд у динаміці розвитку фітоценозів навколо провальної зони. Якщо на еталонній контрольній ділянці значення NDVI впродовж десятиріччя коливаються на рівні 0,45–0,55, то у буферних зонах простежується поступова довгострокова

Таблиця 1

Зонування розподілу території навколо провальних зон за класами NDVI та контрольної ділянки (усереднені значення за період 2016–2025 рр.)

Територія	Водакаміння		Ґрунти		Розряджена рослинність		Нормальна рослинність		Щільна рослинність	
	м ²	%	м ²	%	м ²	%	м ²	%	м ²	%
<i>На відстані 0–50 м від провальних зон</i>										
Провальна зона 1	5100	3,4	36100	24,0	28100	18,6	65700	43,6	15700	10,4
Провальна зона 2	0	0,0	4000	13,6	9200	31,2	16100	54,6	200	0,7
Сума (середній, %)	5100	2,8	40100	22,3	37300	20,7	81800	45,4	15900	8,8
<i>На відстані 50–100 м від провальних зон</i>										
Провальна зона 1	7800	5,2	33000	21,9	16400	10,9	72500	48,1	34200	22,7
Провальна зона 2	0	0,0	10900	36,9	6800	23,1	26000	88,1	1500	5,1
Сума (середній, %)	7800	4,3	43900	24,4	23200	12,9	98500	54,7	35700	19,8
Контрольна ділянка	0	0,0	500	1,8	1200	4,3	12400	44,8	13600	49,1



Рис. 5. Динаміка усереднених значень NDVI рослинного покриття прилеглих до провальних зон територій за період 2016-2025 рік

деградація. У найбільш вразливій зоні (0–50 м) показники вегетації знизилися з 0,38 у 2016 році до критичних 0,33 у 2025 році. Такий факт доводить, що незалежно від сприятливості сезонних кліматичних факторів, геомеханічний та ерозійний вплив провальної зони чинить стресовий тиск на прилеглу екосистему, знижуючи її біологічну продуктивність порівняно з природним фоном.

Певним обмеженням даного дослідження є те, що високоточний ретроспективний аналіз екологічного стану за вегетаційним індексом NDVI охоплює лише період 2016–2025 рр., тоді як фаза умовної стабілізації геомеханічних процесів розпочалася ще у 1990-х роках. Використання більш ранніх супутникових архівів, наприклад, як старих даних Landsat для оцінки рослинності минулих десятиріч ускладнене їхньою низькою просторовою роздільною здатністю 30×30 м, що не дозволяє провести адекватне мікрозонування вузьких буферних ділянок шириною 50–100 м. Проте, навіть отриманий 10-річний масив даних NDVI доводить, що перебування провальної зони у фазі затухання не означає припинення її впливу, а процес розширення продовжується у вигляді кумулятивного повзучого ефекту, що потребує нових підходів екологічної безпеки та консервації порушених земель. Традиційні рішення щодо блокування розвитку провалів шляхом їх засипки пустими шахтними породами є мало-ефективними, оскільки насипний масив характеризується високою пористістю, здатністю до вторинного ущільнення та не створює надійного підпору для висячого боку родовища. Більш перспективним та надійним варіантом, хоча й економічно витратнішим на етапі впровадження, є заповнення відкритих техногенних пустот пастовим монолітним закладанням на основі хвостів збагачення залізних руд [23]. Такий підхід дозволить створити більш жорсткий штучний масив, частково блокувати зсувні процеси прилегло до провальних зон шару земної поверхні та зменшити подальшу деградацію прилеглих екосистем.

Також перспективи подальших наукових пошуків пов'язані з поглибленим вивченням трансформації ґрунтово-рослинного шару за допомогою індексів SAVI та NDWI, що дозволить кількісно оцінити дефіцит вологи в ґрунтах,

спричинений дренажним впливом техногенної тріщинуватості навколо провальної зони.

Висновки.

1. Встановлено, що просторово-часова динаміка розвитку провальної зони шахти «Козацька» за період 1941–2025 рр. достовірно описується логарифмічною залежністю і поділяється на дві виразні фази. Перша активна фаза до 1990 року характеризувалася стрімким руйнуванням земної поверхні із приростом площі понад 320%. Друга фаза з 1990 року та дотепер є стадією затухання, проте розширення меж обвалення не зупинилося повністю й триває зі зниженою швидкістю вздовж осі простягання рудного покладу й убік висячого боку за рахунок синергетичної дії залишкових деформацій масиву та екзогенних ерозійних процесів.

2. Виявлено чітко виражений просторовий градієнт екологічної деградації прилеглих територій під впливом геомеханічних зрушень. Зонально-статистичний аналіз значень індексу NDVI довів, що у ближній буферній зоні 0–50 м від кромки провалу рослинність зазнає максимального стресу. Частка щільної фітомаси є вельми низькою 8,8%, тоді як майже половина території перетворена на відкриті ґрунти та пригнічені ділянки. З віддаленням до 100 м фіксується послаблення техногенного тиску та відновлення рослинності, проте її параметри залишаються суттєво гіршими за еталонний природний фон.

3. Визначено, що впродовж останнього десятиріччя 2016–2025 рр. стан фітоценозів навколо провальної зони має стійку негативну тенденцію до погіршення. Незалежно від сприятливості сезонних кліматичних факторів, показники вегетації у найбільш вразливій буферній зоні мають тренд до зниження з 0,38 до 0,33, що підтверджує поступову деградацію ґрунтово-рослинного покриву.

Підтримка. Дослідження проводилося у рамках прикладного наукового проєкту «Розробка нових прикладних і нормативних рішень для ресурсоефективної утилізації техногенних відходів та ліквідації пустот гірничорудних регіонів у контексті циркулярної економіки» (№ державної реєстрації 0126U001271), що фінансується Міністерством освіти та науки України за рахунок державного бюджету.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ericsson M., Löf O. Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*. 2019. Vol. 32(2). P. 223–250. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00191-6>
2. Pell R., Tijsseling L., Goodenough K., Wall F., Deak D., Yan X., Li C. Towards sustainable extraction of technology materials through integrated approaches. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021. Vol. 2(10). P. 665–679. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00211-6>

3. Araujo F. S. M., Taborda-Llano I., Nunes E. B., Santos R. M. Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences*. 2022. Vol. 12(9). Art. 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
4. International Energy Agency. *The role of critical minerals in clean energy transitions*. 2021. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
5. Maus V., Giljum S., Gutschlhofer J., da Silva D. M., Probst M., Gass S. L. B., Luckeneder S., Lieber M., McCallum I. A global-scale data set of mining areas. *Scientific Data*. 2020. Vol. 7(1). Art. 289. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00624-w>
6. Salmi E. F., Nazem M., Karakus M. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence. *Engineering Geology*. 2017. Vol. 217. P. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.021>
7. Werner T. T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*. 2019. Vol. 6(3). P. 993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>
8. Franks D. M., Keenan J., Tonda E., Kariuki A. *Mineral resource governance and the global goals: An agenda for international collaboration*. 2022. Summary of the UNEA 4/19 Consultations.
9. Sonter L. J., Dade M. C., Watson J. E. M., Valenta R. K. Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11(1). Art. 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
10. *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році*. 2022. Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 514 с.
11. Bazaluk O., Petlovanyi M., Sai K., Chebanov M., Lozynskyi V. 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*. 2024. Vol. 12. Art. 1480344. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344>
12. 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>
13. Петльований М. В. Особливості утворених зон обвалення земної поверхні від впливу підземної розробки крутоспадних рудних покладів в умовах Кривбасу. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2024. № 79. С. 63–83. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.063>
14. Tassi A., Vizzari M. Object-oriented LULC classification in Google Earth engine combining SNIC, GLCM, and machine learning algorithms. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12(22). Art. 3776. <https://doi.org/10.3390/rs12223776>
15. Yang Z., Li J., Li P. Satellite-based monitoring of surface deformation and its impact on vegetation in mining areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 112. Art. 102943. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102943>
16. Lechner A. M., Baumgartl T., Matthew P., Glenn V. The impact of underground coal mining on surface vegetation and hydrology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2016. Vol. 232. P. 117–126.
17. Fan H., Cheng L., Lu L. Impact of coal mining subsidence on the quality of cultivated land and vegetation health. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 312. Art. 127738. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127738>
18. Buta M., Blaga G., Paulette L., Păcurar I., Roșca S., Borsai O., Grecu F., Sînziana P. E., Negrușier C. Soil Reclamation of abandoned mine lands by revegetation in Northwestern Part of Transylvania: A 40-year retrospective study. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(12). Art. 3393. <https://doi.org/10.3390/su11123393>
19. Karan S. K., Samadder S. R., Maiti S. K. Assessment of the spatio-temporal changes of vegetation cover in coal mining areas using multi-temporal satellite images. *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 61. P. 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.049>
20. *OldMaps*. Retrived from: <https://oldmaps.com.ua/>
21. *Copernicus Data Space Ecosystem Browser*. Retrived from: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
22. Ступнік М. І., Маланчук Є. З. Визначення параметрів зон зсуву і обвалення наносних глинистих порід при підземній розробці рудних родовищ. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2011. Вип. 3(55). С. 178–182.
23. Petlovanyi M., Sai K. Research into cemented paste backfill properties and options for its application: Case study from a Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. Vol. 18(4). P. 162–179. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.162>

REFERENCES:

1. Ericsson, M., & Löf, O. (2019). Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*, 32(2), 223–250. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00191-6>
2. Pell, R., Tijsseling, L., Goodenough, K., Wall, F., Deak, D., Yan, X., & Li, C. (2021). Towards sustainable extraction of technology materials through integrated approaches. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(10), 665–679. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00211-6>

3. Araujo, F. S. M., Taborda-Llano, I., Nunes, E. B., & Santos, R. M. (2022). Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences*, 12(9), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
4. International Energy Agency. (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
5. Maus, V., Giljum, S., Gutschlhofer, J., da Silva, D. M., Probst, M., Gass, S. L. B., Luckeneder, S., Lieber, M., & McCallum, I. (2020). A global-scale data set of mining areas. *Scientific Data*, 7(1), 289. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00624-w>
6. Salmi, E. F., Nazem, M., & Karakus, M. (2017). Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence. *Engineering Geology*, 217, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.021>
7. Werner, T. T., Bebbington, A., & Gregory, G. (2019). Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing. *The Extractive Industries and Society*, 6(3), 993–1012. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.06.011>
8. Franks, D. M., Keenan, J., Tonda, E., & Kariuki, A. (2022). *Mineral resource governance and the global goals: An agenda for international collaboration*. Summary of the UNEA 4/19 Consultations.
9. Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M., & Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11(1), 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
10. *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Ukraini u 2021 rotsi* [National Report on the State of the Environment in Ukraine in 2021] (2022). Kyiv: Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy, 514 s [in Ukrainian].
11. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Sai, K., Chebanov, M., & Lozynskiy, 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>
12. Koptieva, T. S. (2025). Formuvannia provalnoho reliefu v umovakh hirnychopromyslovykh landshaftiv Kryvorizkoi landshaftno-tekhnichnoi systemy [Formation of a sinkhole relief in the conditions of mining landscapes of the Kryvyi Rih landscape and technical system]. *Liudyna ta dovkillia. Problemy neoeokolohii*, 44, 47–59 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2025-44-04>
13. Petlovanyi, M.V. (2024). Osoblyvosti utvorenykh zon obvalennia zemnoi poverkhni vid vplyvu pidzemnoi rozrobky krutospadnykh rudnykh pokladiv v umovakh Kryvbasu [Features of the formed zones of collapse of the earth's surface from the influence of underground mining of steeply sloping ore deposits in the conditions of Kryvbas]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 79, 63–83 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.063>
14. Tassi, A., & Vizzari, M. (2020). Object-oriented LULC classification in Google Earth engine combining SNIC, GLCM, and machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(22), 3776. <https://doi.org/10.3390/rs12223776>
15. Yang, Z., Li, J., & Li, P. (2022). Satellite-based monitoring of surface deformation and its impact on vegetation in mining areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102943. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102943>
16. Lechner, A. M., Baumgartl, T., Matthew, P., & Glenn, V. (2016). The impact of underground coal mining on surface vegetation and hydrology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 117–126.
17. Fan, H., Cheng, L., & Lu, L. (2021). Impact of coal mining subsidence on the quality of cultivated land and vegetation health. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127738. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127738>
18. Buta, M., Blaga, G., Paulette, L., Păcurar, I., Roșca, S., Borsai, O., Grecu, F., Sînziana, P. E., & Negrușier, C. (2019). Soil reclamation of abandoned mine lands by revegetation in Northwestern Part of Transylvania: A 40-year retrospective study. *Sustainability*, 11(12), 3393. <https://doi.org/10.3390/su11123393>
19. Karan, S. K., Samadder, S. R., & Maiti, S. K. (2016). Assessment of the spatio-temporal changes of vegetation cover in coal mining areas using multi-temporal satellite images. *Ecological Indicators*, 61, 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.049>
20. *OldMaps*. Retrieved from: <https://oldmaps.com.ua/>
21. *Copernicus Data Space Ecosystem Browser*. Retrieved from: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
22. Stupnik, M. I., & Malanchuk, Ye. Z. (2011). Vyznachennia parametriv zon zsuvu i obvalennia nanosnykh hlynistykh porid pry pidzemnii rozrobtsi rudnykh rodovysch [Determination of parameters of shear and collapse zones of alluvial clay rocks during underground development of ore deposits]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, 3(55), 178–182 [in Ukrainian].
23. Petlovanyi, M., & Sai, K. (2024). Research into cemented paste backfill properties and options for its application: Case study from a Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 18(4), 162–179. <https://doi.org/10.33271/mining18.04.162>

