

## ДОСЛІДЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ФІТОЦЕНОЗУ ТА БІОКРАСТОВИХ МІКРООРГАНІЗМІВ ПРОМИСЛОВОГО ВІДВАЛУ «ПЕТРОВСЬКИЙ» ПРАТ «ЦГЗК» М. КРИВИЙ РІГ

Ковров О.С., Кулікова Д.В., Баланюк А.Д., Іщенко Ю.Д., Богун А.С.  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
пр. Д. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро  
kovrov.o.s@nmu.one, kulikova.d.v@nmu.one, Balaniuk.An.D@nmu.one,  
Ishchenko.Y.D@nmu.one, Bohun.A.S@nmu.one

Промислові відвали Кривбасу є осередками тривалого техногенного навантаження, що проявляється у деградації техноземів, ерозії та пилоутворенні, а також у спрощенні біотичних угруповань. Природна сукцесія рослинного покриву на відвалах пустих порід є поступовим, проте надзвичайно важливим процесом екологічного самовідновлення техногенно порушеної екосистеми. Метою роботи є комплексна оцінка біорізноманіття фітоценозу та біокрасту залізрудного відвалу «Петровський» ПрАТ «ЦГЗК» (м. Кривий Ріг) як основи для науково обґрунтованих рішень щодо рекультивациі та біоремедиациі. Дослідження виконано на верхньому та нижньому ярусах відвалу з урахуванням мікробіотопної мозаїчності. Проведено геоботанічні обстеження видового складу деревно-чагарникової й трав'янистої рослинності та відбір зразків техноземів із 12 точок для аналізу біокрастового субстрату. Мікроскопічні спостереження (400×) виявили змішану фототрофно-гетеротрофну спільноту біокрасту, де домінують нитчасті ціанобактерії порядку Oscillatoriales (морфотипи *Phormidium* та *Leptolyngbya*), присутні кокоїдні ціанобактерії (*Gloeocapsa*, *Chroococcus*, *Aphanocapsa*), колоніальні та поодинокі зелені мікроводорості (*Chlorococcum*, *Gloeocystis*), а також численні гетеротрофні паличкоподібні бактерії роду *Bacillus*. Рослинний покрив відвалу представлений піонерними та рудеральними видами з ознаками активних сукцесійних процесів; верхній ярус характеризується кращою адаптацією й потенціалом природного самовідновлення, тоді як нижній ярус залишається більш ризикованим щодо ерозії та пиління. Отримані результати підтверджують синергійну роль фітоценозу та біокрасту у стабілізації техногенного субстрату, акумуляції органічної речовини та формуванні передумов ґрунтоутворення. Практичне значення роботи полягає у можливості використання індикаторних компонентів рослинності та біокрасту для екологічного моніторингу, картування ділянок пріоритетної стабілізації та підбору природоорієнтованих заходів рекультивациі відвалів Кривбасу. *Ключові слова:* промислові відвали, фітоценоз, біокраст, біорізноманіття

**Study of phytocoenosis and biocrust microorganisms biodiversity of the “Petrovskiy” industrial waste dump of PJSC “CGOK”, Kryvyi Rih. Kovrov O., Kulikova D., Balanyuk A., Ishchenko Yu., Bohun A.**

Industrial waste dumps of the Kryvyi Rih Basin are hotspots of long-term technogenic pressure manifested by technosol degradation, erosion, dust emissions and simplified biotic communities. The natural succession of vegetation cover on waste rock dumps is a gradual and exceptionally important process of ecological self-restoration in a technogenically disturbed ecosystem. This study provides an integrated assessment of the biodiversity of the phytocoenosis and biological soil crust on the Petrovskiy waste dump of PJSC “CGOK” (Kryvyi Rih, Ukraine) as a basis for reclamation and bioremediation. Surveys were conducted on the upper and lower terraces with account of microbiotope mosaicity. We carried out geobotanical inventories of vegetation and collected technosol samples from 12 points to analyse biocrust substrates. Light microscopy (400×) revealed a mixed phototrophic–heterotrophic biocrust community dominated by filamentous cyanobacteria of *Oscillatoriales* (*Phormidium* and *Leptolyngbya* morphotypes), with coccoid cyanobacteria of *Gloeocapsa*, *Chroococcus* and *Aphanocapsa* types, green microalgae of *Chlorococcum* and *Gloeocystis* types, and *Bacillus* bacteria. Vegetation cover is formed by pioneer and ruderal species indicating active succession; the upper terrace shows better adaptation and higher self-recovery potential, whereas the lower terrace remains more vulnerable to erosion and dusting. The results confirm the synergistic role of phytocoenosis and biocrust in stabilising technogenic substrates, accumulating organic matter, improving the microstructure of the surface layer and initiating soil-forming processes. The novelty lies in the integrated analysis of vegetation and biocrust microorganisms within one technogenic site, with identification of indicators of early succession stages. The practical value of the study is related to ecological monitoring, mapping of priority stabilisation areas and selection of nature-based reclamation measures for Kryvbas waste dumps. *Key words:* industrial waste dumps, phytocoenosis, biocrust, biodiversity

**Постановка проблеми.** Промислові відвали є одним із найбільш серйозних екологічних викликів для промислових регіонів, особливо для таких, як Кривий Ріг. Це місто є одним із найбільших центрів видобутку та переробки залізної руди в Україні, що призводить до накопичення значної кількості техногенних відходів. Відвали, що утворюються внаслідок

гірничодобувної діяльності, займають великі території, змінюють ландшафт, негативно впливають на ґрунти, водні ресурси та атмосферне повітря. Вони можуть містити важкі метали, сульфідні та інші токсичні речовини, які спричиняють довготривалий негативний вплив на екосистему регіону. Тому комплексні дослідження біорізноманіття піонерних



рослинних угруповань та мікробіоти техногенних ґрунтів залізородних відвалів є важливим етапом їх екологічної оцінки для обґрунтування ефективних технологій відновлення довкілля.

**Актуальність дослідження.** Місто Кривий Ріг є одним із найбільших промислових центрів України, де значні площі територій зайняті підприємствами гірничо-металургійного комплексу, машинобудування, будіндустрії та інших галузей. Загальна площа промислових територій у межах міста становить 16 216,47 га, а ще 15 282,0 га розташовані за його межами, проте безпосередньо межують із міськими промисловими зонами. Внаслідок масштабного видобутку корисних копалин відкритим і підземним методами утворюються численні промислові відвали, які займають великі площі та суттєво впливають на екологічний стан регіону [1].

Відвал розкритих порід «Петровський» ПрАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг був сформований у 1959 році (рис. 1). Від початку він слугував місцем накопичення пустих порід, вивезених із залізородного кар'єру. За десятиліття експлуатації цей техногенний об'єкт набув вражаючих масштабів: його висота сягає близько 45 метрів, довжина – понад 400 метрів, а загальна площа – близько 7 гектарів. Наразі Петровський відвал чинить значний вплив на навколишнє середовище: через процеси вивітрювання порід, викиди пилу та зменшення біорізноманіття. Поверхня відвалу здебільшого позбавлена стабільного рослинного покриву, що сприяє ерозії та підвищеному пилоутворенню.

Екологічною проблемою Петровського відвалу є те, що відходи, які розміщені в межах цієї ділянки, містять значний відсоток дрібної фракції, яка потенційно стає джерелом утворення пилу. На деяких поверхнях під впливом екзогенних чинників формуються кори вивітрювання, в межах яких породи руйнуються з утворенням дрібних часток, що стають додатковим джерелом пилу. Під дією вітру пилові частки переносяться (у вигляді пилових хмар) на

відстані до 3-5 км та накопичуються на поверхні рельєфу [2].

**Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями.** Авторський доробок, представлений у статті безпосередньо пов'язаний із пріоритетними науковими та практичними завданнями сучасної екології, зокрема відновленням техногенно порушених територій та забезпеченням екологічної безпеки промислових регіонів. Дослідження спрямоване на розуміння механізмів первинної сукцесії та формування біологічних угруповань у екстремальних умовах відвальних субстратів, що є фундаментально важливим для розвитку теорії сукцесій, екології стресових екосистем та функціонування біологічних ґрунтових кірок (біокрастів) як ключового компонента наземних екосистем.

З наукової точки зору стаття вирішує завдання інтегрованої оцінки біорізноманіття на рівні фітоценозу та біокрасту, що дозволяє повніше описати структуру та динаміку техногенних екосистем. Поєднання даних про рослинне різноманіття й організми біокрасту дає змогу встановити взаємозв'язки між стабілізацією субстрату, акумуляцією органічної речовини, розвитком мікробіоти та заселенням території рослинами-піонерами. Такий підхід підтримує актуальний міжнародний тренд до мультикомпонентних досліджень біорізноманіття та екосистемних функцій у відновлюваних ландшафтах і створює базу для порівняння техногенних ділянок різного типу та стадії сукцесії.

Практична значущість доробку авторів стосовно вивчення фітоценозу та біокрастових угруповань відвалу полягає в тому, що отримані результати формують науково обґрунтовану основу для рекультивациі та біоремедіації відвалу «Петровський» і подібних об'єктів Кривбасу. Визначення видового складу, домінант та індикаторних груп фітоценозу, а також характеристика біокрасту як природного «інженера» поверхні дозволяють: (1) обирати ефективні види-колонізатори та формувати стійкі рослинні



Рис. 1. Промисловий відвал Петровський

угруповання; (2) планувати протиерозійні заходи й мінімізувати пиління, що має прямий вплив на якість повітря у прилеглих населених пунктах; (3) оцінювати екосистемні послуги відновлених ділянок (стабілізація ґрунту, акумуляція вуглецю, регуляція водного режиму) та прогнозувати екологічні ризики для умов Криворізького промислового району.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Залізородні відвали Кривбасу є типовими техногенними ландшафтами, у яких одночасно розгортаються процеси початкового ґрунтоутворення, геохімічної міграції елементів і формування рослинного покриву, що визначає як екологічні ризики, так і можливості керованого відновлення. Дослідження ґрунтово-геохімічного блоку показують, що техноземи на відвалах відзначаються високою просторовою неоднорідністю властивостей і вмісту елементів, а їхні параметри зумовлюються мінералогією порід, гранулометриєю, карбонатністю, режимом зволоження та ерозійними процесами [3, 4]. У таких умовах фіксуються контрасти забезпеченості макроелементами та підвищені концентрації окремих важких металів, що формують селективний тиск на біоту й потребують системного моніторингу [5].

Фітоіндикаційні та екофізіологічні підходи доповнюють ґрунтові дослідження, демонструючи, що деревні рослини відвалів відображають геохімічний стан субстрату через профілі накопичення макро- та мікроелементів у листках і через зміни вторинного метаболізму, зокрема фенольних сполук, як маркерів стресу та адаптації (Vielyk et al., 2020; Vielyk et al., 2022). Це обґрунтовує використання деревних видів як інструменту біомоніторингу та як компонента фітомеліораційних схем, орієнтованих на стабілізацію субстрату й зниження пиління [6, 7]. Паралельно флористичні та ценотичні дослідження на модельних відвалах Криворіжжя описують закономірності первинного заселення та сукцесій (сингенезу) й показують, що траєкторії розвитку рослинності залежать від мікрорельєфу, властивостей субстрату та джерел діаспор, формуючи специфічну структуру фітоценозів із помітною участю стійких і синантропних видів [8, 9]. На прикладі Петровського відвалу деталізовано таксономічний склад деревно-чагарникових угруповань і їхню синантропну характеристику, що є важливим для оцінки потенціалу самовідновлення та ризиків небажаних сукцесій без управління [10, 11].

Прикладні роботи з рекультиватії підкреслюють ефективність переходу від «разового озеленення» до біотехнологічного підходу, а саме формування стійких рослинних угруповань із урахуванням підготовки субстрату, протиерозійних заходів і довгострокового моніторингу [12]. Узагальнююча рамка техногенних ландшафтних систем Кривбасу розглядає відвали як елементи ширшої соціо-еколого-економічної системи з власними потоками речовини й функціями, що важливо для інтеграції рекультиватії у стратегії

регіонального розвитку [13]. Загалом корпус публікацій демонструє перехід до інтегрованої моделі «ґрунт-геохімія-рослинність-управління», у якій фітоіндикація та сукцесійний аналіз безпосередньо підтримують проектування рекультиватійних втручань. Перспективними напрямками залишаються довгострокові серії спостережень, кількісне моделювання міграції металів і солей у профілі, урахування ролі мікробіоти біокрастів у стабілізації субстратів, а також порівняльна оцінка «пакетів» рекультиватії для різних типів відвалів Кривбасу.

#### **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.**

Попри значну кількість робіт, присвячених рекультиватії техногенно порушених земель Кривбасу, недостатньо дослідженим залишається комплексний зв'язок між біорізноманіттям фітоценозу та біокрасту саме на промислових відвалах залізородного походження. Більшість попередніх досліджень зосереджувались або на рослинному покриві (видовий склад, доміанти, стадії сукцесії), або окремо на мікробіоті ґрунтових біокірок. Невирішеною частиною проблеми залишається питання: які саме елементи біокрасту формують «пусковий механізм» стабілізації субстрату на конкретному відвалі, як змінюється їхня структура на мікробіотопах різної експозиції та субстратного складу, і як це відображається на швидкості й траєкторії заселення рослинами-піонерами.

Окремою прогалиною є відсутність достатньо деталізованих даних про просторову мозаїчність біокрасту й фітоценозів на відвалі «Петровський» та про їхню роль у формуванні екосистемних функцій, критичних для зменшення екологічних ризиків (пиління, ерозія, деградація мікроструктури поверхневого шару).

**Новизна.** Новизна дослідження полягає у комплексному, синхронному аналізі біорізноманіття фітоценозу та біокрасту промислового відвалу «Петровський» із виявленням їхніх взаємозв'язків на різних мікробіотопах техногенного субстрату. Вперше для цього об'єкта визначено індикаторні компоненти біокрасту та рослинного покриву, що відображають стадії первинної сукцесії й можуть бути використані для науково обґрунтованого моніторингу та вибору ефективних підходів до рекультиватії/біоремедіації.

**Методологічне та загальнонаукове значення.** Методологічне значення дослідження полягає у запропонованому інтегрованому підході до оцінювання постмайнінгових екосистем, який поєднує аналіз структури фітоценозу та біокрасту з урахуванням мікробіотопної мозаїчності техногенного субстрату. Отримані результати розширюють уявлення про механізми первинної сукцесії й ґрунтоутворення на промислових відвалах та створюють основу для уніфікованих критеріїв екологічного моніторингу й прогнозування ефективності рекультиватії.

**Дослідження біорізноманіття фітоценозу відвалу.** Біорізноманіттю Петровського відвалу присвячено низку наукових робіт, представлених вище, в яких досліджувались таксономічний склад та синантропна характеристика деревно-чагарникових угруповань. Виявлено, що на відвалі активно проходять сукцесійні процеси, які сприяють поступовому відновленню природного рослинного покриву. Це свідчить про можливість рекультивації та відновлення екологічної рівноваги на таких територіях.

Аналіз показав, що антропогенні фактори, такі як діяльність людини, мають значний вплив на формування та розвиток рослинного покриву на відвалі. Незважаючи на це, деякі види рослин демонструють високу адаптивність до змін середовища.

В межах нижнього ярусу Петровського відвалу можна помітити насиченість рослинного покриву. Головною характеристикою рослинності є наявність спрощених таксономічних одиниць рослин різного рангу, що свідчить про несприятливість умов навколишнього середовища для таких рослин. На відвалі ростуть наступні дерева та чагарники: абрикоса звичайна (*Prunus armeniaca*), тополя біла (*Populus alba*), робонія звичайна (*Robinia pseudoacacia*), липа дрібнолиста (*Tilia cordata* Mill), горіх волоський (*Juglans regia* L), яблуня лісова (*Malus sylvestris* Mill.), береза пухнаста (*Betula pubescens*), вишня дика (*Prunus cerasus* L.), клен ясенелистий (*Acer negundo* L.), маслина вузьколиста (*Elaeagnus angustifolia* L.), шипшина звичайна (*Rosa canina* L.).

Серед травянистих рослин були помічені: сокирки польові (*Consolida regalis*), молочай південноєвропейський (*Euphorbia nicaeensis*), жабриця звивиста (*Seseli tortuosum*), звіробій (*Hypericum* L), перловник трансильванський (*Melica transsilvanica*), очиток скельний (*Sedum cauticola*), мундулея (*Mundulea Benth*), дурман (*Datura*), лобода біла (*Chenopodium album*), блошина смердюча (*Mentha pulegium* L.), липучка (*Lappula myosotis*), очиток відхилений (*Sedum reflexum*), лапчатка повзуча (*Potentilla reptans*). Загалом, було ідентифіковано понад 50 видів рослин, що успішно адаптувались в умовах відвалу [14].

Верхній ярус відвалу є особливо важливим для дослідження через його безпосередній вплив на поверхневі екосистеми, мікроклімат і можливі ризики для здоров'я населення. Дослідження рослинності верхнього ярусу відвалу дозволяє оцінити ступінь природного відновлення екосистеми та визначити найбільш ефективні види рослин для використання у процесі рекультивації.

Серед дерев верхньому ярусі виявлено наступні види: слива дика (*Prunus domestica*), маслинка срібляста (*Elaeagnus commutata*), горіх грецький (*Juglans regia* L.), яблуня лісова (*Malus sylvestris* Mill), робонія псевдоакація (*Robinia pseudoacacia*) та абрикос звичайний (*Armeniaca vulgaris* Lam). Травянисті рослини представлені наступними видами: татар-

ник звичайний (*Onopoidon acanthium*), кульбаба лікарська (*Taraxacum officinale*), синяк звичайний (*Echium vulgare*), цикорій дикий (*Cichorium intybus* L.), цинадон пальчастий (*Cynodon dactylon*), морква дика (*Daucus carota*), петлуха звичайна (*Calystegia sepium*), ячмінь мишачий (*Hordeum murinum* L), білий авен (*Geum canadense*).

Рослинність верхнього ярусу відвалу характеризується високою стійкістю до ерозійних процесів і потенціалом для природного відновлення різноманіття. Попри складніші умови через ерозійні процеси, верхній ярус демонструє стійке формування рослинних угруповань, що є позитивним індикатором природного самовідновлення екосистеми.

Спираючись на дослідження рослинних угруповань, можна скласти екологічну характеристику відвалу Петровський, де верхній ярус характеризується значним розмаїттям деревних та низькорослих рослин. Дерева такі як робонія псевдоакація та слива дика заселяють нові території та покращують ґрунтові умови. Низькорослі рослини, такі як цинадон пальчастий та кульбаба лікарська, допомагають закріпити ґрунти та створити сприятливі умови для інших видів. Значне поширення цинадону пальчастого свідчить про його значну роль у процесі рекультивації.

Нижній ярус відвалу демонструє менш сприятливі умови для рослинного покриву, що проявляється в наявності спрощених таксономічних одиниць. Рослини нижнього ярусу включають більш різноманітні види дерев, такі як тополя біла та липа дрібнолиста, які можуть свідчити про намагання рослин пристосуватись до несприятливих умов. Травянисті рослини, такі як перловник трансильванський та лобода біла, свідчать про їхню високу адаптацію до техногенних умов.

**Дослідження біокрастових мікроорганізмів в техноземах відвалу.** Залізородний відвал «Петровський» є цікавим «полігоном» для дослідження біокрастових (біологічної ґрунтової кірки) бактерій, бо тут поєднуються типові для постмаїнінгових ландшафтів чинники: низька родючість, дефіцит гумусу, різко неоднорідний гранулометричний склад, локальні екстремуми рН та підвищені концентрації окремих металів.

У початкових стадіях сукцесії на відвалах залізородних підприємств Криворіжжя ключову роль відіграють ціанобактерії та еукаріотичні водорості як «архітектори» біокірки: вони продукують екзополісахариди, що цементують частинки, накопичують органічний вуглець і формують умови для гетеротрофних бактерій (у т.ч. азотфіксаторів, фосфатмобілізаторів тощо). Для залізородних хвостосховищ Криворіжжя показано, що структура угруповань ціанобактерій та водоростей на ранніх стадіях істотно залежить від мінералогії, солоності, рН, вмісту фізичної глини та гумусу, а також описано етапи розвитку «водоростево-ціанобактеріальних» спільнот аж до змішаних мохово-водоростевих кірок

[15]. Ці закономірності безпосередньо релевантні для «Петровського» відвалу, де параметри субстрату також контрастні між ділянками.

З екологічної точки зору біокрастові консорціуми (ціанобактерії, водорості, бактерії, мікрогриби) виконують “пакет” функцій, критичних для стабілізації техногенних поверхонь: зменшення водної/вітрової ерозії, підвищення утримання вологи, первинне накопичення С і N, поліпшення мікроструктури поверхневого шару.

В рамках дослідження біорізноманіття відвалу відібрано проби ґрунту (технозем) з 12 точок верхнього та нижнього ярусів відвалу з метою дослідження бактерій біокрасту. Для дослідження видового різноманіття біокрастового субстрату використано світловий мікроскоп з 400-кратним збільшенням.

На рис. 2, а представлено одноклітинну зелену водорість, морфологічно близьку до представників роду *Chlorococcum* (*Chlorophyta*), виявлену у складі біологічної ґрунтової кірки техногенного субстрату. Клітини поодинокі або формують невеликі агрегати, мають правильну сферичну або субсферичну форму та чітко виражену клітинну оболонку. Діаметр клітин варіює орієнтовно в межах 5-15 мкм. Внутрішній простір клітини заповнений щільним зеленим хлоропластом, який займає більшу частину об'єму та має зернисту структуру, характерну для фотосинтезуючих еукаріотичних мікробіот. Ознак нитчастої організації, гетероцист або спеціалізованих диференційованих клітин не виявлено. Морфотип відповідає кокоїдним зеленим водоростям, типовим для ранніх стадій формування біокрасту. Представники роду *Chlorococcum* є піо-

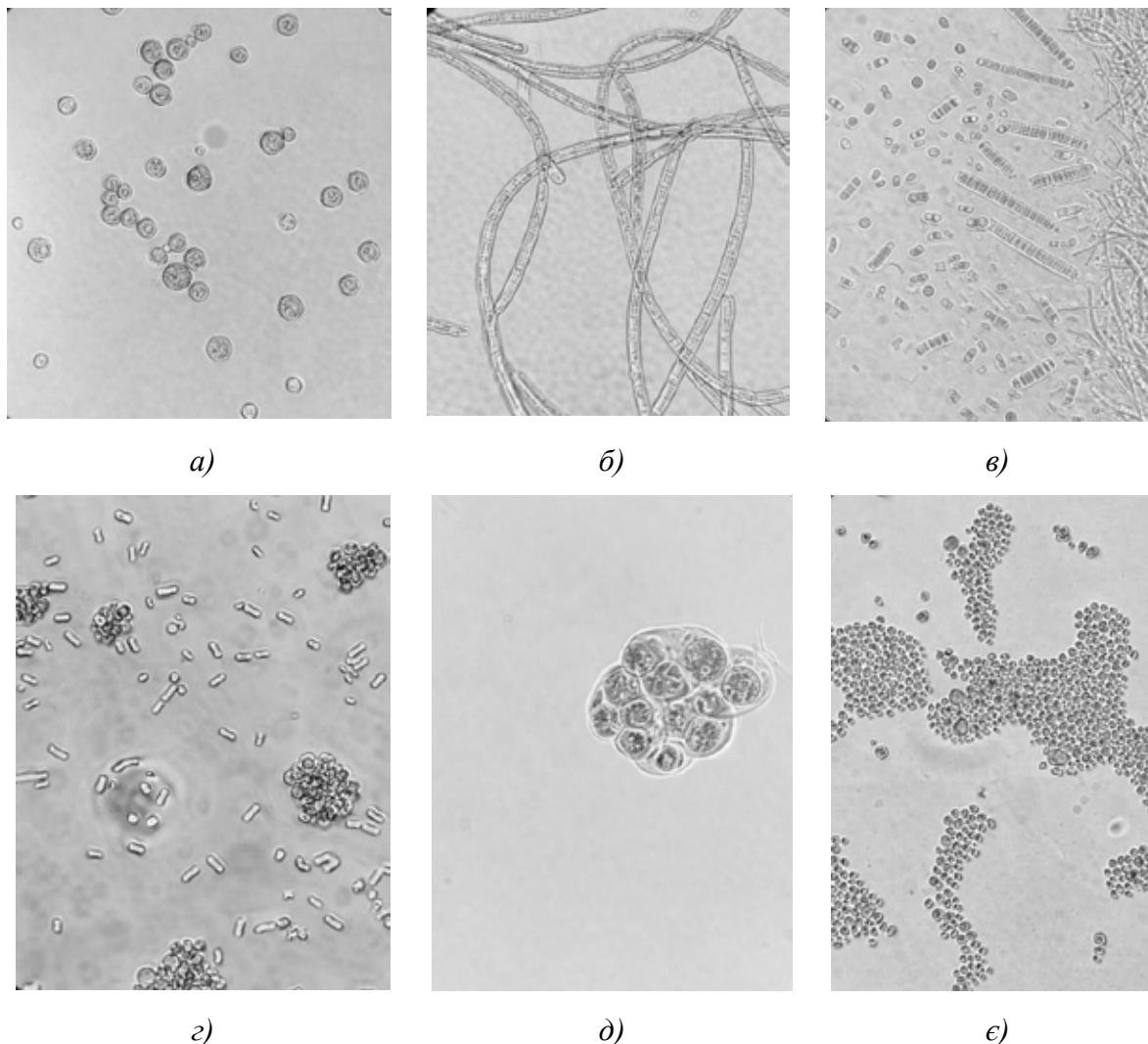


Рис. 2. Видове біорізноманіття біокрастового субстрату відвалу: а) одноклітинні зелені водорості роду *Chlorococcum* sp.; б) фотосинтезуюча нитчаста ціанобактерія роду *Leptolyngbya* sp. (порядок *Oscillatoriales*); в) фотосинтезуюча нитчаста ціанобактерія роду *Phormidium* sp.; г) паличкоподібні бактерії роду *Bacillus* та кокоїдні ціанобактерії *Gloeocapsa* sp.; д) одноклітинні зелені водорості роду *Gloeocystis*; е) кокоїдні ціанобактерії роду *Arhanocapsa*

нерними фототрофами, здатними колонізувати бідні на органічну речовину субстрати з високою інсоляцією. У межах техногенних порушених територій вони виконують функцію первинних продуцентів, забезпечуючи акумуляцію органічного вуглецю та ініціюючи формування мікробної біоплівки. Їх розвиток сприяє стабілізації поверхні субстрату через виділення екзополісахаридів і створює передумови для подальшої сукцесії біокрасту за участі ціанобактерій, лишайників та мохів.

На рис. 2, б представлено фотосинтезуючу нитчасту ціанобактерію, морфологічно близьку до представників роду *Leptolyngbya* (порядок *Oscillatoriales*), виявлену у складі біологічної ґрунтової кірки техногенного субстрату. Трихоми довгі, тонкі, гнучкі, складаються з циліндричних клітин, чітко відмежованих поперечними перегородками. Клітини приблизно однакової ширини по всій довжині нитки, без диференційованих гетероцист або акінет. Виражена слизова піхва або відсутня, або представлена тонким малопомітним шаром. Нитки переплітаються між собою, формуючи просторову мережу, характерну для структури зрілого біокрасту. Морфологічні ознаки відповідають типовим представникам *Leptolyngbya*, що домінують у ранніх і середніх стадіях сукцесії біологічних ґрунтових кірок. Як фототрофні прокариоти, ціанобактерії цього роду здійснюють активний фотосинтез та забезпечують первинну акумуляцію органічного вуглецю на бідних мінеральних субстратах. Виділення екзополісахаридів сприяє склеюванню мінеральних часток, стабілізації поверхні та формуванню мікроагрегатів. У межах техногенних порушених територій такі організми виконують ключову роль у біологічній стабілізації субстрату та створюють передумови для подальшої колонізації лишайниками і мохами.

На рис. 2, в представлено фотосинтезуючу нитчасту ціанобактерію роду *Phormidium*, виявлену у складі біологічної ґрунтової кірки техногенного субстрату. Трихоми довгі, прямі або слабо зігнуті, з чітко вираженою поперечною сегментацією та рівномірною шириною по всій довжині. Клітини короткоциліндричні або злегка бочкоподібні, розташовані послідовно без формування гетероцист чи акінет. Термінальні клітини закруглені, слизова піхва тонка або малопомітна. Інтенсивне зелене забарвлення зумовлене наявністю фотосинтетичних пігментів (хлорофілу а та фікобіліпротеїнів), що забезпечують активний фотосинтез. Представники роду *Phormidium* є типовими компонентами біокрастів аридних, напіваридних і техногенно порушених екосистем. Вони активно колонізують мінеральні субстрати з низьким вмістом органічної речовини та високою інсоляцією. Завдяки виділенню екзополісахаридів ці ціанобактерії стабілізують поверхню субстрату, сприяють агрегації мінеральних часток і зменшують ерозійні процеси. Формування трихомів *Phormidium* створює структурну матрицю біоло-

гічної кірки, що ініціює подальшу сукцесію мікроорганізмів і рослинності на деградованих територіях.

В біокрасті також домінують типові гетеротрофні бактерії роду *Bacillus*, а також щільні зеленуваті скупчення дрібних округлих клітин кокоїдних фототрофів кокоїдних ціанобактерій родів *Chroococcus* та *Gloeocapsa* (рис. 4, з). На тлі бактеріальної фракції спостерігаються локальні скупчення пігментованих округлих клітин, інтерпретовані як кокоїдні фототрофні мікроорганізми (ціанобактерії або зелені мікроводорості), асоційовані з органо-мінеральними мікроагрегатами. Загальна картина відображає змішану структуру біокрастової мікробіоти, де гетеротрофні бактерії та фототрофні мікроорганізми співіснують у складі біоплівкового матриксу.

На рис. 4, д показано компактну колонію округлих клітин зелених одноклітинних організмів у спільному прозорому матриксі, які належать до одноклітинних зелених водоростей роду *Gloeocystis*. Клітини мають виразну пігментацію та зернистий внутрішній вміст, що відповідає зеленим водоростям (*Chlorophyta*), типовим супутникам біокрастів.

В зразках ґрунту значно представлені кокоїдні ціанобактерії біокрасту роду *Aphanocapsa* (рис. 4, є). Колоніальні кокоїдні фототрофи утворюють щільні агрегати та витягнуті "стрічки" колоній, що відповідає розміщенню мікроорганізмів у слизовому (екзополісахаридному) матриксі біокрасту. Морфологічно спостережувані структури узгоджуються з кокоїдними ціанобактеріями *Aphanocapsa*, типовими піонерними компонентами поверхневих ґрунтових біокірок.

**Головні висновки.** Таким чином, дослідження біорізноманіття фітоценозу та біокрасту промислового відвалу «Петровський» ПрАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг свідчить про синергійну роль рослин і мікробіоти на техноземах для відновлення довкілля. Рослинність нижнього ярусу перебуває на стадії активної стабілізації, з тенденцією до формування більш стійких фітоценозів. Наявність значної частки аборигенних видів серед трав'янистих рослин свідчить про природне відновлення екосистеми, тоді як присутність інтродуцентів серед деревно-чагарникових форм вказує на антропогенний вплив, зокрема через посадки або занесення насіння. Рослинність верхнього ярусу демонструє кращу адаптацію та потенціал для природного відновлення, завдяки більшому розмаїттю видів та їх кількості. Низькорослі рослини верхнього ярусу грають ключову роль у процесі рекультивациі.

У зразках біокрасту із залізородного відвалу «Петровський» (400×) зафіксовано виразно змішану фототрофно-гетеротрофну спільноту мікроорганізмів. Домінують нитчасті ціанобактерії *Oscillatoriales* (морфотип *Phormidium ta Leptolyngbya*), що формують переплетену біоплівку та, ймовірно, забезпечують ключову структуроутворюючу функцію (зв'язування частинок суб-

страту екзополісахаридами). Паралельно присутні кокоїдні ціанобактерії (*Chroococcus*, *Gloeocapsa*, *Aphanocapsa*), колоніальні та поодинокі зелені мікрободорості (*Chlorella*, *Chlorococcum*, *Bracteacoccus*), та численні гетеротрофні паличкоподібні бактерії, асоційовані з детритом і мікроагрегатами. Така композиція свідчить про сформований біокраст із високим потенціалом до первинної продукції, акумуляції органічної речовини та стабілізації поверхні техногенного субстрату.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Отримані дані є важливими для подальшого

планування заходів рекультивації техногенних територій. Вони дають змогу врахувати видову структуру та життєвий стан рослин при розробці екологічно доцільних методів відновлення. Виявлена позитивна динаміка вегетаційного покриву та різноманітний склад біокрастових бактерій і водоростей свідчить про потенційну можливість самовідновлення фітоценозів. Це дозволяє сформулювати науково обґрунтовану “карту” піонерних консорціумів та підібрати найефективніші біологічні рішення для стабілізації й відновлення техногенних ландшафтів Кривбасу.

### Література

1. Енциклопедія Криворіжжя / В. П. Бухтіяров, В. Г. Балалкін, О. І. Прокопчук [та ін.] ; за ред. В. П. Бухтіярова. – Кривий Ріг : ЯВВА, 2005. – [Електронний ресурс]. <https://corpus.encyclopedia.kyiv.ua/item/56> (дата звернення: 13.03.2026).
2. Антонік І. П., Антонік В. І., Штанько Л. О. Кривбас – територія екологічної небезпеки. *Scientific Achievements of Modern Society* : Abstracts of the 10th International Scientific and Practical Conference. Liverpool, 2020. P. 221–231. – DOI: 10.31812/123456789/3939.
3. Savosko V. M. Ecological and geological determination of the initial pedogenesis on devastated lands in the Kryvyi Rih Iron Mining & Metallurgical District (Ukraine). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2019. Vol. 28, № 4. DOI: 10.15421/111969.
4. Savosko V. M., Bielyk Y. V., Lykholat Y. V., Heilmeyer H. Assessment of heavy metals concentration in initial soils of post-mining landscapes in Kryvyi Rih District (Ukraine). *Ekológia* (Bratislava). 2022. Vol. 41, № 3. P. 201–211. DOI: 10.2478/eko-2022-0020.
5. Savosko V. M., Bielyk Y. V., Lykholat Y. V., Heilmeyer H., Grygoryuk I., Khromykh N., Lykholat T. The total content of macronutrients and heavy metals in the soil on devastated lands at Kryvyi Rih Iron Mining & Metallurgical District (Ukraine) *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2021. Vol. 30, № 1. P. 153–164. DOI: 10.15421/112114.
6. Bielyk Y., Savosko V., Lykholat Y., Heilmeyer H., Grygoryuk I. Macronutrients and heavy metals contents in the leaves of trees from the devastated lands at Kryvyi Rih District (Central Ukraine). *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 166. Art. 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/202016601011.
7. Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В., Іжболдін О.О., Лихолат Т.Ю. Варіабельність умісту фенольних сполук у листках дерев, які природно поширені на девастрованих землях залізорудного відвалу. *Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель*. 2022. Вип. 51. С. 73–86. DOI: 10.15421/442207.
8. Pavlenko A. O., Krasova O. O., Korshykov I. I. Syngeneses processes on iron ore dumps in the northern part of Kryvyi Rih area *Ukrainian Botanical Journal*. 2017. Vol. 74, № 4. P. 360–372. DOI: 10.15407/ukrbotj74.04.360.
9. Лисогор Л. П., Красова О.О., Коршиков І.І. Дендрофлора модельних залізорудних відвалів Криворіжжя: структурний аналіз, здатність до колонізації техногенних екоотопів. *Автохтонні та інтродуковані рослини*. 2017. № 13. С. 36–44.
10. Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю. В. Таксономічний склад та синантропна характеристика деревно-чагарникових угруповань Петровського відвалу (Криворіжжя). *Екологічний вісник Криворіжжя*. 2019. № 4. С. 104–113. DOI: 10.31812/eco-bulletin-krd.v4i0.2565.
11. Белик Ю., Савосько В., Лихолат Ю. Сучасний стан дендрофітоценозів, природно поширених на девастрованих землях залізорудного відвалу (Кривий Ріг). *Екологічний вісник Криворіжжя*. 2023. С. 25–43. DOI: 10.31812/ecobulletinkrd.v7i.7654.
12. Мазур А.Ю., Кучеревський В.В., Шоль Г.Н., Баранець М.О., Сіренко Т.В., Красноштан О.В. Біотехнологія рекультивації залізорудних відвалів шляхом створення стійких трав'янистих рослинних угруповань. *Наука та інновації*. 2015. Vol. 11, № 4. P. 41–52. DOI: 10.15407/scin11.04.041.
13. Сметана, О. М., Перерва В. В. *Біогеоценотичний покрив ландшафтно-техногенних систем Кривбасу*: Криворіж. ботан. сад НАН України. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2007. 247 с. ISBN 978-966-2915-05-1.
14. Баланюк А. Д., Ковров О. С. Значення відвалів та екологічний вплив Петровського відвалу на Криворіжжі. *Тиждень студентської науки – 2025* : матер. 80-ї студ. наук.-техн. конф., 21–25 квіт. 2025 р. Дніпро : НТУ «ДП», 2025. С. 313–314. [https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/StudScienseWeek\\_2025.pdf](https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/StudScienseWeek_2025.pdf).
15. Maltsev Y., Maltseva S., Maltseva I. Diversity of Cyanobacteria and Algae During Primary Succession in Iron Ore Tailing Dumps. *Microbial Ecology*. 2022. Vol. 83, № 2. P. 1–16. DOI: 10.1007/s00248-021-01759-y.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026