

© О.С. Ковров<sup>1</sup>, О.М. Мулик<sup>1</sup>, Ю.С. Воронкова<sup>1</sup>, В.М. Тур<sup>1</sup>, В.В. Федотов<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ БІОКРАСТУ ДЛЯ ЕКОТЕХНОЛОГІЙ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ

О. Kovrov<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-0782-7767>  
О. Mulyk<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0009-0001-0703-8437>  
Yu. Voronkova<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-4079-8294>  
V. Tur<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0009-0001-4360-8441>  
V. Fedotov<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3521-815X>

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## ASSESSMENT OF THE BIOCAST POTENTIAL FOR ECOTECHNOLOGIES OF SOIL PHYTOREMEDIATION

**Мета.** Дослідити різноманіття мікроорганізмів біокрасту та оцінити його потенціал для підвищення ефективності еко-технологій фітореємедіації деґрадованих ґрунтів.

**Методика.** Методологія базується на аналітичному огляді сучасних досліджень біокрасту, відборі поверхневих проб ґрунту з видимим біокрастом на території кампусу НТУ «Дніпровська політехніка», вегетаційних експериментах з тестовими рослинами-фітореємедіантами *Brassica napus L.*, *Sorghum bicolor L.*, *Lupinus albus L.*, і *Hordeum murinum L.* на піщаному, ґрунтовому та біокрастовому субстратах, мікроскопічному дослідженні біорізноманіття біокрасту.

**Результати дослідження.** Вегетаційні тести показали перевагу біокрастового субстрату для більшості досліджених рослин за енергією проростання, щільністю сходів та формуванням надземної біомаси у порівнянні з піском і ґрунтосумішшю; ефект проявлявся найвиразніше на 14-21 добу вирощування. Біокраст забезпечував стабільніший водний режим і, ймовірно, стимулював ранній розвиток кореневої системи завдяки мікробіологічній активності та наявності органічної речовини. Мікроскопія підтвердила змішаний склад біокрастової мікробіоти з домінуванням нитчастих ціанобактерій (*Phormidium*, *Leptolyngbya*, *Microcoleus*), наявністю гетеротрофних бактерій *Bacillus*-подібного морфотипу, діатомей (*Pinnularia*) та зелених водоростей (*Chlorella*), що формують біоплівку й екзополісахаридний матрикс для зв'язування ґрунтових частинок.

**Наукова новизна.** Обґрунтовано прикладний підхід щодо використання біокрасту як «природного біоінокулянта» для підтримки фітореємедіаційних фітоценозів через поєднання стабілізації поверхні, фототрофної первинної продукції та мікробного матриксу, що підсилює приживлюваність рослин на ущільнених і порушених ґрунтах.

**Практична значимість.** Результати формують базу для розроблення еко-технологій відновлення деґрадованих і техногенно порушених земель із використанням біокрастових інокулянтів для зниження ерозії та підвищення ефективності фітостабілізації.

**Ключові слова:** біокраст, фітореємедіація, деґрадовані ґрунти, ціанобактерії, вегетаційний тест.

**Вступ.** Біологічні ґрунтові кірки (біокрасти) представляють складні мікробні та рослинні угруповання у верхніх шарах ґрунту в аридних, напіваридних, альпійських та деґрадованих ландшафтах. Вони істотно впливають на

стабільність ґрунту, гідрологічний режим, родючість і мікробне різноманіття. Біокраст здатний підвищувати структурну стійкість ґрунтової поверхні, зменшувати ерозійні втрати, покращувати водоутримання, активізувати мікробіологічні процеси та створювати сприятливі умови для укорінення рослин-ремедіаторів.

Зростання наукового інтересу до теми біокрасту підкреслює потенціал застосування ґрунтових мікроорганізмів для екологічного відновлення, регенеративного землеробства та фітореємедіації земель [1]. Біокрасти – це багатофункціональні асамблеї ціанобактерій, мікроводоростей, лишайників, мохів та гетеротрофних мікроорганізмів, які колонізують верхні шари ґрунту в сухих, альпійських, полярних і деградованих екосистемах з дефіцитом води або тепла [2]. Екологічна значущість біокрастів зумовлена їхньою здатністю стабілізувати субстрат, регулювати гідрологічні потоки, опосередковувати кругообіг поживних елементів і формувати мікробні спільноти ґрунту. Завдяки цим функціям біокрасти є базовими «інженерами екосистем», що впливають як на ранні сукцесійні траєкторії, так і на довгострокову стійкість екосистем.

Біокрасти складаються з ціанобактерій, водоростей, грибів, лишайників, мохів і гетеротрофних бактерій, занурених у ґрунтову матрицю. Їхня екологічна роль починається з ранніх колонізаторів передусім нитчастих ціанобактерій, таких як *Microcoleus*, продукція позаклітинних полімерних речовин (EPS) яких зв'язує ґрунтові частинки в агрегати, підвищуючи зчеплення й формуючи мікроселища [3]. У ранніх кірках частка ціанобактеріальної біомаси зазвичай становить 40–70% залежно від клімату та текстури ґрунту [4].

В екосистемах біокрасти часто виступають піонерними угрупованнями на порушених або щойно оголених ґрунтах, ініціюючи ключові процеси, наприклад фіксацію вуглецю, збагачення азотом і стабілізацію поверхні, які полегшують подальше заселення судинними рослинами. Їхня присутність покращує мікроселищні умови та прискорює відновлення, особливо в середовищах, де суворі кліматичні умови обмежують розвиток ранніх колонізаторів [5–6].

Глобальні виклики деградації ґрунтів, ерозії, опустелювання та зниження родючості зумовили нову хвилю інтересу до біокрастів як рішень, заснованих на природі, для відновлення та регенеративного управління землями [7–8]. Попри те, що численні роботи описують їхні позитивні ролі, дослідження стикаються з проблемами мінливості складу кірок, їх залежності від певних екологічних чинників і неоднорідності [9–10].

Останні досягнення у дистанційному зондуванні та контрольованому вирощуванні біокрастів відкрили нові можливості для їхнього дослідження, керованого формування та застосування у програмах відновлення. Ці технології дозволяють точніше характеризувати мікробні спільноти, краще відстежувати розвиток кірок і масштабувати отримання інокуляту для деградованих ландшафтів [11–12].

Зростаючий інтерес до біокрастових угруповань (біологічних ґрунтових кірок) як природного чинника стабілізації поверхні ґрунту, акумуляції органічної речовини та відновлення екосистемних функцій деградованих земель обґрунтовує актуальність їхнього цілеспрямованого використання в сучасних екотехнологіях.

*Метою роботи* є екологічна оцінка потенціалу біокрасту для його застосування в екотехнологіях фітореMediaції ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких *задач*:

1. Здійснити аналітичний огляд сучасних досліджень в галузі застосування біокрастових культур, інокулянтів і препаратів у відновленні деградованих ґрунтів;
2. Відібрати репрезентативні поверхневі проби ґрунту з біокрастом на території кампусу НТУ «Дніпровська політехніка» для проведення вегетаційних експериментів з рослинами, придатними для фітореMediaції та фітостабілізації деградованих земель;
3. Оцінити вплив біокрасту на енергію проростання, приживлюваність, розвиток біомаси та кореневої системи тестових рослин;
4. Дослідити біологічне різноманіття бактерій і рослинних угруповань біокрасту.

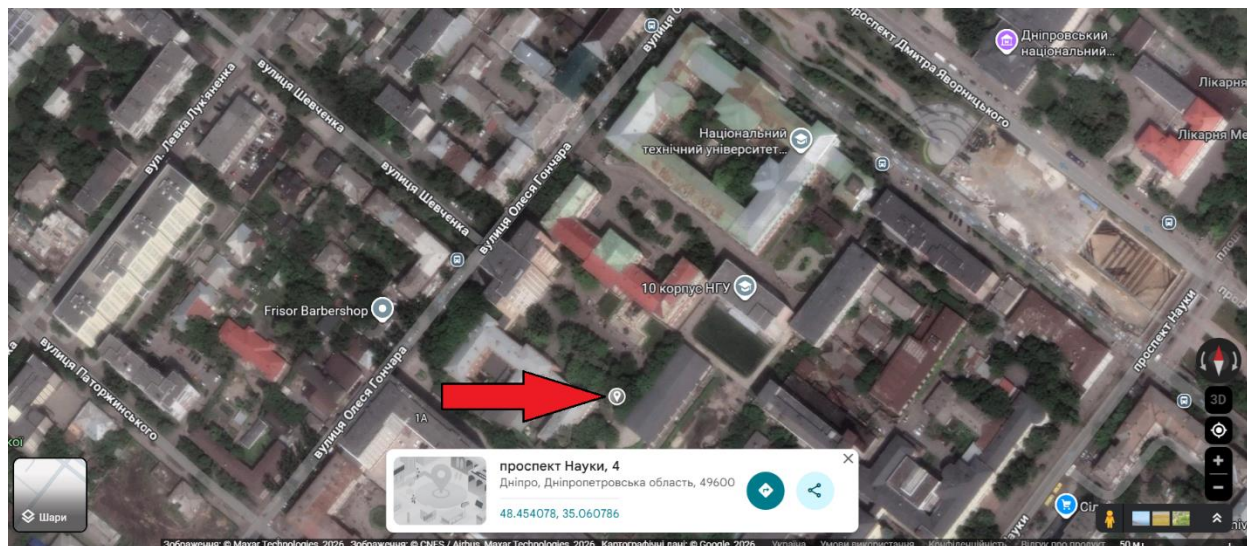
Результати виконання зазначених задач слугують базовим етапом для обґрунтування екотехнологій фітореMediaції земель та визначення умов, за яких застосування біокрасту є найбільш доцільним і ефективним.

**Матеріали і методи.** Методологія досліджень базується на відборі поверхневих проб ґрунту з видимим біокрастом на території кампусу НТУ «Дніпровська політехніка» на земельній ділянці з ущільненим ґрунтом між корпусами №3 і №6 (просп. Дмитра Яворницького 19, м. Дніпро, координати 48.454078°N, 35.060786°E) для подальшої інтерпретації отриманих результатів. Відбор проб здійснювали вздовж земельної ділянки розмірами 3 м x 20 м металічним шпателем (рис. 1). Ґрунтові проби складували в поліетиленові пакети для подальшого біологічного дослідження в лабораторії.

Веgetаційні експерименти (ростові тести) з рослинами, придатними до фітореMediaції та фітостабілізації деградованих земель, виконувались в лабораторії біомайнінгу на кафедрі екології та технологій захисту навколишнього середовища НТУ «Дніпровська політехніка». Для біотестових досліджень обрано 4 види рослин з певними характеристиками фітореMediaнтів: ріпак або рапс (*Brassica Napus L.*), сорго зернове (*Sorghum bicolor L.*), люпин білий (*Lupinus albus L.*), ячмінь мишачий (*Hordeum murinum L.*).

Для дослідження видового різноманіття біокрастового субстрату проби ґрунту масою 0,5-1,0 г інокулювали у чашки Петрі на тверде агарозне середовище BG-11, призначене для культивування біокрастових фототрофних мікроорганізмів. Культивування тривало 3 доби при температурі 20–22°C за умов природного освітлення. Для стимуляції росту біокрасту чашки Петрі з інокулянтом розміщували на підвіконні лабораторії з доступом до прямих сонячних променів. Видове різноманіття біокрасту та ідентифікацію мікроорганізмів здійснювали за допомогою світлового мікроскопу Біолам Р-17 при 400-кратному збільшенні.

Мікроскопічне дослідження проводили на препаратах «волога крапля» та тонких мазках біоплівки, відібраної з поверхні колоній, з метою оцінки морфологічної структури угруповання. Ідентифікацію виконували за сукупністю мікроморфологічних ознак: форма клітин, характер трихом, наявність слизових оболонок та екзополісахаридного матриксу, пігментація, просторове розташування клітин у біоплівці. Окремо фіксували домінуючі морфотипи фототрофів (ціанобактерії, діатомові та зелені водорості) і супутню гетеротрофну мікробіоту, що відображає функціональну різноманітність біокрасту.



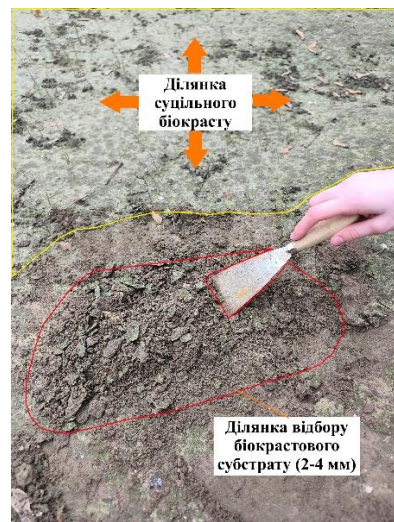
а



б



в



г

Рис. 1. Досліджувана ділянка на території кампусу НТУ «Дніпровська політехніка»: а) план поверхні ділянки із зазначенням місця відбору проб; б) загальний вигляд земельної ділянки між корпусами №3 і №6; в) видимі колонії біокрасту на ущільненому ґрунті; г) відбор проб ґрунту з біокрастом

**Основна частина.** Біокрасти забезпечують критично важливий захист від вітрової та водної ерозії в сухих і деградованих екосистемах. Ціанобактерії, лишайники та мохи відрізняються за структурними ознаками, що безпосередньо відображається у їхній стабілізаційній здатності. Ранні ціанобактеріальні кірки підвищують зчеплення поверхні через продукцію позаклітинних полімерних речовин (ППП) і нитчасті мережі, зменшуючи відрив частинок ґрунту на 40–80% залежно від його текстури [13]. PPP, або екзополісахариди (EPS) представляють собою складні суміші біополімерів, переважно полісахаридів, білків та нуклеїнових кислот, які мікроорганізми виділяють і які утворюють захисну, липку матрицю у вигляді біоплівки, забезпечуючи адгезію та відіграючи ключову роль у мікробних спільнотах.

Лишайникові кірки додатково зміцнюють поверхню ґрунту, інтегруючи грибні гіфи, що проникають у субстрат на 2–5 мм, армуючи агрегати та підвищуючи опір зсувним напруженням [1]. Їхня шорсткіша мікротопографія затримує осад і розсіює енергію опадів, зменшуючи ерозійні втрати ефективніше, ніж ціанобактеріальні кірки.

Мохові кірки забезпечують найвищий рівень стабілізації серед типів біокрастів. З огляду на їхні функції утримання вологи (розділ 4), мохові мати зменшують тріщиноутворення, пов'язане з висиханням, і підтримують цілісність агрегатів. Дослідження в регіонах кам'янистого опустелювання демонструють значно вищу агрегатну стійкість під моховими кірками порівняно з відкритим ґрунтом і нижчу схильність до вітрової та водної ерозії [14].

Попри ці переваги, біокрасти надзвичайно вразливі до механічних порушень. Витоптування, рух транспорту або випас швидко фрагментують кірки, руйнуючи EPS-мережі та повертаючи суцесійний стан назад. Відновлення до пізніх лишайникових чи мохових стадій може тривати десятиліття в аридних кліматах [2]. Це підкреслює потребу мінімізувати порушення в ландшафтах, де біокрасти є основними стабілізаторами.

**Вегетаційні експерименти з рослинами-фіторемедіантами.** Для вегетаційних експериментів обрано рослини, які мають певні характеристики фіторемедіантів та поліпшувачів якісних властивостей ґрунтів.

Ріпак або рапс (*Brassica Napus L.*), однорічна олійна рослина родини Хрестоцвітих. Коріння цієї рослини дуже потужне, воно досягає глибини 2-3 метрів, що забезпечує хорошу життєстійкість. Ріпак вирощують для виробництва харчової та технічної олії, яке застосовується у виробництві біопалива, мастильних матеріалів і навіть у хімічній промисловості. Ріпак швидко формує велику біомасу й кореневу систему, тому придатний для фітостабілізації та часткової фітоекстракції металів (переважно Zn, Cd, Pb) із деградованих ґрунтів. Добре працює як "покривна культура" для зменшення пиління й ерозії та для нарощування органічної речовини [15].

Сорго зернове (*Sorghum bicolor L.*), трав'яниста рослина родини злакових. Різні види його бувають багаторічними й однорічними, ростуть у дикому вигляді або вирощуються як сільськогосподарська культура. Воно теплолюбне, невимогливе до ґрунтів, посухостійке і солестійке. Коренева система у сорго добре розвинена і досягає 2,5 метрів глибини, що дозволяє рослині отримувати вологу у самі посушливі періоди) [16].

Рослина ефективна для фітостабілізації та відновлення структури ґрунту на техногенних і сухих ділянках. Завдяки високій біомасі може знижувати ризик міграції забруднювачів і бути корисним у схемах фітоменеджменту (збір біомаси без харчового використання).

Люпин (*Lupinus L.*) – рід однорічних і багаторічних трав'янистих рослин, напівчагарничків, напівчагарників, чагарників родини бобових (*Fabaceae*). Виростає до 1,5 м заввишки, із стрижневим коренем до 2,5 м глибиною. Існує близько 200 видів люпину, три з яких мають особливе значення для харчування людей і годівлі худоби: люпин білий (*Lupinus albus L.*), люпин синій (*Lupinus angustifolius L.*) і люпин жовтий (*Lupinus luteus L.*). Люпин як бобова рослина фіксує атмосферний азот у симбіозі з ризобіями, тому придатний для біогенізації

бідних і деградованих ґрунтів та запуску сукцесії рослинного покриву. Коренева система (часто з високою здатністю мобілізувати фосфор) допомагає покращувати родючість і підтримує ремедіаційні фітоценози. При вирощуванні люпин має високу азотфіксуючу здатність до 400 кг/га нітрогену і тому може бути цінним у сівозміні [17].

Ячмінь мишачий (*Hordeum murinum L.*), дикоросла рослина з родини Злакових, який має ламке колосся з довгими, гострими щетинками (остюками). Стебло прямостояче або колінчасте, заввишки 15–55 (рідше до 75) см, з блідими вузлами [18]. Ячмінь мишачий добре заселяє порушені місця й утворює щільний дернинний покрив, ефективний для протиерозійної фітостабілізації та зменшення пилових викидів на деградованих ґрунтах. Може використовуватися як рання піонерна культура для швидкого “закриття” поверхні та підготовки ділянки до наступних етапів фіторемедіації.

Для культивування тестових рослин експерименту обрано 3 різних субстрати, які дають можливість оцінити ростовий потенціал рослин та їх чутливість до стимулюючих чи пригнічуючих факторів середовища:

1. Чистий річковий пісок придбаний в роздрібній мережі ТОВ «Епіцентр К» ([www.epicentrk.ua](http://www.epicentrk.ua));

2. Універсальна ґрунтосуміш для квітучих рослин на основі верхнього та нижнього торфу, перліту, компостованих органічних матеріалів та мінеральних добавок від українського виробника ТОВ «Флоріада» ([www.floriada.com](http://www.floriada.com)), рН 5.5–6.8;

3. Біокрастовий субстрат відібраний з поверхневого шару ґрунтів досліджуваної ділянки на глибині 2–5 мм.

На рис. 2 зображено результати вегетаційного експерименту. Обрано 4 тестові рослини, які культивувались в горщиках на трьох субстратах протягом 21 доби. 1-й ряд – пісок, 2-й ряд – універсальна ґрунтосуміш для розсади; 3-й ряд – біокрастовий субстрат. По вертикалі зліва-направо горщики з насінням наступних рослин: сорго – люпин – ріпак – ячмінь мишачий.

На початковому етапі експерименту всі тестові рослини (сорго, люпин, ріпак, ячмінь мишачий) перебувають у фазі проростання, без візуально виражених відмінностей між субстратами. Біокрастовий субстрат характеризується більш структурованою поверхнею та темнішим забарвленням (рис. 2, а), що може свідчити про наявність органічної речовини та мікробіологічної активності. Уже на цьому етапі біокраст створює більш сприятливі умови для утримання вологи порівняно з піщаним субстратом, що може мати навіть негативний ефект перезволоження та пригнічення рослин.

Через 7 діб спостерігається активніше проростання рослин на біокрастовому субстраті порівняно з піском (рис. 2, б), особливо для люпину та ріпаку. Сходи на біокрасті виглядають більш рівномірними та життєздатними, що може бути пов'язано з кращим водоутриманням і наявністю біологічно активних компонентів. У піщаному субстраті ріст є нерівномірним, що свідчить про дефіцит поживних речовин. Універсальна ґрунтосуміш демонструє стабільні, але не завжди максимальні показники росту. Біокраст, ймовірно, стимулює ранній розвиток кореневої системи за рахунок поживних речовин субстрату та симбіозу з мікроорганізмами.

На 14-ту добу чітко простежується перевага біокрастового субстрату для більшості тестових рослин, особливо для сорго та люпину (рис. 2, в). Рослини на біокрасті мають більшу надземну біомасу та інтенсивніше зелене забарвлення листків, що свідчить про кращий фізіологічний стан. Помітна також більша щільність посівів, що вказує на зменшення стресових факторів середовища. У піску рослини залишаються низькорослими, з ознаками уповільненого розвитку. Універсальний ґрунт забезпечує середній рівень росту, але поступається біокрасту за темпами вегетації.

Через 21 добу різниця між субстратами стає максимально вираженою (рис. 2, з). На біокрастовому субстраті всі чотири види рослин демонструють кращі показники росту, зокрема за висотою та щільністю надземної маси. Особливо показовими є результати для люпину та ячменю мишачого, які формують стабільні, добре розвинені фітоценози. Це вказує на високу адаптаційну здатність біокрасту для формування стійких фітоценозів. На піщаному субстраті ростові показники рослин є задовільними, проте дещо поступаються біокрастовим зразкам. Отримані результати свідчать про потенціал біокрастового субстрату як активного середовища для фіторемедії завдяки поєднанню мікробіологічної активності та органічної речовини.

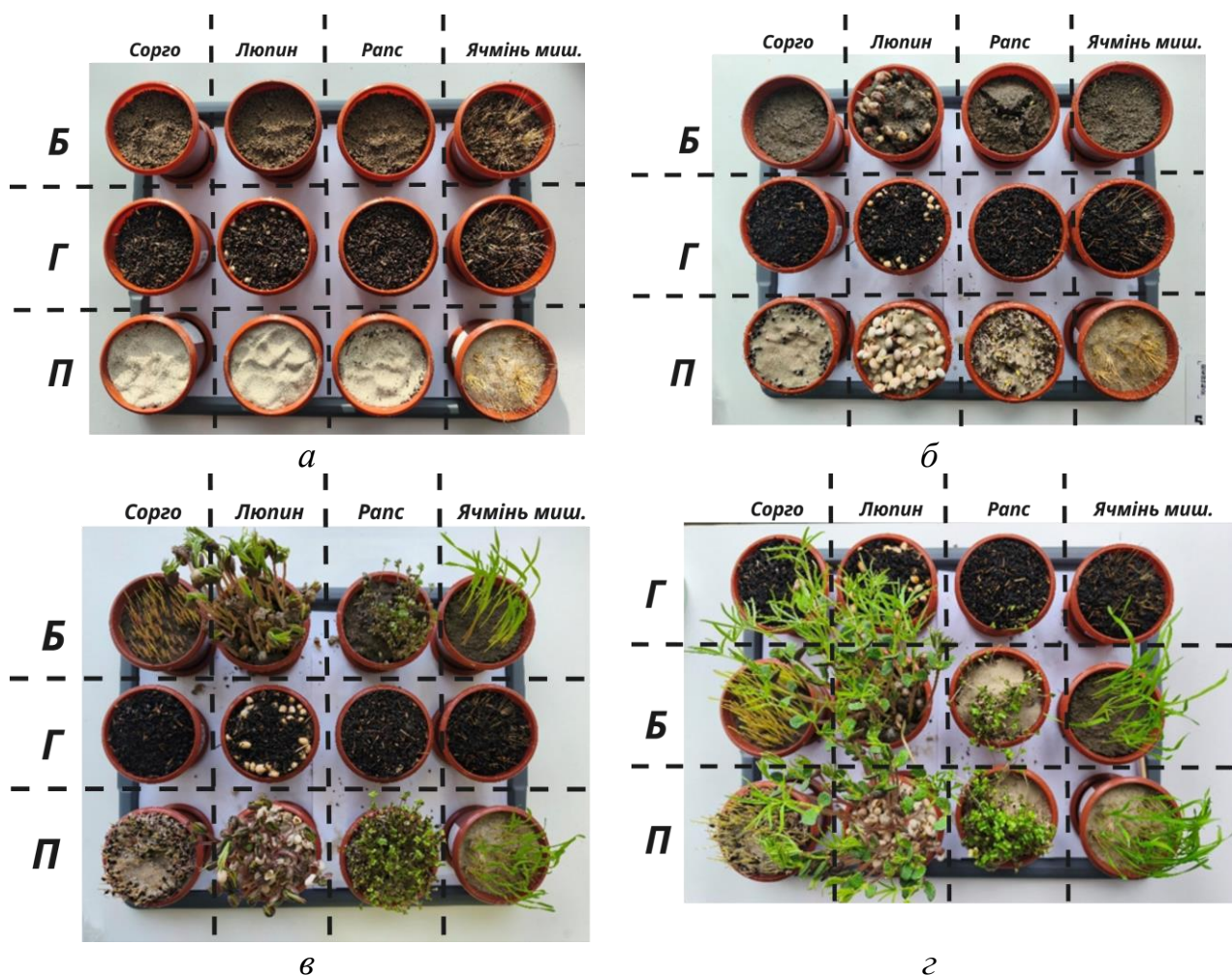


Рис. 2. Результати вегетаційного тесту з рослинами-фіторемедіантами на різних субстратах: а) після закладання вегетаційного тесту; б) після 7 діб; в) після 14 діб; г) після 21 доби; (Б – біокраст; Г – ґрунт; П – пісок)

Результати біометричних показників вегетаційного тесту з рослинами-фіторемедіантами на різних субстратах виявились нерівнозначними (рис. 3).

Біометричні показники сорго істотно варіюють залежно від типу субстрату (рис. 3, а). Найвищі значення росту спостерігаються на біокрастовому субстраті, що свідчить про сприятливі умови для розвитку кореневої системи та активного наростання надземної біомаси. Біокраст, ймовірно, забезпечує оптимальне поєднання вологоутримання, аерації та мікробіологічної активності, що є критичним для сорго як посухостійкої культури. На ґрунтовому субстраті ріст є стабільним, але поступається біокрасту. На піску зафіксовано найнижчі показники, що зумовлено дефіцитом поживних елементів і низькою вологоємністю. Низькі показники на вермикомпості можуть пояснюватися надлишком доступного азоту та солей, що призводить до осмотичного стресу і пригнічення росту. Загалом, результати підтверджують високий потенціал сорго для фіторемедіації на біокрастових субстратах.

Для ріпаку чітко простежується перевага біокрастового субстрату, де зафіксовано максимальні біометричні показники (рис. 3, б). Це свідчить про здатність біокрасту підтримувати інтенсивний ріст швидковегетуючих рослин-фіторемедіантів. Ріпак чутливо реагує на структуру та хімічний склад субстрату, тому біокраст із м'яким поживним режимом і активною мікробіотою створює оптимальні умови. На ґрунтовій суміші ріст є помірним, без вираженого стресу. Піщаний субстрат обмежує розвиток рослин через нестачу поживних речовин і води. Водночас низькі показники на вермикомпості можуть бути пов'язані з надлишком легкодоступних сполук азоту, що викликає токсичний ефект для молодих проростків ріпаку. То ж, надмірно збагачені органічні субстрати не завжди є оптимальними для фіторемедіаційних експериментів.

Ячмінь мишачий демонструє високу адаптивність до різних субстратів, однак найкращі біометричні показники знову ж таки характерні для біокрастового варіанту (рис. 3, в). Це свідчить про здатність біокрасту підтримувати розвиток злакових видів, які є ключовими для стабілізації деградованих ґрунтів. На ґрунті ріст є задовільним, але менш інтенсивним. На піску рослини розвиваються повільніше, що обмежує їхню фіторемедіаційну ефективність без додаткових меліоративних заходів. В умовах вермикомпосту спостерігається пригнічення росту, що може бути пов'язано з високою мінералізацією органічної речовини та можливим дефіцитом кисню в зоні коренів. Для злакових культур такі умови є стресовими на ранніх етапах розвитку. Отримані результати підтверджують доцільність використання біокрасту для формування стійких злакових фітоценозів.

Люпин, як представник бобових рослин, демонструє чітку реакцію на тип субстрату (рис. 3, г). Найкращі біометричні показники знову зафіксовані на біокрастовому субстраті, що може бути пов'язано з кращими умовами для формування бульбочкових бактерій і симбіотичної азотфіксації. На ґрунтовому субстраті ріст є середнім і відносно стабільним. Піщаний варіант істотно обмежує розвиток люпину через низьку забезпеченість поживними елементами. На вермикомпості ріст є пригніченим, що для бобових культур пояснюється надлишком доступного азоту, який знижує потребу рослини в симбіотичній азотфіксації і може порушувати фізіологічні процеси. Це призводить до менш ефективного формування кореневої системи та зменшення надземної біомаси. Таким чином, біокрастовий субстрат є найбільш перспективним середовищем для використання люпину у фіторемедіації.

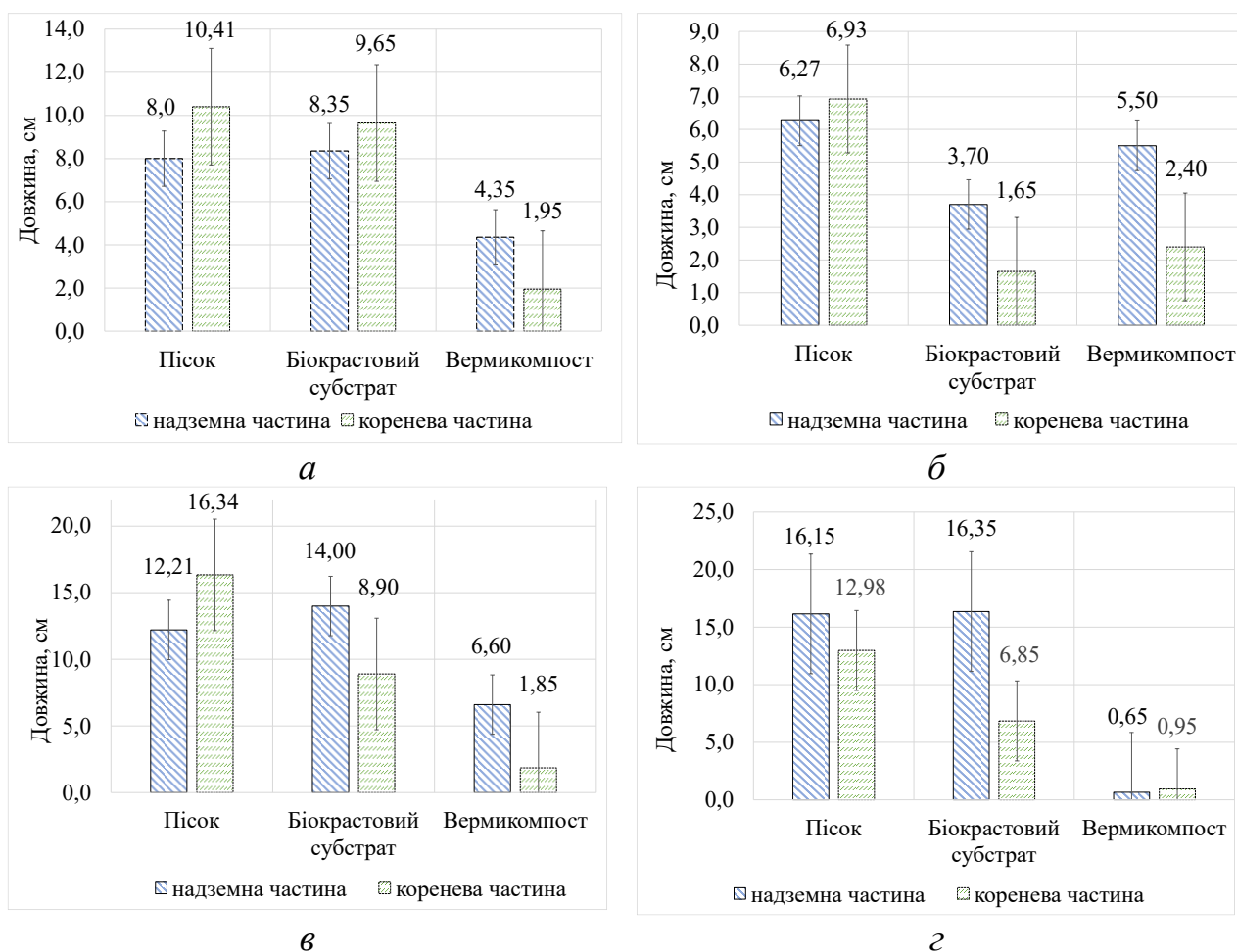


Рис. 3. Результати вимірювання біометричних показників рослин-фіторемедіантів: а) сорго; б) рапс; в) ячмінь мишачий; г) люпин;  
\*Б – біокраст; Г – ґрунт; П – пісок

Результати біометричних вимірювань свідчать, що біокрастовий субстрат забезпечує оптимальні умови росту для всіх досліджених рослин-фіторемедіантів, поєднуючи помірне живлення, стабільний водний режим і високу мікробіологічну активність. Низькі показники росту на вермикомпості пояснюються надлишком доступних поживних речовин, підвищеною солоністю та осмотичним стресом, що особливо критично для молодих рослин. Отримані результати підтверджують доцільність використання біокрасту як ефективного інструменту для фіторемедіації та відновлення деградованих земель, зокрема у воєнно порушених і техногенних ландшафтах.

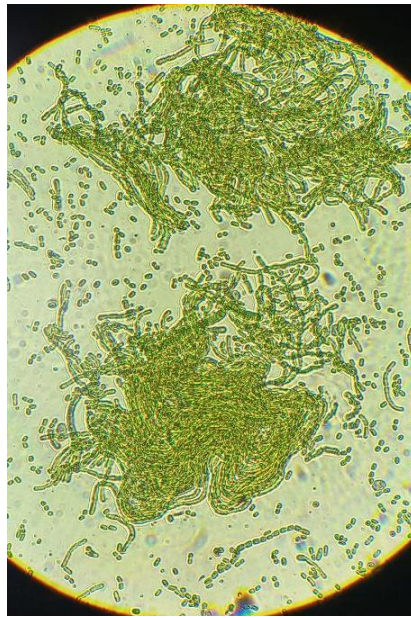
**Дослідження біорізноманіття біокрасту.** Для дослідження видового різноманіття біокрастового субстрату використано світловий мікроскоп з 400-кратним збільшенням. У зразках ґрунтового субстрату домінують нитчасті ціанобактерії типові для біокрастів (*Cyanobacteria*, порядок *Oscillatoriales*).

На рис. 4, а у зразку біокрасту домінують нитчасті ціанобактерії, представлені довгими не розгалуженими трихомами з чіткими поперечними перегородками. Нитки формують щільну переплетену матрицю та локальні скупчення, що характерно для мікробних плівок біокрастів. Місцями спостерігається слизова

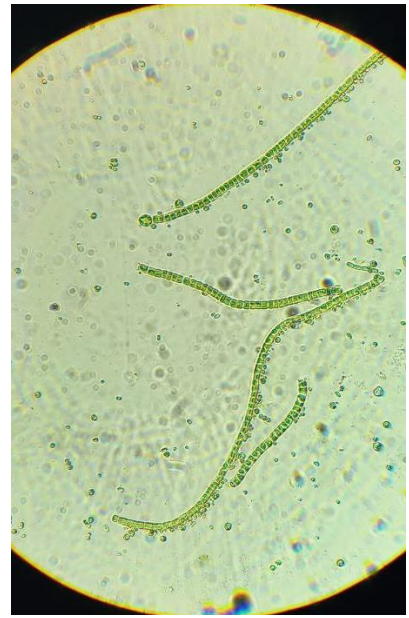
обгортка навколо трихом, яка може виконувати цементуючу функцію та сприяти агрегуванню мінеральних частинок. Морфологічні ознаки (відсутність вираженого розгалуження та гетероцист) відповідають групі *Oscillatoriales* (*Phormidium* sp. – *Leptolyngbya* sp.).



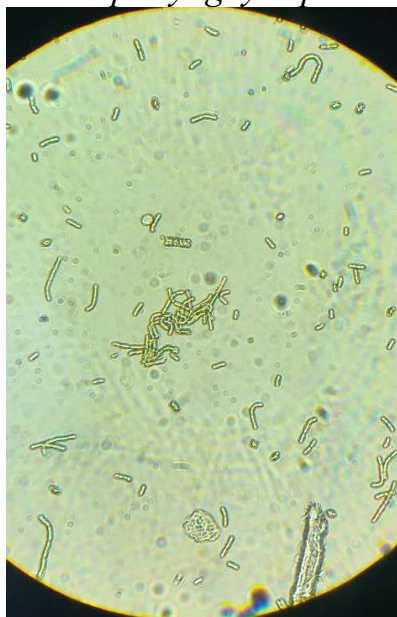
а) *Phormidium* sp. –  
*Leptolyngbya* sp.



б) *Leptolyngbya* sp. –  
*Pseudanabaena* sp.



в) *Microcoleus* sp.



z) *Bacillus* sp.



д) *Pinnularia*



е) *Chlorella*

Рис. 4. Видове біорізноманіття біокрастового субстрату

На рис. 4, б також представлені нитчастих ціанобактерій, представлених тонкими нерозгалуженими трихомами з поперечними перегородками. Трихоми формують щільні переплетені мати та локальні агрегати, що відповідає структурі мікробної біоплівки біокрасту. У полі зору також наявна значна кількість коротких фрагментів ниток (гормогоній), що може свідчити про активне розмноження

нитчастих форм. Морфологічні ознаки узгоджуються з представниками *Oscillatoriales (Leptolyngbya)*, які є ключовими стабілізаторами поверхні ґрунту завдяки утворенню екзополісахаридів.

У зразках також домінують нитчасті ціанобактерії *Microcoleus sp.* (рис. 4, в), типові піонери біокрастових угруповань. Трихоми формують подовжені, дещо вигнуті нитки, які локально контактують із дрібнодисперсними частинками субстрату та детритом. Просторова організація ниток вказує на їх потенційну роль у механічному зв'язуванні частинок та формуванні первинної біоплівки.

У зразках присутні гетеротрофні паличкоподібні бактерії ґрунту (умовно *Bacillus*-подібний морфотип) у вигляді зігнутих дугоподібних паличок та коротких ланцюжків (рис. 4, з). Також у зразках присутні діатомові водорості *Pinnularia (Bacillariophyta)*, з чітко окресленою, видовжено-овальною формою (рис. 4, д). Навколо діатомеї спостерігаються численні короткі паличкоподібні бактерії, розсіяні по препараті та місцями асоційовані з мікрочастинками субстрату. На рис. 4, є показано одноклітинну зелену водорість *Chlorella (Chlorophyta)* з округлою з чіткою оболонкою; всередині видно два пігментовані зеленуваті автоспори, що характерно для стадії поділу.

Виявлення діатомей та одноклітинних зелених водоростей поряд із бактеріями відображає змішаний склад біокрастової мікробіоти та потенційну участь фототрофів у формуванні біоплівки й стабілізації поверхневого шару ґрунту.

**Висновки.** Біокрасти – це високоорганізовані, багатофункціональні мікробні угруповання ґрунтів, які мають важливе значення для екосистеми ґрунтів, їх стабілізації і захисту від ерозії. Ціанобактеріальні кірки ініціюють надходження вуглецю та азоту і забезпечують ранню стабілізацію; лишайникові кірки додають структурної складності й модифікують волого- та енергообмін; мохові кірки створюють буферні мікроумови, що підтримують високу мікробну активність і довготривале відновлення ґрунтів.

Результати виконаних вегетаційних експериментів демонструють, що біокрастовий субстрат забезпечує найбільш сприятливі умови для росту рослин-фітотримередіантів у порівнянні з піщаним і ґрунтовим субстратом. Це підтверджує доцільність використання біокрасту як інноваційного природоорієнтованого рішення для відновлення деградованих земель та підвищення ефективності фітотримередіації.

Мікроскопічні дослідження біокрастового субстрату продемонстрували структурну й функціональну різноманітність мікробіоти. У зразках біокрасту зафіксовано домінування нитчастих ціанобактерій *Phormidium sp.*, *Leptolyngbya sp.*, *Microcoleus sp.* разом із кокоїдними ціанобактеріями, а також супутніми діатомеями й одноклітинними зеленими водоростями. Це вказує на активну фототрофну “каркасну” спільноту та наявність гетеротрофної бактеріальної фракції. Нитчасті ціанобактерії формують біоплівку та екзополісахаридний матрикс, який склеює мінеральні частинки, підвищує стабільність поверхні ґрунту, водотримання і знижує ерозію, створюючи кращі умови для проростання й укорінення рослин. Фототрофні компоненти біокрасту забезпечують первинну продукцію та накопичення органічної речовини, а частина ціанобактерій може робити

внесок у азотний режим (прямо або через стимуляцію мікробних консорціумів), що підтримує стартове живлення фіторемедіаторів.

У комплексі біокрастові спільноти можуть бути корисними як “природний біоінокулянт” для фіторемедіації, оскільки покращують структуру і функціональний стан деградованих ґрунтів, підсилюючи приживлюваність рослин та забезпечуючи умови для стабільно функціонуючої екосистеми.

#### Перелік посилань

1. Weber, B., Büdel, B., & Belnap, J. (Eds.). (2016). *Biological soil crusts: An organizing principle in drylands* (Ecological Studies, Vol. 226). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0>
2. Belnap, J., Kaltenecker, J. H., Rosentreter, R., Williams, J., Leonard, S., & Eldridge, D. (2001). *Biological soil crusts: Ecology and management* (Technical Reference 1730-2). U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management.
3. Pushkareva, E., Elster, J., Holzinger, A., Niedzwiedz, S., & Becker, B. (2022). Biocrusts from Iceland and Svalbard: Does microbial community composition differ substantially? *Frontiers in Microbiology*, 13, 1048522. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1048522>
4. Pushkareva, E., Sommer, V., Barrantes, I., & Karsten, U. (2021). Diversity of microorganisms in biocrusts surrounding highly saline potash tailing piles in Germany. *Microorganisms*, 9(4), 714. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9040714>
5. Belnap, J., Weber, B., & Büdel, B. (2016). *Biological soil crusts as an organizing principle in drylands*. In B. Weber, B. Büdel, & J. Belnap (Eds.), *Biological soil crusts: An organizing principle in drylands* (pp. 3–13). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_1)
6. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 15, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.09.002>
7. United Nations Convention to Combat Desertification. (2017). *Global land outlook* (1st ed.). UNCCD. [https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2017-09/GLO\\_Full\\_Report\\_low\\_res.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/documents/2017-09/GLO_Full_Report_low_res.pdf)
8. Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., & von Maltitz, G. (2018). *World atlas of desertification: Rethinking land degradation and sustainable land management* (3rd ed.). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/9205>
9. Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Chamizo, S., Afana, A., & Solé-Benet, A. (2012). Biological soil crusts and their response to rainfall intensity in a semiarid environment: Effects on soil surface stability and runoff. *Geomorphology*, 145–146, 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.042>
10. Elbert, W., Weber, B., Burrows, S., Steinkamp, J., Büdel, B., Andreae, M. O., & Pöschl, U. (2012). Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*, 5(7), 459–462. <https://doi.org/10.1038/ngeo1486>
11. Antoninka, A. J., Faist, A. M., Rodríguez-Caballero, E., & Belnap, J. (2020). Biological soil crusts in ecological restoration: Emerging research and perspectives. *Restoration Ecology*, 28(S2), S3–S12. <https://doi.org/10.1111/rec.13201>
12. Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Román, J. R., & Cantón, Y. (2016). The role of biological soil crusts in soil moisture dynamics and erosion in drylands: A review. *Ecohydrology*, 9(8), 1524–1540. <https://doi.org/10.1002/eco.1719>
13. Gholamhosseinian, A., Sepehr, A., Asgari Lajayer, B., Delangiz, N., & Astatkie, T. (2021). Biological soil crusts to keep soil alive, rehabilitate degraded soil, and develop soil habitats. In A. Vaishnav & D. K. Choudhary (Eds.), *Microbial polymers: Applications and ecological perspectives* (pp. 289–309). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0045-6\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0045-6_13)
14. Cheng, C., Li, Y., Long, M., Gao, M., Zhang, Y., Lin, J., & Li, X. (2020). Moss biocrusts buffer the negative effects of karst rocky desertification on soil properties and soil microbial richness. *Plant and Soil*, 475(1–2), 153–168. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04602-4>
15. *Пінак (панс). Аграрії Разом*. <https://agrarii-razom.com.ua/plants/ripak-%28raps%29>
16. *Сорго. Оліс*. 10.08.2016. <https://olis.com.ua/press-centre/statii/st-sorgo/>

17. Люпин. *LegumeHub*. <https://legumehub.eu/uk/crops/lupin/>

18. Ячмінь мишачий. *Аграрії Разом*. <https://agrarii-razom.com.ua/plants/yachmin-mishachiy>

### ABSTRACT

**Purpose.** To investigate the diversity of biocrust microorganisms and assess their potential to enhance the effectiveness of eco-technologies for phytoremediation of degraded soils.

**Methods.** The methodology is based on an analytical review of contemporary biocrust research; collection of surface soil samples with visible biocrust from the campus area of Dnipro University of Technology; vegetation (growth) experiments using test phytoremediator plants, *Brassica napus* L., *Sorghum bicolor* L., *Lupinus albus* L., and *Hordeum murinum* L., which cultivated on sandy, soil, and biocrust substrates; and microscopic investigation of biocrust biodiversity.

**Results.** Vegetation tests demonstrated the advantage of the biocrust substrate for most of the studied plant species in terms of germination energy, seedling density, and aboveground biomass formation compared with sand and a standard soil mixture; the effect was most pronounced on days 14–21 of cultivation. Biocrust provided a more stable water regime and likely stimulated early root development due to microbial activity and the presence of organic matter. Microscopy confirmed a mixed biocrust microbiota dominated by filamentous cyanobacteria (*Phormidium*, *Leptolyngbya*, *Microcoleus*), with heterotrophic bacteria of a *Bacillus*-like morphotype, diatoms (*Pinnularia*), and green algae (*Chlorella*), which form a biofilm and an exopolysaccharide matrix that binds soil particles.

**Scientific novelty.** An applied approach is substantiated for using biocrust as a “natural bioinoculant” to support phytoremediation plant communities by integrating surface stabilization, phototrophic primary production, and a microbial matrix that improves plant establishment on compacted and disturbed soils.

**Practical significance.** The results provide a basis for developing eco-technologies for the rehabilitation of degraded and technogenically disturbed lands using biocrust inoculants to reduce erosion and increase the effectiveness of phytoremediation.

**Keywords:** *biocrust, phytoremediation, degraded soils, cyanobacteria, vegetation test.*

дата першого надходження статті до видання	10.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	23.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	31.03.2026