

ЕФЕКТИВНІСТЬ БІОМЕЛІОРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВІДНОВЛЕННІ ТА ПІДВИЩЕННІ РОДЮЧОСТІ ДЕГРАДОВАНИХ ҐРУНТІВ

О. П. ПАНАСЮК,

Старший викладач кафедри геодезії землеустрою та земельного
кадастру

E-mail: olga600917@ukr.net

Одеський державний аграрний університет

В. С. КОСТЮК,

кандидат біологічних наук, доцент

E-mail: kostyuk_vs@yahoo.com

Житомирський державний університет імені Івана Франка

Анотація. У статті розглянуто актуальну проблему деградації ґрунтів та обґрунтовано необхідність застосування біомеліораційних методів як ключового інструменту для відновлення їхньої родючості. Родючість визначається як сукупність трьох основних властивостей, а саме фізичних, хімічних та біологічних. Відзначено вплив біомеліораційних методів на відновлення родючості через накопичення органічної речовини, стимуляцію біологічної активності, покращення структури ґрунту. Досліджено основні біомеліораційні методи та їхній вплив. Розглянуто фітореMediaцію як захід, який направлений на зменшення токсичних елементів у забруднених ґрунтах, завдяки вирощуванню спеціальних рослин, здатних виводити або локалізувати токсичні речовини в кореневій зоні або надземній частині. Визначено роль органічного землеробства як методу біомеліорації. Представлено схему механізму впливу біомеліорації на родючість ґрунтів та рекомендації з впровадження комплексу біомеліораційних систем, для ефективного відновлення деградованих ґрунтів в Україні. Зазначено, що подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку регіонально адаптованих біомеліораційних систем та оцінку довгострокового економічного ефекту від їхнього впровадження.

Ключові слова: деградація ґрунтів, родючість ґрунту, біомеліорація, сидерати, фітореMediaція, фітореMediaція, мікробні препарати, органічне землеробство.

Постановка проблеми

Деградація ґрунтів, спричинена інтенсивним антропогенним навантаженням, змінами клімату та нераціональним землекористуванням, є глобальною екологічною та економічною проблемою. Втрата гумусу, погіршення фізичної структури, засолення, підкислення та зниження біологічної активності ґрунтів призводять до зменшення врожайності та стабільності агроecosистем. Традиційні хімічні та інженерно-меліоративні методи часто є економічно витратними та можуть мати негативний вплив на довкілля. У зв'язку з цим, біомеліорація – використання біологічних чинників (органічних добрив, рослин, мікроорганізмів) для поліпшення властивостей ґрунту – набуває стратегічного значення як екологічно безпечний і стійкий підхід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання відновлення родючості деградованих ґрунтів за допомогою біомеліораційних методів постійно розглядається у сучасних наукових дослідженнях як в Україні, так і за кордоном. У праці А. Пасенка, О. Сакуна, О. Никифорової, О. Дуднік та М. Каминіної [1] акцентовано увагу на підвищенні біологічної активності ґрунтів шляхом агрохімічної меліорації із використанням нетрадиційних добрив. Автори доводять, що застосування органічних добрив природного походження сприяє активізації ґрунтової мікробіоти, покращенню структури ґрунту та збільшенню вмісту гумусу, що є основою підвищення його родючості. У роботі В. Волкогона «Біологічна меліорація

ґрунтів: традиційне і нове» детально розглянуто принципи та механізми біомеліорації, зокрема роль мікроорганізмів, сидератів і бобових культур у відновленні біохімічної рівноваги деградованих земель. Учений підкреслює, що біомеліораційні заходи є екологічно безпечними та економічно доцільними в системі сталого землекористування [2]. Питання біологічних методів ремедіації забруднених ґрунтів розкрито у статті В. Самохвалової, де розглянуто механізми нейтралізації токсичних сполук, зокрема важких металів, за допомогою рослинних і мікробіологічних агентів. Авторка доводить ефективність біотехнологічних підходів для очищення та відновлення ґрунтів у зоні техногенного навантаження [3].

Іноземні джерела підтверджують тенденцію до активного впровадження біомеліораційних методів. Так, у дослідженні «Assisted Phytoremediation for Soil Fertility Restoration on Polluted and Degraded Lands» [4] описано ефективність застосування фіторемердіації для підвищення родючості деградованих земель. Автори зазначають, що синергійне використання рослин і мікроорганізмів дозволяє не лише видаляти забруднювачі, а й покращувати фізико-хімічні властивості ґрунту. Подібні результати наведено у роботі «Study of Bioremediation and Soil Fertility: Effect of Vermiremediation on Chlorpyrifos-Contaminated Soil» [5], де дослідники довели, що використання дощових черв'яків сприяє покращенню структури ґрунту та відновленню його біологічної активності. Узагальнюючий огляд «Soil Bioremediation: Technologies and Trends» [6] висвітлює новітні технології очищення і відновлення ґрунтів,

серед яких найперспективнішими є мікробіологічна та фітотехнологічна ремедіація. У публікації «Degradation of Pesticides: Impact on Soil Fertility and Nutrient Cycling» [7] розкрито механізми впливу пестицидів на ґрунтову родючість, підкреслено важливість біологічних процесів у стабілізації кругообігу поживних речовин після деградації хімічних сполук.

Значну увагу вітчизняні науковці приділяють також правовим аспектам відновлення земель. У працях Т. Лісової [8] та Н. Гавриш, С. Позняка [9] проаналізовано сучасний стан нормативно-правового регулювання меліорації ґрунтів в Україні. Автори вказують на необхідність удосконалення законодавчої бази у сфері охорони земель та запровадження стимулюючих механізмів для суб'єктів господарювання, які впроваджують екологічно безпечні біомеліораційні технології.

Отже, аналіз публікацій свідчить про те, що біомеліораційні методи розглядаються науковцями як комплексний підхід до відновлення деградованих ґрунтів, що поєднує біологічні, екологічні та правові аспекти. Узагальнення досвіду показує, що їх застосування є перспективним напрямом у забезпеченні сталого землекористування та підвищенні продуктивності агроecosистем.

Мета дослідження полягає в аналізі та систематизації даних про вплив біомеліораційних методів на основні показники родючості деградованих ґрунтів.

Матеріали і методи дослідження

Дослідження було проведено із застосуванням інтегрованої мето-

дологічної рамки, що поєднувала аналітичні, польові, лабораторні та статистичні підходи, забезпечуючи всебічне оцінювання ефективності біоремедіаційних практик на деградованих ґрунтах. Емпірична частина дослідження охоплювала кілька типів українських ґрунтів – передусім чорноземи, сірі лісові ґрунти та легкі піщані субстрати, які є типовими прикладами територій, що зазнали ерозії, ущільнення, виснаження гумусу та агрохімічного дисбалансу. Для порівняння було досліджено як ділянки з традиційним землекористуванням, так і екологічно порушені. Біомеліоративні заходи включали застосування сидеральних культур, сівозмін із використанням бобових, мікробіологічних препаратів, компостованої органічної речовини та рослинних ремедіаційних агентів. Кожну технологію оцінювали щодо її внеску в поліпшення структури, накопичення поживних речовин, підвищення біологічної активності та відновлення екологічних функцій ґрунту. Польові експерименти передбачали систематичний відбір проб на фіксованих глибинах відповідно до стандартних агрохімічних протоколів.

Лабораторні аналізи виконували відповідно до національних та міжнародних стандартів, зокрема ДСТУ 4287:2004 для визначення вмісту гумусу, ДСТУ ISO 14235:2005 для оцінювання активного вуглецю методом окиснення перманганатом калію, а також ДСТУ 7863:2015 для визначення вмісту азоту, фосфору та калію. Мікробіологічну активність оцінювали методом підрахунку колоній та методом дихання субстрат-індукованої реакції. Показники рН ґрунту, щільність складання та агрегатний склад визначали за стандартними

грунтознавчими процедурами для оцінювання впливу біомеліорантів на фізичні властивості.

Просторову диференціацію показників якості ґрунтів і візуалізацію зон покращення виконували за допомогою ГІС-інструментів (ArcGIS Pro, QGIS), що дало змогу ідентифікувати просторові закономірності динаміки ґрунтового відновлення та забезпечити доказову інтерпретацію біомеліоративної ефективності.

Результати дослідження та їх обговорення

Проблема деградації ґрунтів є однією з найгостріших екологічних загроз сучасності. Деградація ґрунту розглядається як часткове або повне порушення функцій ґрунтової екосистеми. Складна взаємодія між природними факторами (наприклад, ґрунт, клімат, рослинний покрив, топографія) та антропогенними процесами (наприклад, урбанізація, землекористування, надмірне випасання худоби, воєнні дії) пов'язана з деградацією ґрунту. Європейський Союз визнав десять загроз для функцій ґрунту: водна та вітрова ерозія; зменшення органічної речовини; забруднення; утворення ґрунтової кірки; ущільнення; втрата біорізноманіття ґрунту; засолення; повені та зсуви; опустелювання; підкислення. Найбільш поширеними видами деградації є ерозія ґрунту (близько 13% орних земель Європи зазнає нестійких втрат ґрунту (>5 т га на рік), ущільнення (вражено близько 36% європейських ґрунтів), засолення (близько 3 мільйонів га європейських ґрунтів), забруднення (у Європі близько 2,5 мільйона потенційно забруднених ділянок, близько 14% з яких (340 000 ділянок) забруд-

нені та потребують заходів щодо відновлення) [4].

Другим типом є фізичне забруднення – зміна фізичних властивостей ґрунтів, як-от їхнє надмірне ущільнення. Також спостерігається хімічне забруднення, яке виникає через потрапляння токсичних речовин, важких металів та продуктів згоряння вибухівки, що призводить до отруєння ґрунту. І, нарешті, відбувається біологічне руйнування – масова загибель усього живого, особливо мікробіоти, що має вирішальне значення для родючості ґрунту [10]. Найбільш поширеними методами біомеліорації є: сидерація (використання зелених добрив); використання бобових культур; мікробіологічна меліорація; фітомеліорація; органічне землеробство (табл. 1).

Біомеліораційні методи діють комплексно, змінюючи як хімічні, так і біологічні властивості ґрунту. Органічна маса сидератів і післяжнивних решток розкладається мікроорганізмами, утворюючи гумусові речовини. Це поліпшує буферність і родючість ґрунту, наслідок чого проходить підвищення вмісту гумусу. За даними Інституту ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського, внесення сидератів у сівозміні сприяє підвищенню вмісту гумусу на 0,1–0,2% за 2–3 роки. Сидерати не лише утримують ключові поживні елементи (азот, фосфор, калій) в органічній формі, запобігаючи їх вимиванню та нітратному забрудненню ґрунтових вод. Вони, також, є потужним джерелом азоту: зелена маса додає в ґрунт приблизно 200–250 кг/га, що замінює 600–700 кг/га традиційних азотних добрив. Загалом, використання післяжнивних сидератів разом із побічною продукцією та кореневими рештками

Таблиця 1. Основні біомеліораційні методи та їхній вплив на властивості ґрунту

Метод біомеліорації	Основна суть	Вплив на ґрунт	Результат застосування
Сидерація (зелене добриво)	Вирощування рослин (гірчиця, люпин, жито, фацелія) з подальшим заорюванням.	Підвищує вміст органічної речовини, покращує структуру.	Зростання вмісту гумусу на 0,1–0,2% за 2–3 роки.
Бобові культури	Симбіоз із бактеріями <i>Rhizobium</i> для фіксації азоту.	Збагачують ґрунт біологічним азотом.	Підвищення азотного балансу на 40–60 кг/га.
Мікробіологічна меліорація	Внесення мікроорганізмів (мікориза, ризобактерії, фосфатмобілізатори).	Активізує ґрунтову мікрофлору, мобілізує елементи живлення.	Підвищення врожайності на 10–15%.
Фітомеліорація	Використання спеціальних рослин для рекультивациі деградованих земель.	Закріплює схили, зменшує ерозію, покращує структуру.	Зниження ерозійних втрат ґрунту на 30–40%.
Органічне земле-робство	Використання компостів, гною, мульчі.	Підвищує вміст органіки, покращує водопроникність.	Стабілізація родючості, зменшення ущільнення ґрунту.

*Сформовано авторами на основі [4, 10]

повністю компенсує винос органіки. Це забезпечує додаткове надходження 68,4 центнера органічної речовини на гектар, що еквівалентно 1620 тоннам гною [11].

Важливим питанням у відновленні ґрунтів є активізація мікробіологічної діяльності. Біомеліорація стимулює розвиток корисної мікрофлори, що бере участь у мінералізації органічних сполук і колообігу поживних елементів. Мікроорганізми, такі як гриби та бактерії, виділяють полісахариди та інші біополімери, які діють як біологічний «клей», склеюючи дрібні ґрунтові частинки в стійкі агрегати, що є важливим для відновлення структури ґрунту, поліпшення його пористості, аерації та водопроникності, що, своєю чергою, запобігає ерозії та утворенню ґрунтової кірки. Мікробіологічна меліорація значно підвищує доступність поживних речовин. Азотфіксуючі бактерії (наприклад, ризобії) переводять атмосферний азот (N_2) у форми,

доступні для рослин, а фосфатмобілізуючі мікроорганізми розчиняють важкодоступні мінеральні сполуки фосфору та калію, роблячи ці елементи живлення придатними для поглинання рослинами. Так, найвищий рівень продуктивності сівозміни на дерново-підзолистих ґрунтах в перерахунку на кормові одиниці забезпечила орґано-мінеральна система удобрення сидерат+гній+ NPK , що перевищувало продуктивність сівозміни на ділянках за традиційної системою удобрення – NPK +гній на 21% на фоні без інокуляції та на 26% – на фоні інокуляції [12].

Мікрофлора також відіграє ключову роль у гумусоутворенні, розкладаючи органічні рештки та синтезуючи стабільні гумусові речовини, які є основою довгострокової родючості. Нарешті, мікробіологічні процеси сприяють детоксикації ґрунту, оскільки певні групи бактерій здатні розкласти (біоремедіація) хімічні забруднювачі, такі як пестициди та

нафтопродукти, а антагоністичні мікроорганізми допомагають пригнічувати ґрунтові патогени. Особливо це важливо для відновлення деградованих ґрунтів внаслідок воєнних дій. Дослідження [10] показало, що внесення азотно-фосфорного мінерального добрива, соломи та біологічного препарату «Екостерн detox» як меліорантів позитивно позначилося на агрохімічних показниках ґрунту, що постраждав від воєнних дій Харківської області, та скорегувало мікробіологічні процеси в оптимальному напрямку, хоча й не виявило системної дії на динаміку вмісту рухомих форм важких металів. Сприятливий вплив меліоративних заходів на ґрунтове середовище був валідований біотестом: синергічна дія досліджуваних чинників забезпечила збільшення висоти рослин кукурудзи на 14,3–18,1%, надземної маси – на 24–46,2% та кореневої маси – на 13,3–14,3 %. У дослідях Уманського національного університету садівництва встановлено, що застосування мікробних препаратів типу Ризобіот та Фосфоентерин підвищує врожайність зернових на 10–15%, а коефіцієнт використання фосфору – на 25%.

Поліпшення структури ґрунту досягається завдяки кореневій системі сидератів, які розрихлюють ґрунт, покращуючи його аерацію та водопроникність. За даними досліджень Асканійської ДСДС ІЗЗ НААН, проведених на зрошуваних ділянках, потенціал сидеральних культур щодо підвищення ґрунтової родючості знаходиться в прямій залежності від обсягу внесеної ними біомаси. Кількість накопиченої біомаси є функцією комбінованої дії двох факторів: сприятливого гідротермічного ре-

жиму вегетаційного періоду та правильно обраних агротехнічних заходів. При цьому, дисковий обробіток ґрунту продемонстрував вищу ефективність для накопичення сирової маси сидератами, ніж застосування нульової технології (No-Till). Зокрема, при дисковому обробітку зафіксовано такі обсяги сирової сидеральної маси: 11,97 т/га (гречка), 10,13 т/га (буркун білий однорічний) та 14,47 т/га (фацелія пижмолиста). Нульова технологія забезпечила дещо нижчі показники: 10,74 т/га, 9,38 т/га та 13,25 т/га відповідно [13]. Таким чином, окультурювання ґрунту стимулює інтенсивніші процеси перетворення органічної речовини, водночас уповільнюючи її мінералізацію. Це означає, що окультурений ґрунт менше втрачає органіки, а швидкість біологічного кругообігу речовин та енергії в ньому зростає. Ключовою ознакою культурного ґрунтоутворення є підвищення біогенності ґрунту на тлі зниження інтенсивності розкладання органічних залишків, що свідчить про глибокі генетичні зміни у способі трансформації органіки [1].

Біомеліораційні методи є однією з найважливіших і найбільш ефективних груп заходів у боротьбі з ерозією ґрунтів, оскільки вони використовують рослинний покрив для захисту, зміцнення та відновлення родючості ґрунту. Ці методи спрямовані на створення стійкого біологічного бар'єру, який запобігає руйнівній дії води та вітру. Біомеліорація працює за кількома основними напрямками, що забезпечують комплексний захист від ерозії. По-перше, фізичне закріплення ґрунту кореневою системою рослин, запобігає їхньому змиванню (водна ерозія) або здуванню (вітрова ерозія). По-друге, надземна частина

рослин (листя, стебла, покривні культури) гасить енергію дощових крапель, не даючи їм руйнувати структуру ґрунту та утворювати поверхневу кірку. По-третє, рослинний покрив та пожнивні рештки сповільнюють швидкість поверхневого стоку води, що дає більше часу на її інфільтрацію (вбирання) та значно зменшує її руйнівну силу. І четверте, кореневі виділення та розкладання органічних решток сприяють агрегації ґрунту (утворенню міцних грудочок), що підвищує його водопроникність і стійкість до руйнування. Найбільш поширеними та ефективними біомеліораційними заходами є:

- лісомеліорація – це створення захисних лісових насаджень (лісосмуг, полезахисних смуг, прибалкових насаджень) на сільськогосподарських угіддях;

- ґрунтозахисні сівозміни – це науково обґрунтоване чергування культур у часі та на території, яке включає багаторічні трави та інші ґрунтопокривні рослини;

- залуження та дернування – цей метод передбачає створення постійного трав'яного покриву на найбільш ерозійно-небезпечних ділянках (крутих схилах, уздовж берегів водойм, на дні балок), де обробка ґрунту заборонена або недоцільна;

- використання покривних культур та мульчування. Покривні культури (сидерати) – рослини, які висівають у проміжках між основними культурами або після збирання врожаю. Вони покривають ґрунт у періоди, коли він зазвичай залишається оголеним, захищаючи його від ударів дощу та вітру. Мульчування органічними рештками – це залишення пожнивних решток (солома, стерня) на поверхні ґрунту (наприклад, при

технологіях No-Till або Mini-Till). Мульча запобігає прямому контакту дощу з ґрунтом, зменшує випаровування вологи та уповільнює стік. У степових регіонах фітомеліорація із застосуванням багаторічних трав (еспарцет, костриця) дозволила знизити ерозійні втрати ґрунту на 30–40%.

Зазначимо, що бобові культури забезпечують рослини біологічним азотом, а деякі види мікроорганізмів – доступним фосфором і калієм, що забезпечує оптимізацію поживного режиму ґрунтів. За даними досліджень, кожен гектар посіву люпину здатен накопичити 40-50 тонн органічної маси, яка є цінним джерелом органічного вуглецю та біологічного азоту. Окрім люпину, у зволоженій зоні Полісся активно використовують інші бобові культури, такі як пелюшка, буркун та вика. Коли ці бобові сидерати заорюються в ґрунт разом із соломою та кореневими рештками ячменю, вони забезпечують значне підвищення вмісту поживних елементів: азоту – у 4 рази, фосфору – у 2,8 рази, а калію – у 2,5 рази. Оскільки сидерати містять невелику кількість лігніну та ароматичних сполук (тих, що беруть участь у формуванні гумусу), вони швидко мінералізуються. Це гарантує оперативне постачання вуглецю для живлення ґрунтових мікроорганізмів. Основними критеріями для вибору сидератів для проміжних посівів є їхня врожайність, тривалість вегетаційного періоду, фітосанітарні властивості та коефіцієнти розмноження насіння [11].

Важливим напрямом фітомеліорації є фіторемедіація – очищення ґрунтів від токсичних забруднювачів за допомогою рослин. Механізми фіторемедіації включають фітоекстракцію, деградацію, фільтрацію,

накопичення, стабілізацію та випаровування. Екстракція, трансформація та секвестрація ефективно видаляють такі забруднювачі, як важкі метали та радіонукліди. При цьому важливу роль відіграють рослини гіперакумулятори, які здатні рости на ґрунтах, що багаті на важкі метали, поглинаючи велику кількість цих металів під час періоду вегетації та не виявляти жодних ознак фітотоксичності [6]. Для очищення ґрунтів, забруднених внаслідок військової агресії, найбільш перспективними культурами є горох (*Pisum sativum* L.) та міскантус (*Miscanthus giganteus*), оскільки вони демонструють найширший діапазон поглинання токсичних речовин. При виборі конкретної культури для фітореMediaції важливим питанням є доцільності подальшого використання її біомаси. У цьому контексті енергетичні культури, що використовуються для виробництва пелет або брикетів, є кращим вибором. Зокрема, рицина (*Ricinus communis* L.) може бути перероблена на біоетанол, що вирішує проблему безпеки, оскільки її забруднена біомаса не потрапляє у харчовий ланцюг. Енергетичні культури, як-от міскантус (*Miscanthus giganteus*), не лише сприяють фітореMediaції, але й підвищують енергетичну стабільність країни, знижуючи залежність від викопного палива та розвиваючи відновлювані джерела енергії. Крім того, вибір культури для очищення ґрунтів має враховувати кліматичні особливості регіону. Наприклад, сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) є доцільним для використання на півдні України завдяки його біологічній стійкості до високих температур [13].

Міжнародний досвід раціонального використання земельних угідь свідчить про надзвичайно високий

потенціал впровадження методів органічного землеробства. Біологічне землеробство, яке ще називають органічним, передбачає відмову від використання хімікатів не тільки для виробництва рослинницької продукції, а й для відтворення родючості ґрунту. Даний вид землеробства суттєво зменшує використання зовнішніх факторів виробництва та ресурсів за рахунок обмеження застосування синтезованих хімічним шляхом добрив і пестицидів та широкого використання природних чинників. Так ефективним напрямом біореMediaції ґрунтів, забруднених пестицидами, є компостування. Цей екологічно чистий метод біостимуляції полягає у мікробному розкладанні органічної речовини в окисних умовах для отримання стабільного органічного добрива. Завдяки термофільним температурам, що виникають під час процесу, внесення компосту підвищує та прискорює біорозклад пестицидів. Головними деструкторами забруднювачів є актиноміцети, гриби та нітрифікуючі бактерії, які є одночасно і рушіями рекультивациі, і індикаторами якості ґрунту [14]. Отже, біомеліораційні методи діють комплексно, змінюючи як хімічні, так і біологічні властивості ґрунту, створюючи умови підвищення родючості та сталість агроecosистем (рис. 1).

Для ефективного відновлення деградованих ґрунтів в Україні необхідно впроваджувати комплексні біомеліораційні системи, які будуть включати:

- запровадження ґрунтозахисних сівозмін, з обов'язковим включенням багаторічних трав та бобових культур для підвищення вмісту гумусу;
- активне використання сиде-

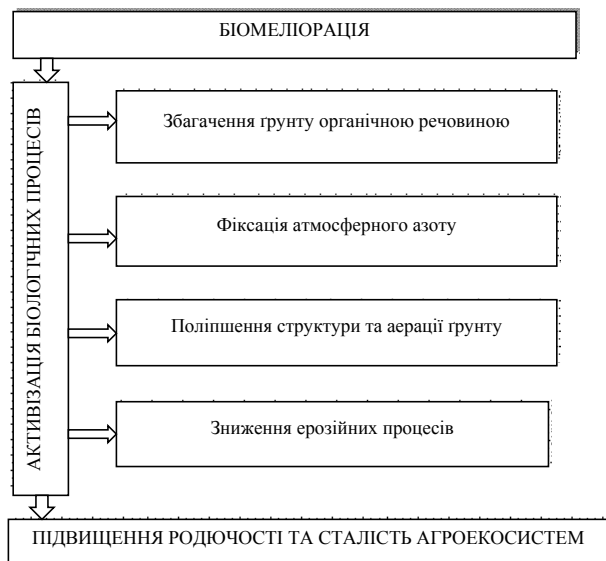


Рис. 1. Механізм впливу біомеліорації на родючість ґрунтів

*Примітка: Розроблено авторами

ратів (гречка, фацелія, буркун) для компенсації виносу органічної речовини та забезпечення ґрунту азотом;

- застосування фіторемедіації для очищення ґрунтів від токсичних забруднювачів, з використанням культур широкого діапазону поглинання та енергетичних культур, чия біомаса може бути перероблена на біоетанол чи пелети, що гарантує уникнення її потрапляння у харчовий ланцюг;

- вибір культур здійснюється з огляду на кліматичні особливості регіону;

- стимулювання мікробіоти, завдяки мікробним препаратам та компостуванню, що сприяє швидшому розпаду пестицидів та підвищує доступність поживних елементів для рослин;

- на державному рівні необхідне удосконалення законодавчої бази у сфері охорони земель та запрова-

дження стимулюючих механізмів для суб'єктів господарювання, які впроваджують екологічно безпечні біомеліораційні технології.

Висновки та пропозиції

Біомеліорація є важливим, екологічно безпечним та економічно доцільним підходом до відновлення деградованих ґрунтів. Вона розглядається як комплексний метод, що поєднує біологічні, екологічні та правові аспекти. Її застосування є перспективним напрямом для забезпечення сталого землекористування та підвищення продуктивності агроєкосистем. Біомеліораційні методи поєднують природні процеси відновлення із сучасними науковими підходами, забезпечуючи довготривале збереження ґрунтового потенціалу. В умовах України біомеліорація має стати одним із пріоритетних напря-

мів екологізації сільського господарства, адже саме вона здатна забезпечити баланс між продуктивністю, екологічною безпекою та економічною ефективністю. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку регіонально адаптованих біомеліораційних систем та оцінку довгострокового економічного ефекту від їхнього впровадження..

Список використаної літератури

1. Пасенко А. В., Сакун О. А., Никифорова О. О, Дуднік О. В, Каминіна М. Ю. Біологічна активність ґрунтів при агрохімічній меліорації нетрадиційними добривами. Екологічна безпека. 2016. № 2(22). С. 97-102
2. Волкогон В.В. Біологічна меліорація ґрунтів. Традиційне і нове. Ґрунтова мікробіологія. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2011. Вип. 13. С. 7-22.
3. Самохвалова В. Л. Біологічні методи ремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами. *Біологічні студії*. 2014. Том 8. № 1. С. 217 – 236 DOI: <https://doi.org/10.30970/sbi.0801.337>
4. Fiorentino N., Mori M., Cenvinzo V., Duri L.G., Gioia L., Visconti D., Fagnano M. Assisted phytoremediation for restoring soil fertility in contaminated and degraded land. *Italian Journal of Agronomy*. 2018. Vol. 13. P. 34-44. [https://doi.org/10.1016/S1125-4718\(24\)00265-2](https://doi.org/10.1016/S1125-4718(24)00265-2)
5. Tagliabue F., Marini E., De Bernardi A., Vischetti C., Brunetti G., Casucci C. A Bioremediation and Soil Fertility Study: Effects of Vermiremediation on Soil Contaminated by Chlorpyrifos. *Environments*. 2025. №12 (136). <https://doi.org/10.3390/environments12050136>
6. Sales da Silva I.G., Gomes de Almeida F.C., Padilha da Rocha e Silva N.M., Casazza A.A., Converti A., Asfora Sarubbo L. Soil Bioremediation: *Overview of Technologies and Trends. Energies*. 2020. №13 (4664). <https://doi.org/10.3390/en13184664>
7. Yasir M., Hossain A., Pratap-Singh A. Pesticide Degradation: Impacts on Soil Fertility and Nutrient Cycling. *Environments*. 2025. № 12. (272). <https://doi.org/10.3390/environments12080272>
8. Лісова Т. В., Меліорація земель як захід їх відновлення: сучасні проблеми правового забезпечення. *Право і суспільство*. 2022. № 1. С.104-111. DOI <https://doi.org/10.32842/2078-3736/2022.1.15>
9. Гавриш Н., Позняк С. Правове забезпечення меліорації ґрунтів в Україні. Рациональне природокористування і охорона природи *Наукові записки*. 2024. №1. С. 188-193. DOI:<https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.22>
10. Корсун С.Г., Болоховська В.А., Болоховський В.В., Хоменко Т.О., Борко Ю.П., Дем'янюк О.С., Костина Т.П. Агроекологічне обґрунтування меліоративних чинників для відновлення ґрунтів, порушених воєнними діями. *Agroecological journal*. 2024. № 2. С. 100-112. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305663>
11. Городиська І.М., Кравчук Ю.А. Сидерація – один з чинників збереження родючості ґрунту в органічному землеробстві. Збалансоване природокористування. 2023. № 4. С. 135-144. DOI: [10.33730/2310-4678.4.2023.292740](https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2023.292740).
12. Потапенко Л.В., Горбаченко Н.І. Вплив систем удобрення та мікробних препаратів на формування поживного режиму дерново-підзолистого ґрунту. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2021. Вип. 34. С. 53–60. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.34.53-60>
13. Дацько О.М., Яценко В.М. Сучасні методи ремедіації ґрунтів. Фіторемедіація як ключ до очищення ґрунтів та збереження екосистем. *Аграрні інновації*. 2024. № 25. С.20-24. DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.3>
14. Ataikiru T. Lee-Ann, Ajuzieogu C.A.

Enhanced bioremediation of pesticides contaminated soil using organic (compost) and inorganic (NPK) fertilizers. *Heliyon*. 2023. №9. P. 2-16. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e23133

References

1. Pasenko, A. V., Sakun, O. A., Nykyforova, O. O., Dudnik, O. V., & Kamynina, M. Yu. (2016). Biologichna aktivnist gruntiv pry ahrokhimichnii melioratsii netradytsiynny dobrovamy [Biological activity of soils during agrochemical reclamation with non-traditional fertilizers]. *Ekologichna bezpeka*, 2(22), 97–102.
2. Volkohon, V. V. (2011). Biologichna melioratsiia gruntiv. Tradytiine i nove [Biological reclamation of soils: Traditional and new]. *Gruntova mikrobiolohiia. Silskohospodarska mikrobiolohiia*, 13, 7–22.
3. Samokhvalova, V. L. (2014). Biologichni metody remediiatsii gruntiv, zabrudnennykh vazhkymy metalamy [Biological methods of remediation of soils contaminated with heavy metals]. *Biologichni studii*, 8(1), 217–236. <https://doi.org/10.30970/sbi.0801.337>
4. Fiorentino, N., Mori, M., Cenvinzo, V., Duri, L. G., Gioia, L., Visconti, D., & Fagnano, M. (2018). Assisted phytoremediation for restoring soil fertility in contaminated and degraded land. *Italian Journal of Agronomy*, 13, 34–44. [https://doi.org/10.1016/S1125-4718\(24\)00265-2](https://doi.org/10.1016/S1125-4718(24)00265-2)
5. Tagliabue, F., Marini, E., De Bernardi, A., Vischetti, C., Brunetti, G., & Casucci, C. (2025). A bioremediation and soil fertility study: Effects of vermiremediation on soil contaminated by chlorpyrifos. *Environments*, 12(136). <https://doi.org/10.3390/environments12050136>
6. Sales da Silva, I. G., Gomes de Almeida, F. C., Padilha da Rocha e Silva, N. M., Casazza, A. A., Converti, A., & Asfora Sarubbo, L. (2020). Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies*, 13(4664). <https://doi.org/10.3390/en13184664>
7. Yasir, M., Hossain, A., & Pratap-Singh, A. (2025). Pesticide degradation: Impacts on soil fertility and nutrient cycling. *Environments*, 12(272). <https://doi.org/10.3390/environments12080272>
8. Lisova, T. V. (2022). Melioratsiia zemel yak zakhid yikh vidnovlennia: suchasni problemy pravovoho zabezpechennia [Land reclamation as a measure for their restoration: Current problems of legal regulation]. *Pravo i suspilstvo*, 1, 104–111. <https://doi.org/10.32842/2078-3736/2022.1.15> [in Ukrainian]
9. Havrysh, N., & Pozniak, S. (2024). Pravove zabezpechennia melioratsii gruntiv v Ukraini [Legal support of soil reclamation in Ukraine]. *Ratsionalne pryrodokorystuvannia i okhrona pryrody. Naukovi zapysky*, 1, 188–193. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.22> [in Ukrainian]
10. Korsun, S. H., Bolokhovska, V. A., Bolokhovskiy, V. V., Khomenko, T. O., Borko, Yu. P., Demianuk, O. S., & Kostyna, T. P. (2024). Ahroekologichne obgruntuvannia melioratyvnykh chynnykiv dlia vidnovlennia gruntiv, porushenykh voienynyimi diiamy [Agroecological justification of reclamation factors for the restoration of soils disturbed by warfare]. *Agroecological Journal*, 2, 100–112. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305663> [in Ukrainian]
11. Horodyska, I. M., & Kravchuk, Yu. A. (2023). Syd-eratsiia – ody z chynnykiv zberezhenia rodiuchosti gruntu v orhanichnomu zemlerobstvi [Green manuring as a factor of soil fertility preservation in organic farming]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia*, 4, 135–144. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2023.292740> [in Ukrainian]
12. Potapenko, L. V., & Horbachenko, N. I. (2021). Vplyv system udobrennia ta mikrobnykh preparativ na formuvannia

- pozhyvnoho rezhymu dernovo-pidzolysto-ho gruntu [Influence of fertilization systems and microbial preparations on the formation of the nutrient regime of sod-podzolic soil]. *Silskohospodarska mikrobiolohiia*, 34, 53–60. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.34.53-60> [in Ukrainian]
13. Datsko, O. M., & Yatsenko, V. M. (2024). Suchasni metody remediatsii gruntiv. Fitorem–ediatsiia yak kliuch do ochyshchennia gruntiv ta zberezhennia ekosystem [Modern methods of soil remediation. Phytoremediation as the key to soil purification and ecosystem conservation]. *Ahrarni innovatsii*, 25, 20–24. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.3> [in Ukrainian]
14. Ataikiru, T. L.-A., & Ajuzieogu, C. A. (2023). Enhanced bioremediation of pesticides contaminated soil using organic (compost) and inorganic (NPK) fertilizers. *Heliyon*, 9, e23133. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23133>

Panasniuk O., Kostiuk V.

THE EFFECTIVENESS OF BIO-MELIORATION TECHNOLOGIES IN RESTORING AND IMPROVING THE FERTILITY OF DEGRADED SOILS

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 4'25: 70-81.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2025.04.05>

Abstract. The article addresses the pressing issue of soil degradation and substantiates the necessity of applying biomelioration methods as a key tool for restoring soil fertility. The purpose of the study is to analyze and systematize data on the impact of biomelioration techniques based on fertility indicators of degraded soils. A comprehensive research approach was employed, which included the analysis of scientific publications as well as practical examples of biomelioration methods used to improve the fertility of degraded soils. Fertility is defined as a combination of three main properties: physical, chemical, and biological. The study highlights the influence of biomelioration methods on fertility restoration through the accumulation of organic matter, stimulation of biological activity, and improvement of soil structure. The main biomelioration techniques and their effects have been examined. Phytoremediation is considered as a measure aimed at reducing toxic elements in contaminated soils by cultivating special plants capable of removing or localizing toxic substances within the root zone or aerial parts. The role of organic farming as a biomelioration method has been determined. A schematic model illustrating the mechanism of biomelioration effects on soil fertility is presented, along with recommendations for implementing a complex system of biomelioration practices to effectively restore degraded soils in Ukraine. It is noted that further research should focus on the development of regionally adapted biomelioration systems and the assessment of the long-term economic impact of their implementation.

Keywords: soil degradation, soil fertility, biomelioration, green manures, phytomelioration, phytoremediation, microbial preparations, organic farming.