

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
екобіотехнології та біорізноманіття
Олена КВАСКО
_____ (підпис)

«__» _____ 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему «Мікробіота ґрунту за впливу біочару при вирощуванні
Miscanthus × giganteus»

Спеціальність 162 «Біотехнологія та біоінженерія»

Гарант освітньої програми

Кандидат біологічних наук, доцент,
завідувач кафедри
екобіотехнології та біорізноманіття _____
(підпис)

Олена КВАСКО

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

Доктор сільськогосподарських наук,
доцент, доцент кафедри
екобіотехнології та
біорізноманіття _____
(підпис)

Віра БОРОДАЙ

Виконала _____
(підпис)

Яна ТАРАТУТО

КИЇВ – 2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
екобіотехнології
та біорізноманіття

к.б.н., доцент _____ Олена КВАСКО

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Таратуто Яні Вікторівні

Спеціальність 162 біотехнології та біоінженерія

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи «Мікробіота ґрунту за впливу біочару при вирощування *Miscanthus × giganteus*», затверджена наказом ректора НУБіП України від “23” жовтня 2024 р. №1880 “С”.

Термін подання завершеної роботи на кафедру “15” травня 2025 року.

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: рослини *Miscanthus × giganteus*, мікробіота ґрунту, біочар з деревини, біопрепарат на основі *Azotobacter chroococcum*.

Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Детально ознайомитися із літературними джерелами, що стосуються взаємодії мікробіоти ґрунту, біочару та процесу вирощування *Miscanthus × giganteus*.

2. Дослідити мікробний склад ґрунту з різних ділянок досліджуваного поля, використовуючи селективні поживні середовища для визначення основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів.

3. Провести порівняльний аналіз отриманих статистичних результатів і зробити висновки про вплив досліджуваних чинників на мікробіом ґрунту.

Дата видачі завдання “1” вересня 2024 року

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Віра БОРОДАЙ

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Яна ТАРАТУТО

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	9
1.1 Значення ґрунту для біосистем і дослідження здоров'я ґрунту	9
1.2. Біочар: властивості, екологічний вплив і застосування в агросфері	20
1.3. Вирощування <i>Miscanthus × giganteus</i> і його вплив на ґрунт	24
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	28
2.1 Характеристика матеріалів та умов досліджень	28
2.2 Приготування селективних живильних середовищ для визначення еколого-трофічних груп мікроорганізмів	31
2.3 Отримання ґрунтової суспензії для аналізу методом серійних розведень	34
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	39
3.1 Вплив досліджуваних препаратів на динаміку мікроміцетів та загальну кількість мікроорганізмів у ґрунті	39
3.2 Розвиток амоніфікаторів, нітрифікуючих і азотфіксуючих бактерій за дії досліджуваних біопрепаратів	42
3.3 Розвиток педотрофної мікробіоти при вирощуванні міскантусу за впливу препаратів	44
ВИСНОВКИ	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної дипломної роботи: «Мікробіота ґрунту за впливу біочару при вирощування *Miscanthus × giganteus*»

Дипломна робота виконана на 50 сторінках, містить 16 рисунків, 10 графіків, 46 використаних джерел

Робота складається з переліку скорочень, вступу, огляду літератури, матеріалів і методів дослідження, результатів дослідження, висновків та списку використаних джерел.

Ключові слова: мікробіота ґрунту, *Miscanthus × giganteus*, біочар, здоров'я ґрунту.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

M×G – *Miscanthus* × *giganteus*

КГА - картопляно-глюкозний агар

КАА – крохмаль-аміачний агар

ГА – ґрунтовий агар з витяжки (середовище Звягінцева)

ВСТУП

Тема даної кваліфікаційної роботи обрана на підставі наукового інтересу до дослідження впливу біопрепаратів на мікробіом ґрунту, зокрема на його еколого-трофічну структуру. Використання біочару в якості біопрепарату розглядається як стратегія, що інтегрує вирішення кількох актуальних завдань: утилізація органічних відходів, поліпшення фізичних, хімічних та біологічних властивостей ґрунтів, санація середовища від певних категорій забруднювачів, а також поповнення ґрунтового покриву доступними формами карбону та кисню. Паралельно досліджується роль культивування *Miscanthus × giganteus*, який демонструє високий біоенергетичний потенціал та здатен покращувати структурний стан ґрунту завдяки особливостям своєї кореневої системи.

В умовах невиправного зростання світового населення, посилення впливу несприятливих факторів, спричинених змінами клімату, та глобалізації процесів деградації ґрунтових ресурсів, що фіксуються майже на всіх континентах, забезпечення продовольчої безпеки та доступу до інших базових ресурсів стає одним із головних викликів для людства. Масштабні екологічні катастрофи, інтенсивний антропогенний вплив, включаючи традиційні та часто консервативні методи ведення активного сільського господарства, призводять до прогресуючого виснаження та деградації ґрунтів. Наслідками цього є порушення стабільності як природних біогеоценозів, так і значне зниження продуктивності сільсько-господарських та індустріальних угідь, що в кінцевому підсумку негативно позначається на добробуті населення. Деградація проявляється у втраті органічної речовини, погіршенні структурного стану, ерозії, засоленні та забрудненні.

Реабілітація та відновлення безцінних ґрунтових ресурсів вимагає розробки та впровадження науково обґрунтованих підходів. До ефективних методів належать систематичний моніторинг стану біотичної компоненти ґрунту, зокрема його мікробіому як ключового індикатора здоров'я екосистеми, а також цілеспрямоване застосування біопрепаратів та культивування специфічних видів рослин. Окремі рослинні види не обмежуються використанням ґрунту як джерела живлення та субстрату для росту, але й активно взаємодіють з ґрунтовим

біоценозом, формуючи симбіотичні або асоціативні зв'язки, що сприяють взаємному процвітанню. Дослідження ролі *Miscanthus × giganteus*, біочару та їхнього комплексного впливу на мікробіом ґрунту вже є усталеним напрямком в міжнародній науковій спільноті, і інтерес до нього більшою мірою не знижується. Отже, дослідження впливу як біоенергетичної культури *Miscanthus*, так і біочару в різних концентраціях на комплексну зміну фізико-хімічних і біологічних властивостей ґрунту є особливо актуальним. Для контексту України, де питання оптимізації сільськогосподарського господарства та розвитку альтернативної енергетики набули особливого значення в умовах воєнних дій, подібні дослідження мають як теоретичну, так і важливу практичну цінність. Разом з тим, гостро постає необхідність подальшого дослідження потенціалу досліджуваних об'єктів у процесах детоксикації та очищення ґрунтових ресурсів від різноманітних забруднювачів, накопичення яких є одним із гострих питань у контексті активних воєнних дій.

Основною метою даної кваліфікаційної роботи є науковий аналіз впливу культивування *Miscanthus × giganteus* за одночасного внесення біопрепаратів на структурну організацію та біорізноманіття мікробного угруповання досліджуваної ґрунтової ділянки. Реалізація поставленої мети дозволить отримати об'єктивні дані для визначення найбільш ефективної з досліджуваних комбінацій з погляду її доброякісного впливу на стан мікробіому та, як наслідок, на загальне екологічне здоров'я і продуктивність ґрунтового покриву.

Об'єктом дослідження в рамках даної роботи виступає мікробіота ґрунту, відібраного на експериментальних ділянках. Предметом дослідження є кількість життєздатних колоній загальної чисельності мікроорганізмів, а також кількісні та якісні зміни в складі їх окремих еколого-трофічних груп, що відбуваються під впливом одночасного вирощування *Miscanthus × giganteus* та застосування біочару. Оцінка чисельності та складу буде проводитись методом посіву та обліку життєздатних колоній мікроорганізмів на відповідних твердих живильних середовищах, що є стандартним мікробіологічним методом для кількісної оцінки.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Значення ґрунту для біосистем і дослідження здоров'я ґрунту

Ґрунт як фундаментальний природний ресурс виступає не лише фізичною основою для наземних екосистем, але й критично важливим елементом, що підтримує екологічну рівновагу, забезпечує продуктивність сільського господарства та є невід'ємною складовою глобальної продовольчої безпеки [12]. Водночас, посилення антропогенного тиску, спричиненого інтенсивною індустріалізацією, розширенням міських територій та еволюцією аграрних технологій, створює суттєві загрози для здоров'я ґрунтового покриву. Ці процеси призводять до широкомасштабної деградації, акумуляції різноманітних забруднювачів та прогресуючої втрати біорізноманіття у ґрунтових екосистемах [12]. Наслідки таких деструктивних явищ виходять за рамки простого зниження кількісних та якісних показників врожаю; вони генерують серйозні виклики для забезпечення стабільності продовольчих систем на планетарному рівні та ставлять під загрозу довгострокову екологічну стійкість нашого довкілля [12].

У відповідь на усвідомлення цих зростаючих проблем та викликів, міжнародна спільнота та національні урядові інституції дедалі активніше визнають першочергову важливість застосування проактивних стратегій управління станом ґрунтових ресурсів [12]. Це підвищення уваги та рівня обізнаності стало каталізатором для становлення та динамічного розвитку багатогранної науково-практичної галузі – здоров'я ґрунту. Ця галузь інтегрує знання та підходи з різноманітних сфер, включаючи оптимізацію режимів живлення рослин через ґрунт, методи рекультивації та відновлення деградованих земель, технології дезінфекції ґрунту, дослідження ґрунтової екології та комплексні системи управління ґрунтовими ресурсами [12]. Провідною метою цієї дисципліни є розробка та ефективне використання інноваційних технологій та передових практик, спрямованих на відновлення функціональності та довготривале збереження потенціалу наших ґрунтів [12].

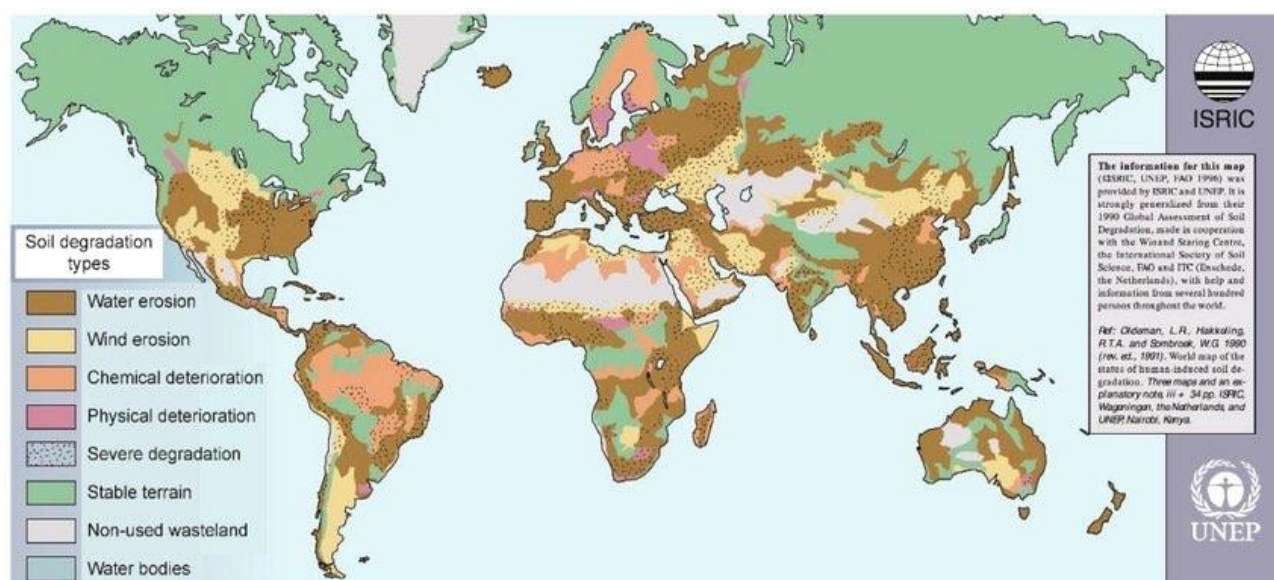


Рис. 1.1 Карта деградації ґрунтів, що виникла внаслідок антропогенних чинників (Міжнародний ґрунтовий реферативний і інформаційний центр, 2017).

Коричневим кольором позначена водна ерозія, жовтим – вітряна ерозія, помаранчевим – хімічне забруднення ґрунтів, рожевим – фізичне руйнування (дисперсія частинок ґрунту, ущільнення пор, збільшення щільності тощо), зеленим - стабільні ґрунти, сірим – невикористані землі, чорними точками вказуються райони з особливо посиленою деградацією. [10 с. 66 рис. 1]

Концептуальне розуміння здоров'я ґрунту сягає значно далі за його традиційну роль як середовища для росту рослин. Воно охоплює здатність ґрунтової системи функціонувати як цілісний живий організм, що забезпечує не лише біологічну продуктивність, але й підтримує високу якість навколишнього середовища та, зрештою, сприяє благополуччю людини [15]. Здоров'я ґрунту перебуває у тісному зв'язку зі складними взаємодіями, що відбуваються на межі рослинного покриву та ґрунтового середовища, формуючи таким чином фундаментальну основу для підтримки функціональності та стійкості екосистем [15]. На противагу цьому, негативні впливи на стан ґрунту, включаючи присутність різноманітних забруднювачів та його фізичну втрату внаслідок ерозії, є серйозними проблемами, що вимагають негайного та цілеспрямованого вирішення, особливо в контексті країн, що розвиваються [15].

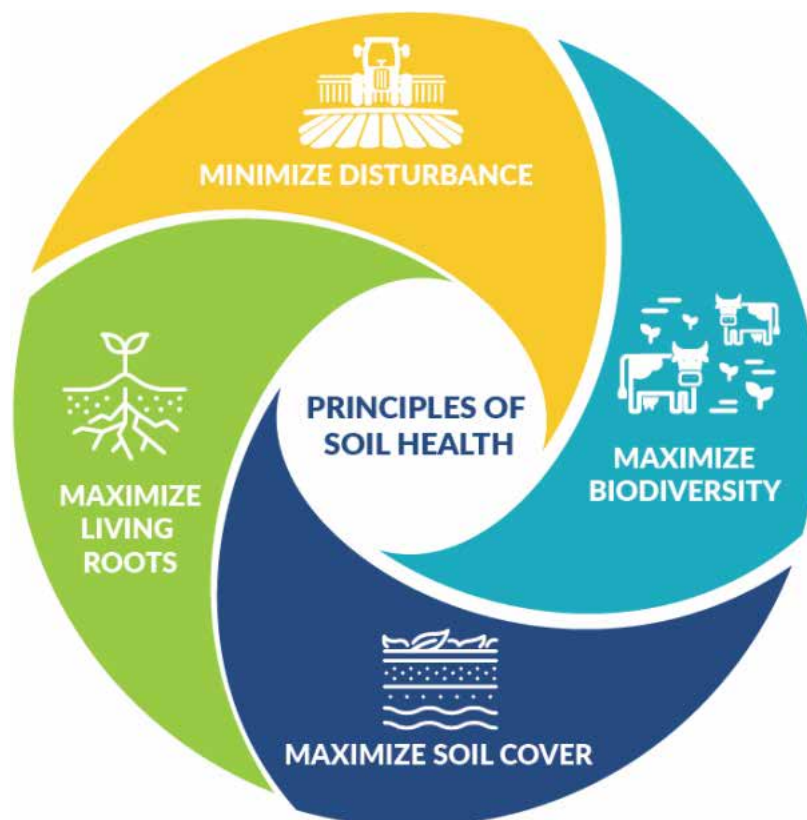


Рис 1.2 Основні принципи здоров'я ґрунту за визначенням Міністерства сільськогосподарства США [2]

Здоров'я ґрунту є інтегральним поняттям, яке синтезує сукупність його фізичних, хімічних, біологічних та гідрологічних характеристик [5]. Ці внутрішньо властиві атрибути ґрунту перебувають у постійній та складній взаємодії, що забезпечує підтримку високої продуктивності як сільськогосподарських угідь, так і природних екосистем [5]. Фундаментальною основою для формування цих характеристик є тип підстилаючих материнських порід та ступінь їхньої трансформації під впливом процесів вивітрювання [5]. Фізичні характеристики охоплюють такі показники, як структура ґрунту, його текстурний склад, загальна пористість, об'ємна щільність та здатність до утримання вологи. Здоровий ґрунт, як правило, має добре розвинену структуру, що забезпечує оптимальні умови для аерації, ефективної інфільтрації води та безперешкодного проникнення корневих систем рослин [5]. Хімічний аспект здоров'я ґрунту стосується доступності для рослин основних поживних елементів – як макроелементів (азот, фосфор, калій), так і мікроелементів; він також включає показники активної кислотності (pH),

рівень солоності, вміст органічної речовини та відсутність токсичних забруднювачів. [5] Хімічно здоровий ґрунт характеризується збалансованим забезпеченням рослин усіма необхідними елементами живлення для їх оптимального росту та розвитку [5]. Біологічні характеристики відображають різноманітність та активність спільнот живих організмів, що населяють ґрунт, включаючи численні види бактерій, грибів, найпростіших, нематод та дощових черв'яків. Ці едафічні організми виконують ключові функції у процесах трансформації органічної речовини, кругообігу біогенних елементів, пригніченні збудників хвороб рослин та формуванні агрегатної структури ґрунту [5]. Гідрологічні характеристики визначають особливості руху води в межах ґрунтового профілю та здатність ґрунту акумулювати вологу. Здоровий ґрунт сприяє ефективному проникненню та дренажу води, забезпечуючи її доступність для коренів рослин і одночасно мінімізуючи поверхневий стік та ризик ерозії [5].

Важливість підтримки належного стану ґрунтового покриву проявляється на багатьох рівнях, чинячи значний вплив на стан довкілля, добробут людського суспільства та продуктивність агроценозів. Здорові ґрунти є інтегральним та незамінним компонентом функціональних екосистем. Вони відіграють життєво важливу роль у забезпеченні високої якості водних ресурсів, функціонуючи як природні фільтри, що очищають воду, яка проходить крізь ґрунтовий профіль, тим самим зменшуючи забруднення підземних та поверхневих водних джерел [1]. Крім того, ґрунти є одним із найбільших наземних депо вуглецю, і здорові ґрунтові системи здатні активно поглинати атмосферний вуглекислий газ, що має критичне значення для пом'якшення наслідків глобальних кліматичних змін [1]. Застосування аграрних практик, що допомагають збільшити кількість органічної речовини в ґрунті, таких як технології мінімального або нульового обробітку та вирощування покривних культур, може значно підвищити потенціал ґрунту до секвестрації вуглецю.[8] Підтримання здоров'я ґрунту також є ключовим фактором для збереження біорізноманіття, оскільки здорові ґрунти населяє надзвичайно широкий та різноманітний спектр мікроорганізмів, безхребетних та кореневих систем рослин, що становить основу загального біологічного багатства екосистем

[18]. Деградація ґрунту, навпаки, призводить до збіднення цього біорізноманіття, що негативно позначається на виконанні екосистемних функцій. Ґрунтові мікроорганізми є необхідними для ефективного розкладання органічних залишків та вивільнення поживних елементів у формах, доступних для рослин, забезпечуючи таким чином функціонування найважливіших біогеохімічних циклів, зокрема циклів азоту та фосфору [15]. Наявність різноманітного та активного ґрунтового мікробіому також сприяє природному придушенню збудників ґрунтових хвороб рослин через механізми конкуренції, антагонізму та продукування специфічних біологічно активних сполук [38].

Взаємозв'язок між станом ґрунтового покриву та здоров'ям людини є глибоким та багатоаспектним [1]. Здорові ґрунти, що характеризуються оптимальним вмістом необхідних поживних речовин, є передумовою для отримання сільськогосподарської продукції з високою нутритивною цінністю. [1] Водночас, вирощування культур на деградованих ґрунтах може призводити до зниження вмісту есенційних мінералів та вітамінів у харчових продуктах, що потенційно може сприяти розвитку дефіциту мікроелементів у людських популяціях. [1] Нездорові ґрунти можуть також виступати резервуарами для шкідливих патогенних мікроорганізмів та токсичних забруднювачів, збільшуючи ризик їх впливу на людину через прямий контакт, споживання контамінованих харчових продуктів чи води, або інгаляцію ґрунтового пилу. [1] Надмірне використання агрохімікатів може спричинити накопичення їхніх токсичних залишків у ґрунтах та харчовому ланцюзі. Деградація ґрунту, особливо внаслідок вітрової ерозії, може посилювати інтенсивність пилових бур, що негативно впливає на якість атмосферного повітря та стан дихальної системи населення. [1] Погіршення фільтраційної здатності ґрунту підвищує ризик забруднення водних джерел та поширення захворювань, що передаються через воду. [1] Ряд досліджень підкреслюють критичний взаємозв'язок між станом здоров'я ґрунтів та здоров'ям людей, наголошуючи на необхідності застосування інтегрованих підходів до охорони здоров'я, що враховують екологічний аспект [24; 35].

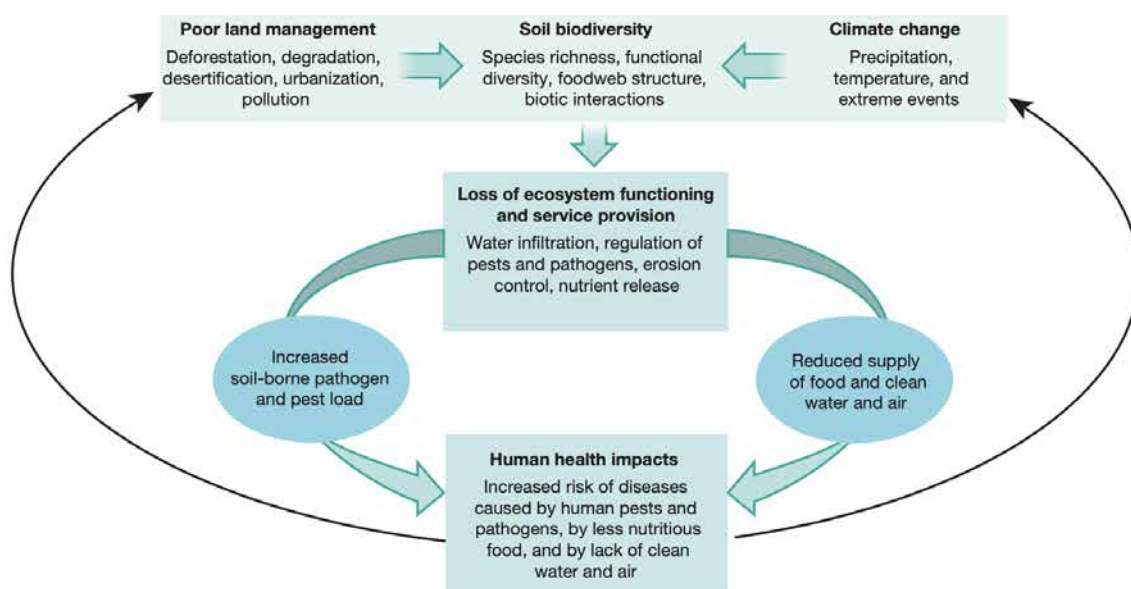


Рис 1.4 Схематична демонстрація взаємозв'язку здоров'я ґрунтів та здоров'я населення Землі із зазначеними чинниками, такими як зміни клімату та нераціональне сільське господарство, що негативно впливають на обидва, а також проміжними наслідками. [35 с. 1 рис. 1]

Для сектору сільського господарства, здоров'я ґрунтового покриву є наріжним каменем формування стійких та високопродуктивних агросистем [15; 18]. Ґрунти з оптимальними фізичними, хімічними та біологічними характеристиками забезпечують ідеальні умови для росту та розвитку рослин, що безпосередньо веде до підвищення показників врожайності та її стабільності [15]. Здорові ґрунти, завдяки активності їхніх мікробних спільнот, суттєво покращують доступність та ефективність засвоєння рослинами необхідних поживних елементів, що дозволяє оптимізувати або зменшити застосування синтетичних добрив. [1] Ґрунти з добре розвиненою структурою та високим вмістом органічної речовини демонструють вищу здатність утримувати вологу, що робить культури більш стійкими до посушливих періодів та знижує потребу у додатковому зрошенні. [1] Загалом, більш здорові ґрунти є більш родючими та стійкими до зовнішніх впливів, що зменшує залежність аграрних виробників від використання синтетичних засобів виробництва, сприяючи переходу до більш сталого та екологічно безпечного ведення сільського господарства [12]. Здорові ґрунти також виявляють підвищену

адаптивність до негативних проявів зміни клімату, таких як екстремальні погодні явища (посухи, надмірні опади) та зростання температур, завдяки покращеній інфільтрації, здатності утримувати вологу та загальній структурній стабільності. [1] Системні інвестиції у відновлення та підтримання здоров'я ґрунту є ключовим фактором для забезпечення довгострокової продуктивності та стійкості аграрного сектору, гарантуючи продовольчу безпеку для майбутніх поколінь [12].

Вирішення комплексних проблем, пов'язаних із деградацією та погіршенням здоров'я ґрунтового покриву, вимагає реалізації багатогранного підходу, який поєднує в собі впровадження принципів сталого управління земельними ресурсами, активне використання технологічних інновацій, розробку та імплементацію відповідних політичних рішень, а також підвищення рівня обізнаності громадськості щодо важливості цієї проблеми [12; 15]. Серед ключових сталих сільськогосподарських практик, спрямованих на покращення та збереження здоров'я ґрунту, виділяють методи збереження ґрунтової структури, такі як мінімальний або нульовий обробіток, що мінімізує механічне порушення ґрунту, сприяє збереженню його агрегатного стану, підвищує вміст органічної речовини та знижує ризик ерозії. [1] Застосування покривних культур у період між збиранням основної культури та посівом наступної допомагає захистити поверхню ґрунту від ерозії, пригнічує ріст бур'янів, покращує фізичні властивості ґрунту та збагачує його органічною речовиною після заорювання або мульчування. [1] Науково обґрунтована сівозміна, що передбачає чергування різних видів культур, позитивно впливає на родючість ґрунту, перериває цикли розвитку специфічних шкідників та хвороб і сприяє покращенню його структурного стану [1]. Інтегроване управління поживними речовинами, що оптимізує внесення добрив шляхом комбінування органічних та мінеральних джерел на основі точного аналізу ґрунту та діагностики потреб рослин, підвищує ефективність використання ресурсів та мінімізує негативний вплив на довкілля [1]. Інтеграція деревних та чагарникових рослин в аграрні системи (агролісівництво) сприяє покращенню здоров'я ґрунту через збільшення надходження органічних залишків, підвищення інфільтрації води та зниження ерозійних процесів [1]. Перехід до органічних методів господарювання,

що передбачає відмову від використання синтетичних добрив та пестицидів і зосередження на природних процесах формування родючості ґрунту, є важливим напрямком до досягнення більш сталого та екологічно чистого сільськогосподарського виробництва [12].

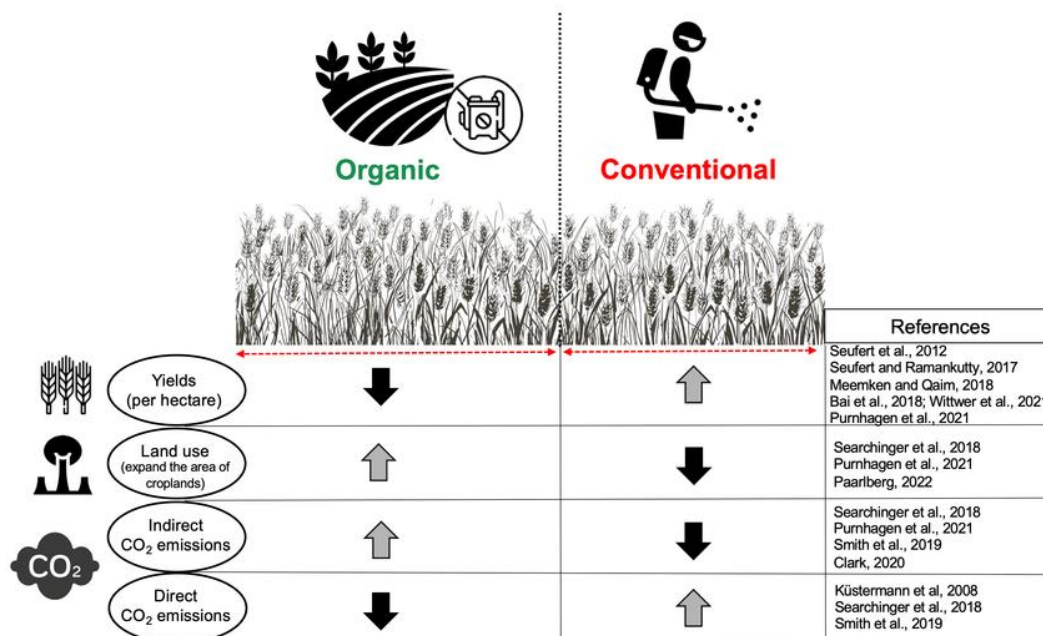


Рис 1.4 Порівняння органічного та консервативного землеробства щодо розмірів посіву, використання земельних ресурсів та виділення CO₂ [6 с. 2 рис. 1].

Впровадження технологічних інновацій відіграє значну роль у сучасному управлінні здоров'ям ґрунту. Одним із таких напрямків є точне землеробство, що використовує сучасні технології, такі як системи GPS, різноманітні датчики та інструменти для аналізу великих даних, з метою оптимізації розподілу ресурсів (добрив, води, засобів захисту рослин) відповідно до специфічних умов окремих ділянок поля. Це дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів та зменшити негативний вплив на довкілля [12]. Застосування біодобрив та біопестицидів, що ґрунтується на використанні корисних мікроорганізмів для підвищення доступності елементів живлення та контролю шкідників і хвороб, є ефективним засобом зменшення залежності від синтетичних агрохімікатів [1]. Інкorporація біовугілля – вуглецевмісного матеріалу, що утворюється при піролізі біомаси – в ґрунт може суттєво покращити його фізичні властивості, зокрема структуру та водоутримуючу здатність, підвищити доступність поживних речовин та сприяти довгостроковій секвестрації вуглецю [1].

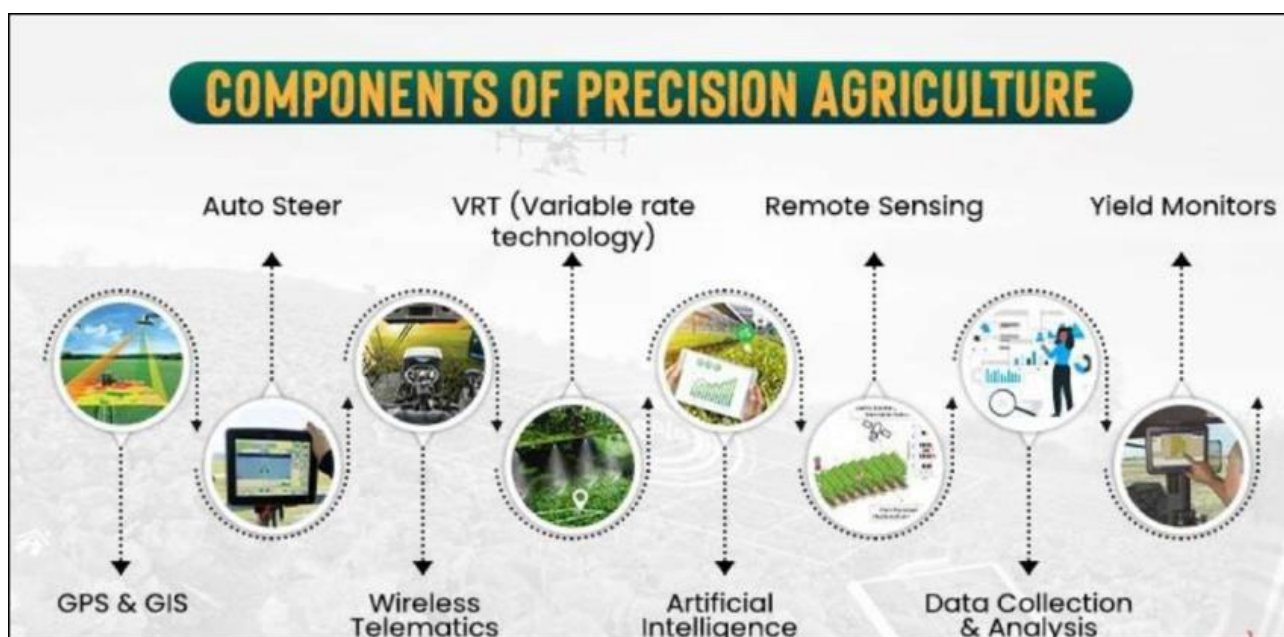
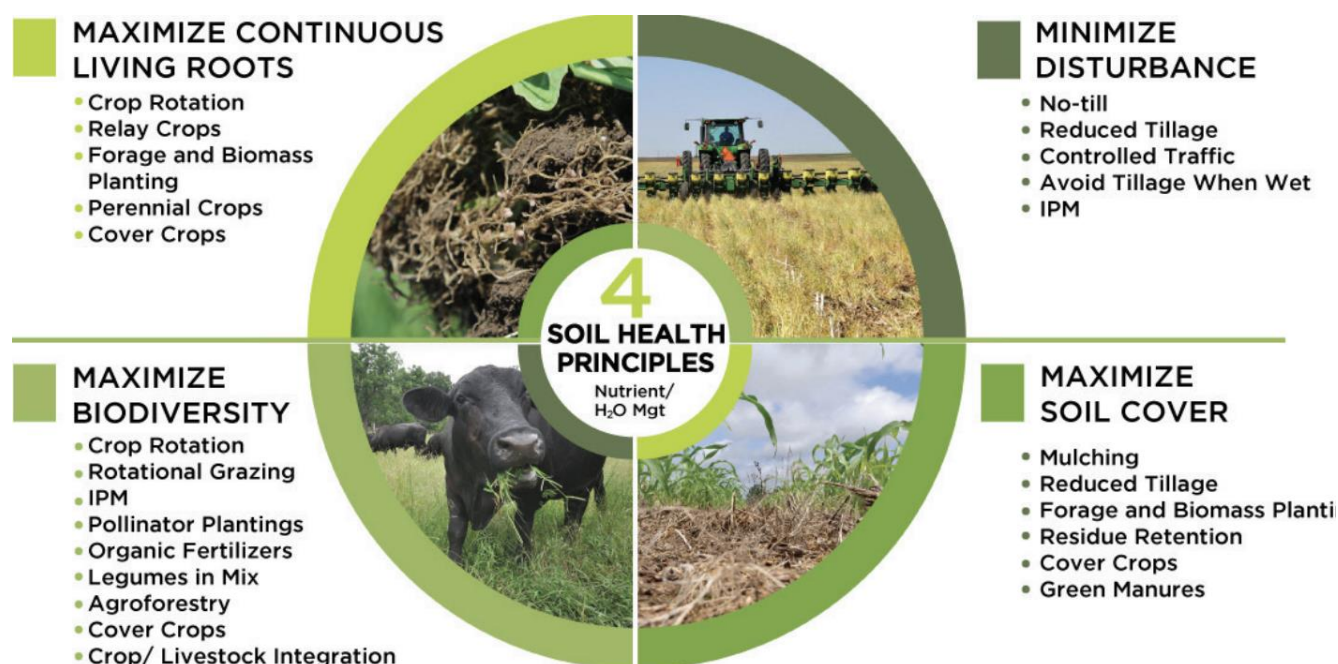


Рис 1.5 Складові точного землеробства [29 с. 54 рис. 1]

На тлі зростаючого глобального інтересу до проблематики стану ґрунтових ресурсів, активно формується та розширюється спеціалізована індустрія здоров'я ґрунту. Ця галузь відіграє дедалі важливішу роль у вирішенні проблем деградації ґрунту та просуванні принципів його сталого менеджменту [12]. Спектр діяльності цієї індустрії є досить широким і охоплює розробку, виробництво та дистрибуцію різноманітних продуктів, спрямованих на покращення властивостей ґрунту, включаючи ґрунтові поліпшувачі, біодобрива та біопестициди. Крім того, вона надає послуги з комплексного аналізу ґрунту та розробляє технологічні рішення, зокрема для точного землеробства та рекультивації забруднених земель [12]. Орієнтація цієї галузі на постійні інновації та технологічний прогрес є вирішальною для забезпечення сільськогосподарських виробників та інших землекористувачів сучасними інструментами, ефективними продуктами та необхідними знаннями, що дозволяють результативно покращувати та підтримувати здоров'я ґрунтового покриву [12].

Ґрунт є надзвичайно гетерогенною субстанцією, і складається з безлічі компонентів – різноманітних форм азоту, органічної речовини, гумусу, води, залишки гірських порід, сліди життєдіяльності представників флори та фауни, а також безліч груп мікроорганізмів. [44] В залежності від погодних та кліматичних

умов, а також відсоткового співвідношення маси складників ґрунту та особливостей його фізико-хімічного складу можна визначити його родючість, що в ґрунтознавстві визначається як здатність створювати оптимальне середовище для



найбільш продуктивного росту і розвитку рослин. [44].

Рис 1.6 Методи забезпечення основних чотирьох принципів здоров'я ґрунту, що вже продемонстрували ефективність у використанні в сільському господарстві за даними Міністерства Сільського Господарства США [33 с. 5]

Власне мікроорганізми, на думку багатьох вчених (зокрема ґрунтознавців Докучаєва В.В., Виноградського С.М., природознавця В.І. Вернадського та інших), є першими ґрунтотворцями на планеті Земля, і без них не відбувались би біохімічні реакції перетворення, біодеструкції, синтезу органічних речовин тощо. [39]. Морріс та Блеквуд у 2015 надали вичерпний огляд екологічних рушійних сил, що структурують ґрунтові біотичні спільноти, та вплив цих спільнот на функціонування екосистеми.[25, 39] Різноманітність ґрунтових мікробів, включаючи бактерії, гриби, археї та протисти, регулюється низкою факторів, таких як модулятори навколишнього середовища (рН, температура, вологість тощо), конкуренція за ресурси та стратегії розселення. Важливо, що мікробні спільноти не є статичними; вони змінюються з часом у відповідь на порушення, сукцесію та історичні випадковості.[25; Структура цих спільнот безпосередньо впливає на

ключові екологічні процеси, такі як розкладання органічної речовини, кругообіг вуглецю та азоту, а також доступність поживних речовин. [25] Морріс та Блеквуд підкреслюють, що ґрунтові мікроорганізми формуються та активно змінюються навколишнім середовищем, посилюючи їхню подвійну роль як регуляторів та індикаторів екосистеми. [25] Тому інтеграція мікробної екології в ширші екологічні та екологічні рамки є важливою для розробки практик сталого управління земельними ресурсами та прогнозування реакції екосистем на зміну клімату. [25]

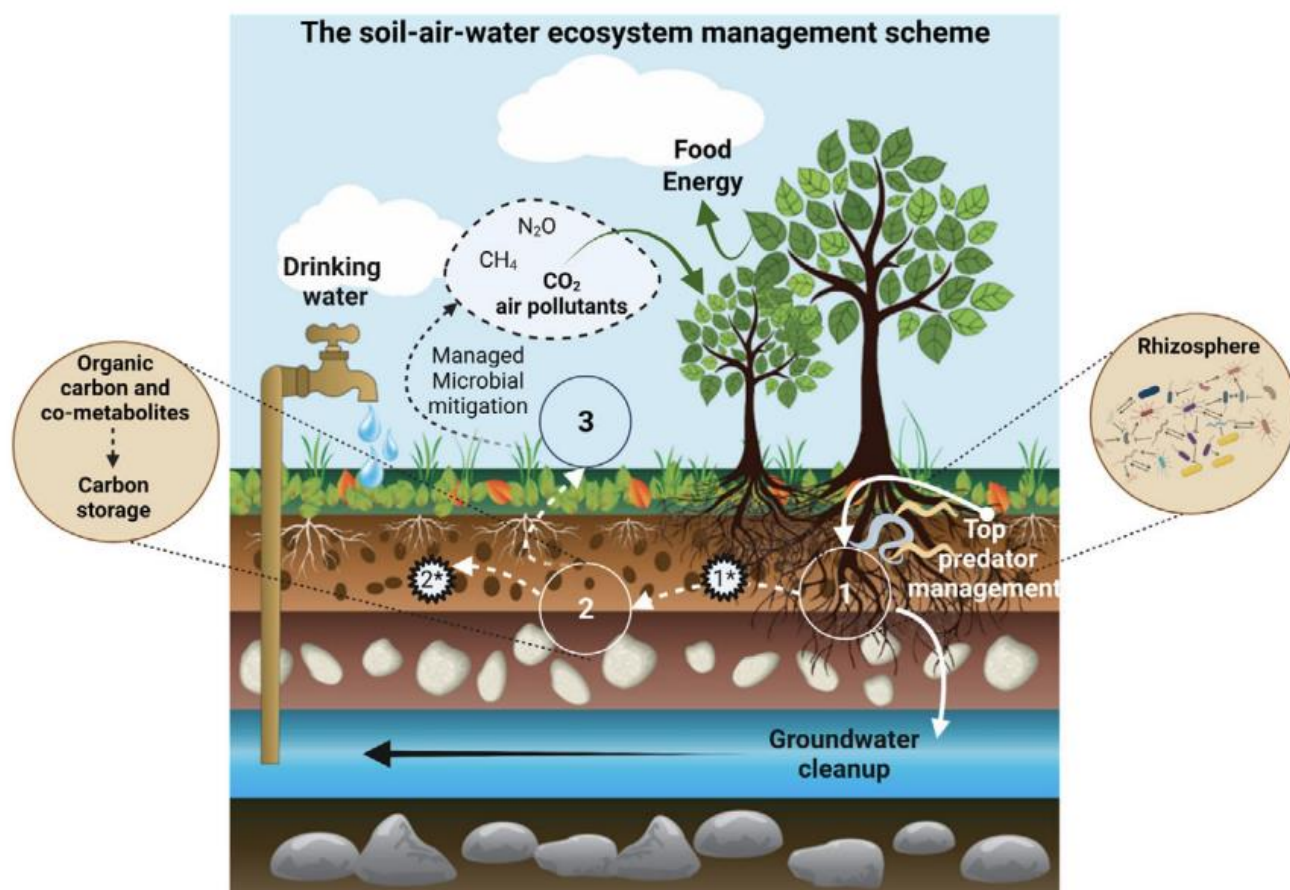


Рис 1.7 Спільноти ґрунтових мікробів лежать в основі ключових екосистемних послуг для цілей сталого розвитку: (1) Взаємодія ризосфери, керована за допомогою управління хижаками, сприяє зростанню рослин для виробництва їжі, корму, енергії та ґрунтових вод. (2) Накопичення рослинної (1*) і мікробної (2*) біомаси в екосистемах, таких як пасовища, сприяє утворенню некромаси та накопиченню вуглецю. (3) Цілеспрямоване управління мікробами може зменшити концентрацію парникових газів в атмосфері (CO_2 , CH_4 , N_2O) та інших забруднюючих речовин [34 с. 11 рис. 5]

1.2. Біочар: властивості, екологічний вплив і застосування в агросфері



Рис 1.8 Зразок гранульованого біочару [27]

Біочар – це вуглецевий продукт, що утворюється шляхом термічного розкладу (піролізу) біомаси за умов обмеженого доступу кисню (або його відсутності). Завдяки винятковим фізико-хімічним характеристикам, серед яких висока питома поверхня, значна пористість та здатність до катіонного обміну, цей матеріал виступає універсальним інструментом для підвищення ґрунтової якості та зменшення негативного впливу сільського господарства на довкілля [13; 17].

Однією з ключових функцій біовугілля є покращення агрохімічних властивостей ґрунтів. Біочар підвищує доступність основних елементів живлення, зокрема азоту, фосфору та калію, які є критично важливими для розвитку рослин [19; 17]. Висока катіонообмінна ємність біовугілля дає змогу затримувати поживні елементи у ґрунтовому профілі, запобігаючи їх втратам і забезпечуючи їхню доступність для кореневих систем [17]. Згідно з інформацією зі статті Khan і колег, функціональні групи на поверхні біочару, такі як карбоксильні та гідроксильні, відповідають за його сорбційні властивості, які змінюються залежно від умов піролізу та типу вихідної біомаси. [17] Kozioł із співавт. також відзначають, що біовугілля виконує комплексну функцію, сприяючи поліпшенню властивостей ґрунтів для сільського та садового господарства.[19] Його вплив на рівень рН ґрунту є ще одним чинником, що визначає зростання доступності поживних

речовин. Наприклад, при внесенні біочару спостерігається зсув ґрунтового рН у бік нейтрального, що сприяє мобілізації фосфору — одного з основних елементів для розвитку рослин [19]. Це особливо актуально для кислих ґрунтів, де фосфор часто знаходиться у недоступній формі. Додатково, мікропориста структура біовугілля слугує середовищем для колонізації корисної мікробіоти, яка бере участь у кругообігу поживних речовин і сприяє росту рослин [11]. Як наслідок, спостерігається істотне зростання урожайності сільськогосподарських культур після внесення біочару. Khan із колегами в статті у 2024 році підтвердили це значним покращенням продуктивності в порівнянні з необробленими контрольними ділянками. [17]

Застосування біовугілля також сприяє покращенню фізичної структури ґрунту, шляхом зростання пористості та зниження об'ємної щільності. Такі зміни забезпечують кращу аерацію та інфільтрацію, що має вирішальне значення для здоров'я корневих систем [36]. За даними з публікації Kabir et al. за 2023 рік, біочар істотно підвищує вологоутримуючу здатність ґрунтів, що є перевагою для регіонів із частими посухами, що стають все масштабнішими внаслідок змін клімату.[13] Мікропориста структура біовугілля збільшує кількість пор, полегшуючи накопичення і збереження вологи [36]. Це сприяє зниженню стресових реакцій рослин під час водного дефіциту, адже забезпечує постійне зволоження [13]. Додатково, зниження щільності ґрунту сприяє покращенню газообміну, що необхідно для дихання коренів. Дослідження Kozioł і колег продемонстрували, що внесення біочару змінює щільність ґрунту, покращуючи його структуру.[19] Це зміцнення структури ґрунту внаслідок використання біовугілля також запобігає його ерозії: у досліді Li et al. 2020 року зразки лесових ґрунтів, до яких було внесено біочар, продемонстрували менші втрати від поверхневого стоку води в порівнянні з контролем в умовах імітації опадів.[21]

Біовугілля виступає ефективним засобом довгострокового зберігання вуглецю в екосистемах: після внесення до ґрунту воно фіксує вуглець, знижуючи загальні викиди парникових газів і, таким чином, стримуючи кліматичні зміни [13]. Його стабільність у ґрунті дозволяє зберігати органічний вуглець протягом

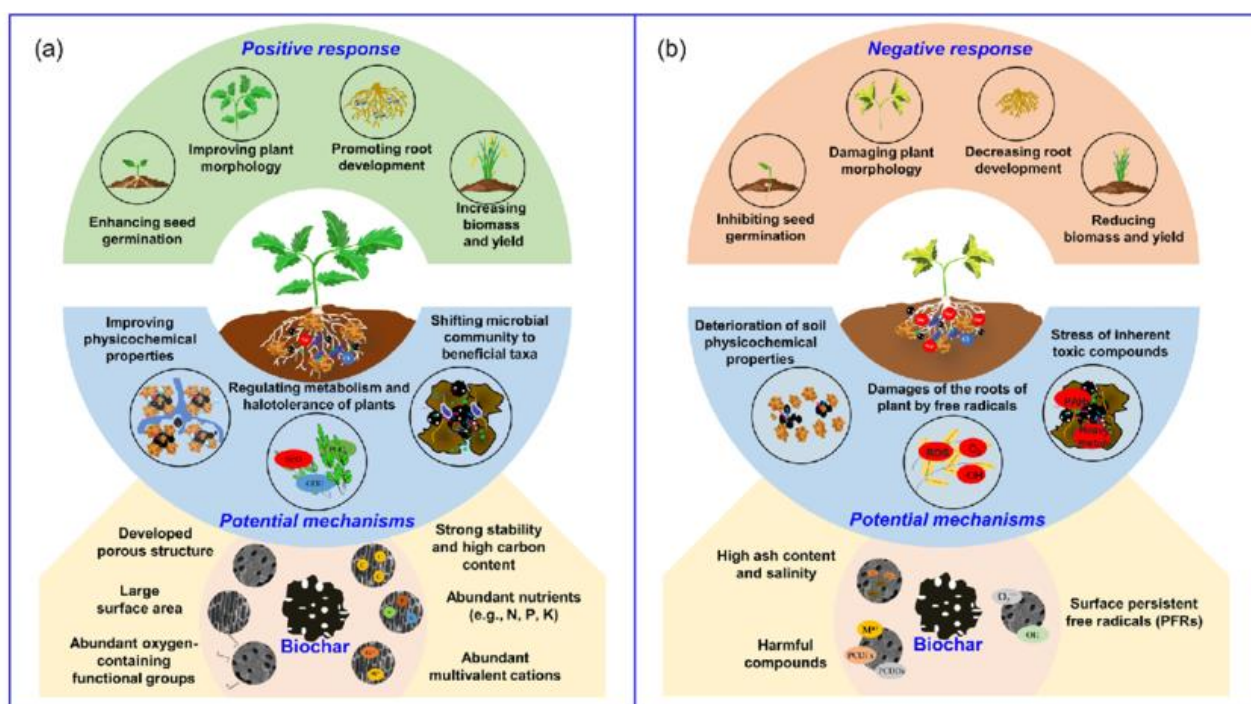
тривалих періодів. На відміну від свіжої органіки, яка швидко мінералізується, біовугілля майже не піддається мікробному розкладу, що зумовлено його стійкою молекулярною структурою [13]. Таким чином, процес піролізу біомаси та подальше внесення біовугілля до ґрунту запобігає вивільненню вуглецю у вигляді CO_2 . Як показали численні дослідження, здатність біовугілля до зв'язування вуглецю значною мірою залежить від типу вихідної сировини, температурного режиму виробництва та дози внесення [37].

Біовугілля виступає ефективним адсорбентом для нейтралізації шкідливих речовин у ґрунтах і водному середовищі. Його структурні характеристики сприяють затримці різноманітних забруднювачів, таких як важкі метали та органічні токсиканти, що зменшує їх біодоступність і токсичний вплив [11; 13]. В огляді Brtnicky et al. було проаналізовано як можливі негативні наслідки, так і позитивні ефекти біовугілля щодо ґрунтового середовища.[8] Основні механізми сорбції включають хімічну взаємодію із функціональними групами (карбок-сильними, фенольними тощо) та фізичне поглинання на великій поверхні [17]. Це дозволяє ефективно знижувати мобільність токсикантів і, відповідно, їх вплив на довкілля та людину. Біовугілля показало високу ефективність у зв'язуванні таких шкідливих елементів, як свинець, кадмій, миш'як, а також стійких органічних сполук, зокрема ПАВ і пестицидів [11; 13]. Рівень ефективності залежить від властивостей як самого біовугілля, так і характеру забруднення, однак його використання вважається доступним та екологічно прийнятним рішенням. Окрім прямої детоксикації, біовугілля також здатне посилювати біоремедіаційні процеси, покращуючи умови для мікробного розкладу органічних забруднювачів [11].

Вплив біовугілля на мікроорганізми ґрунту є багатограним. Його внесення може змінювати видовий склад мікробного угруповання та сприяти зростанню мікробної біомаси [11; 30]. Ефекти обумовлені фізико-хімічними характеристиками біовугілля: структурою пор, поверхневою активністю, рН тощо [11]. Дослідження Lehmann et al. вказують на потенціал біовугілля у регуляції мікробної активності в ґрунті.[20] Біовугілля створює мікросередовище, що захищає мікроорганізми від екологічного стресу та забезпечує нові ніші для

колонізації [11]. Його поверхня виступає платформою для прикріплення і розвитку мікробів, а зміни рН можуть сприяти домінуванню певних груп, наприклад, бактерій або актиноміцетів, пригнічуючи при цьому гриби [20]. Водночас біовугілля може зв'язувати певні поживні речовини, зменшуючи їх доступність для мікробів, що може як стимулювати, так і гальмувати окремі метаболічні процеси [20].

Втім, через зольну природу та інші особливі характеристики біочару спостерігаються і негативні ефекти, зокрема на вражених сольовими сполуками ґрунтах після застосування біовугілля спостерігалось гірше проростання насіння, пошкодження морфологічних особливостей рослин, зниження розвитку коренів та більш глобальне зниження біомаси та врожайності сільськогосподарських культур, що можна пояснити стресовою реакцією на токсичні для рослин сполуки в складі



біочару, наявністю стійких вільних радикалів на поверхні біочару та змінами фізико-хімічних властивостей ґрунту.[22]

Рис 1. 9 Позитивні та негативні внесення біочару на рослини та ґрунт, що був забруднений солями [22]

1.3. Вирощування *Miscanthus × giganteus* і його вплив на ґрунт

Міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*), високоврожайна багаторічна біоенергетична культура, привернула значну увагу завдяки своєму потенціалу не лише забезпечити стале джерело біомаси, але й впливати на здоров'я ґрунту та його мікробіом різними способами.[7; 23; 46] Дослідження різних типів ґрунтів та рівнів забруднення свідчать про багатогранну взаємодію між цією культурою та ґрунтовим середовищем, що охоплює зміни фізичних, хімічних та біологічних параметрів.

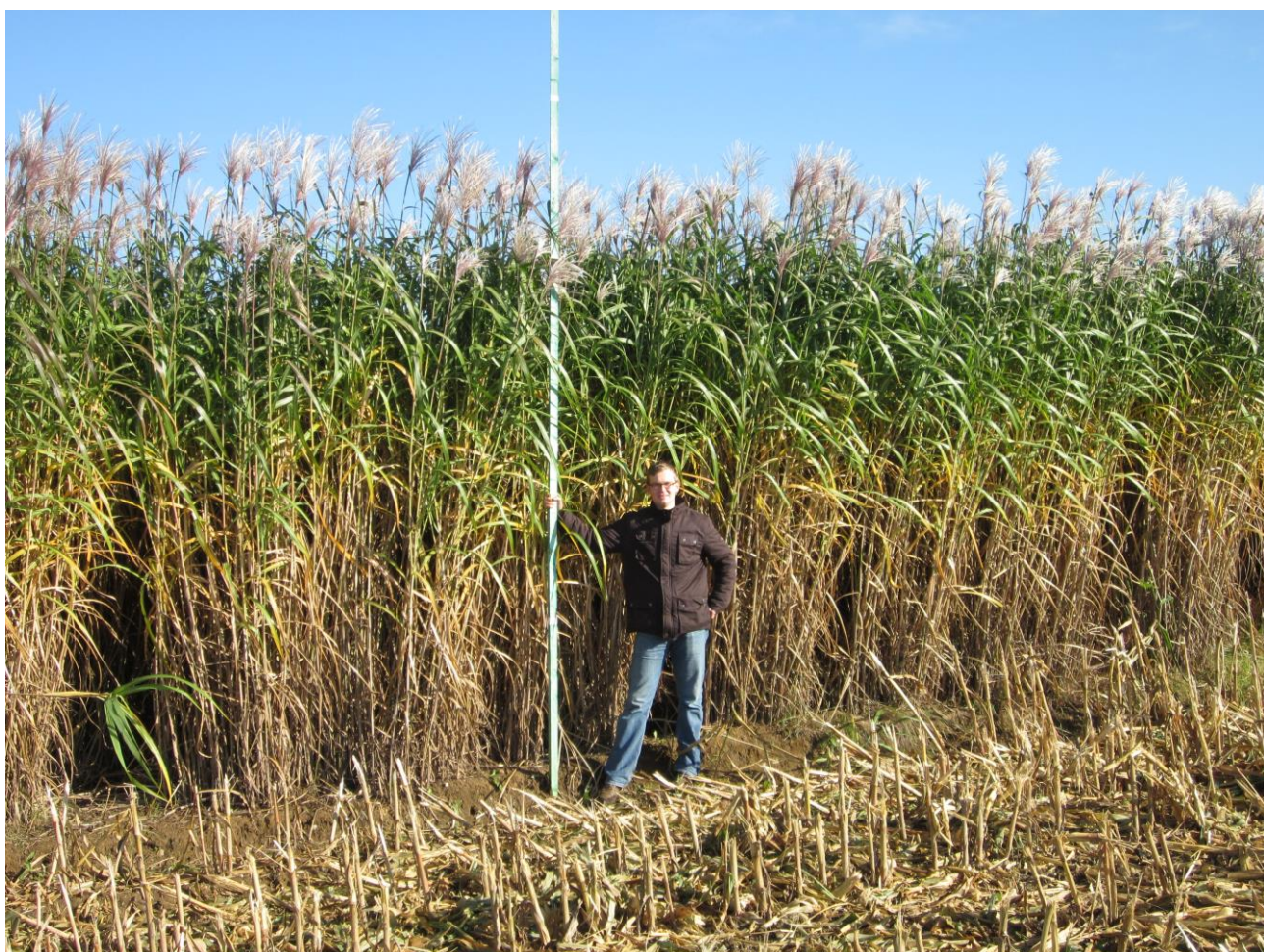


Рис. 1.10 *Miscanthus × giganteus* у полі в Зівердінгбеку в Північному Рейні-Вестфалії, Німеччина [4]

Одним з ключових аспектів вирощування міскантусу є його вплив на фізичні властивості ґрунту. Дослідження показують, що розгалужена коренева система міскантусу може покращити структуру ґрунту, потенційно збільшуючи пористість та інфільтрацію води [46]. Це особливо актуально на деградованих або

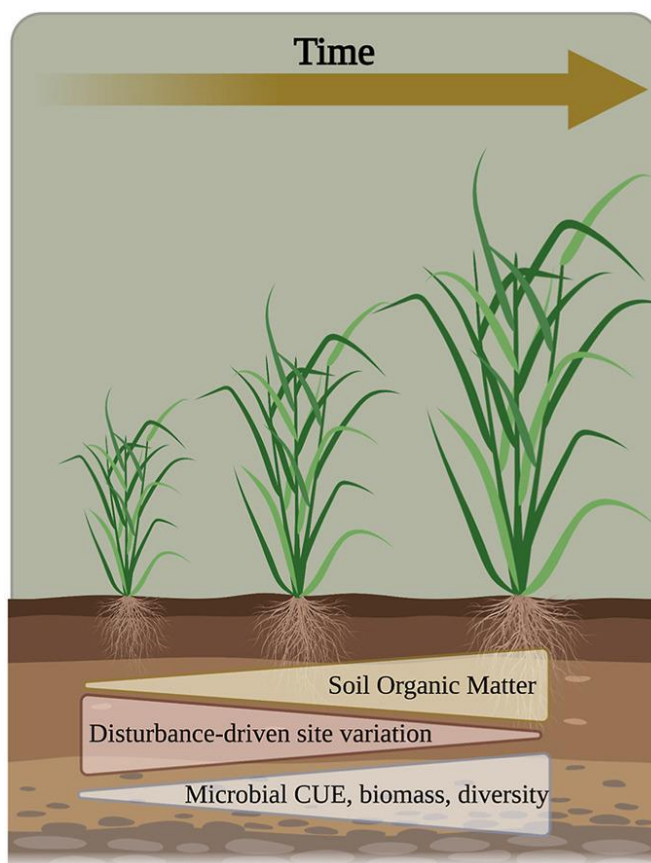
пустуючих (маргінальних) землях, де ущільнена структура ґрунту та погана аерація можуть обмежувати ріст рослин і активність мікробних сполук. Густа мережа кореневищ та коренів сприяє агрегації ґрунту, підвищуючи його стабільність та зменшуючи ризик ерозії [46]. Крім того, активний ріст та стрімке збільшення біомаси міскантусу призводить до значного надходження органічної речовини до ґрунту через процеси гниття та розкладання коренів і листового опаду. Це збагачення органічною речовиною потенційно може покращити водоутримувальну здатність ґрунту, кількість доступних для рослин і бактерій поживних речовин та загальну родючість ґрунту [46].

Було показано, що культивування міскантусу гігантського викликає зміни у структурі та функції ґрунтової мікробної спільноти [7; 23; 26]. Ці зміни часто пов'язані з корневими ексудатами рослини, які можуть вибірково сприяти росту певних мікробних груп у ризосфері [16]. Дослідження показують, що міскантус може сприяти формуванню більш різноманітної та активної мікробної спільноти порівняно з традиційними сільськогоспо-дарськими системами або покинутими землями [7; 26]. Це покращене мікробне різноманіття може сприяти покращенню кругообігу поживних речовин, розкладу органічної речовини та придушенню хвороб [7].

Зокрема, дослідження вивчали вплив міскантусу на ключові мікробні групи, що беруть участь у кругообігу азоту. Хоча міскантус відомий своєю ефективною використанням азоту та ремобілізацією азоту до кореневища, пов'язаний з ним мікробіом також може відігравати певну роль у засвоєнні поживних речовин.[23] У дослідженні, де спостерігали азотзалежні зміни бактеріальної спільноти в корені, кореневищі та ризосфері міскантусу в довгострокових польових випробуваннях, що свідчить про тісну взаємодію між стратегіями поглинання азоту рослиною та мікробними спільнотами поблизу неї. [23]

Крім того, міскантус продемонстрував потенціал у фіторемедіації забруднених ґрунтів [7; 28; 31; 32]. Його високі темпи та об'єми виробництва біомаси та розгалужена коренева система можуть сприяти поглинанню та накопиченню забруднюючих речовин або їх деградації, стимулюючи активність

мікроорганізмів, що деградують забруднюючі речовини, у ризосфері [31]. Наприклад, у 2016 році в одній зі статей повідомили про позитивний вплив міскантусу на мікробне різноманіття у ґрунті, забрудненому стічними водами, що свідчить про його потенціал для реабілітації таких деградованих земель. [7] Аналогічно, коли вчені досліджували перспективи міскантусу для фітореMediaції поліароматичних вуглеводнів, вказуючи на його здатність посилювати деградацію поліциклічних ароматичних вуглеводнів, можливо, шляхом стимуляції мікробної активності корене-вими ексудатами. [32] Вже в іншому дослідженні оцінювали ефективність вирощування міскантусу для відновлення рослинності (рекультиваци) золи та відновлення ґрунту, і результати підкреслили його стійкість до суворих



умов зольного ґрунту та здатність культури покращувати властивості ґрунту. [31]

Рис. 1.11 Графічний реферат одного з досліджень показує, що з плином часу за вирощування *Miscanthus x giganteus* спостерігається підвищення кількості органічної речовини в ґрунті, ефективності використання вуглецю

мікроорганізмами, а також їх біомаса та різноманіття, і продемонстрували зниження змін, спричинених порушеннями. [41]

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика матеріалів та умов досліджень

Згідно з ДСТУ ISO 10381-2:2004, відбирання проб ґрунту є ключовим для оцінки його якості шляхом аналізу фізичних, хімічних, біологічних та радіологічних параметрів. Неможливість дослідити весь ґрунтовий масив вимагає, щоб відібрані проби були максимально репрезентативними для всієї ділянки. [3] Таким чином, ми відбираємо порушені проби (ті, що не зберігають природну структуру ґрунту), адже аналізуємо лише наявність та приблизну кількість мікробних угруповань на досліджених ділянках. [3] Це забезпечить максимальну однорідність зразків, що будуть усередненою репрезентацією всієї ділянки.

Для запобігання контамінації проб сторонньою мікробіотою в процесі ретельно стежили за стерильністю інструментів і контейнерів. Прямо перед відбором кожної точкової проби бури і лопатки проходили дезинфекцію 70% розчином етилового спирту, після чого піддавалися фламбуванню. Кожна точкова проба після відбору поміщалася у стерильне відро, індивідуальне для кожної ділянки, і за методикою в подальшому були переміщені в стерильні поліетиленові пакети з відповідним маркуванням. [42]

В обидва облікові роки проби відбиралися в орному шарі поля; вранці до настання спеки та за можливих однакових умов. Усі ділянки, на щастя, мали рівномірний рельєф, тому умовно поділялися на “квадрати” з довжиною сторін 100 м. У кутах та по центру кожного “квадрата” буром відбиралися проби на однаковій глибині 25 см, ретельно розминалися та очищалися від каміння, корінців та інших сторонніх предметів і поміщалися в стерильні відра та ретельно перемішувалися для отримання середньої (гомогенної) проби. [42]

Ретельно змішаний ґрунт із відра кожної ділянки окремо висипався на землю і розділявся на 4 частини. З кожної частини відбиралися рівні частини ґрунту та переміщалися в стерильний поліетиленовий пакет із позначеною відповідно до ділянки пробою, з отриманою масою зразка приблизно 1 кг. Ці поліетиленові пакети були максимально швидко доставлені в лабораторію для подальших аналізів.

Під час відбору проб не брався ґрунт із заборонених ділянок, таких як біля доріг, поблизу телеграфних і електричних стовпів, меж поля та огорож тощо. [42]

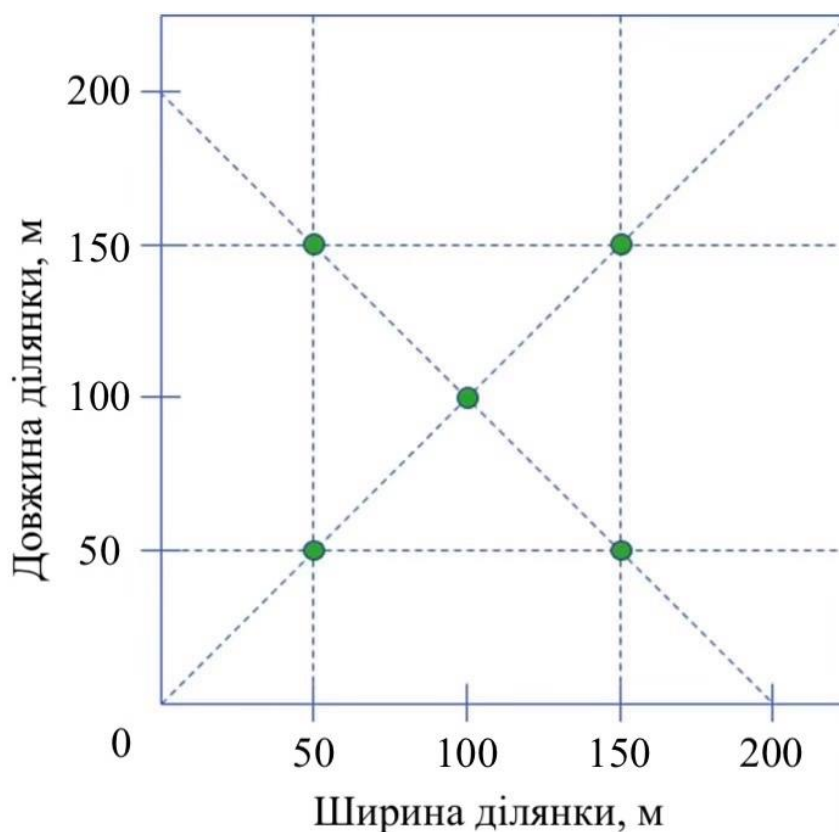


Рис. 2.1 – схема відбору проб ґрунту методом “квадрата”. Зеленими точками позначені місця, де буром відбиралися проби на глибину орного шару.

З поля в 2023 році були відібрані наступні проби:

- Варіант 1 – контроль (вирощується *Miscanthus* × *giganteus* без біочару та інших препаратів).
- Варіант 2 – оброблена біочаром з деревини 5%.
- Варіант 3 – оброблена біочаром з деревини 10%.
- Варіант 4 – оброблена біостимулятором Біоукорінювач “БіоХелп”.

З того ж поля у 2024 році були відібрані такі зразки:

- Варіант 1 – контроль ($M \times G$ без біочару з люцерною в міжряддях).
- Варіант 2 – $M \times G$ з біочаром 5% + люцерна в міжряддях.
- Варіант 3 – $M \times G$ з біочаром 10% + люцерна в міжряддях.
- Варіант 4 – $M \times G$ без біочару та без люцерни в міжряддях на ділянці, обробленій біостимулятором минулого року.

Біоукорінювач торгової марки “БіоХелп”, дистриб’ютором та виробником якого виступає українське приватне підприємство “БТУ-центр”, є біостимулятором на основі біопрепарату АЗОТОФІТ®; він складається з не менш ніж $0,5 \times 10^9$ колонієутворюючих одиниць життєздатних мікроорганізмів азотфіксуючих бактерій виду *Azotobacter chroococcum*, що є типовим представником ґрунтової мікрофлори по всій Земній кулі. [Рис. 2.1] З інформації, представленій виробником на упаковці, відомо також, що окрім фіксації азоту біоактиватор забезпечує виділення фунгіцидних речовин, покращення утворення, розвитку та зміцнення кореневої системи та полегшення адаптації рослин унаслідок



пересаджування. [Рис. 2.1]

Рис. 2.1 фотографія одного упакування біопрепарату “Біоукорінювач” ТМ “БіоХелп” із усією інформацією від виробника.

2.2 Приготування селективних живильних середовищ для визначення еколого-трофічних груп мікроорганізмів

З метою детального аналізу кількості життєздатних мікроорганізмів різних еколого-трофічних груп я послуговувалася методом висіву ґрунтової суспензії на тверді живильні середовища [45, с. 60]. Заздалегідь мною були приготовані та простерилізовані наступні живильні середовища: агар Чапека-Докса, картопляно-глюкозний агар, агар Ешбі, крохмаль-аміачний агар, ґрунтовий агар. Ті середовища, які потребують поверхневого посіву, були розлиті по чашкам Петрі перед проведенням серій розведень, а ті, що потребують глибинного – були заново нагріті в відкритому автоклаві для заливання безпосередньо після внесення суспензії.

Спосіб приготування поживного середовища “Агар Чапека-Докса”

Для приготування синтетичного поживного середовища Чапека-Докса у 1000 мл дистильованої води розчинили необхідні солі (2г NaNO_3 ; 1г KH_2PO_4 ; 0,5г семиводного MgSO_4 ; 0,5г KCl ; 0,01г семиводного FeSO_4), після чого підкоригували рН до 5,0–6,0. Далі в середовище додали 13 г агар-агару і залишили на 15 хвилин для набухання. Після цього нагріли суміш до кипіння, постійно перемішуючи. [41 с 31] Отримане середовище перелили у ще гарячому стані по флаконам та простерилізували в автоклаві при температурі 116,5 °С (і тиску 0,75 атм) протягом 10 хвилин. [43 с. 249] На цьому середовищі спостерігаємо ріст і проводимо облік ґрунтових грибів, в тому числі цвілевих, і дріжджів. [40, с. 9].

Спосіб приготування крохмаль-аміачного агаризованого середовища

Для приготування 1 літру крохмале-аміачного агару спочатку в термостійкому посуді нагрівають 950 мл води, до якої додають 1г $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 1г K_2HPO_4 , 1г $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1г NaCl і ретельно перемішуються. Окремо розчиняють 10г крохмалю в невеликій кількості води (приблизно 50 мл) і тоненькою цівочкою до-дають до розчинених у воді солей, і продовжують помішувати. Наступним додають 15г агару і після розчинення розливають у флакони для стерилізації, автоклавують при 0,75 атм протягом 10 хв. [43, с. 250] Крохмаль-аміачний агар є найоптимальнішим середовищем для культивування і обліку актиноміцетів і мікобактерій [40 с. 9]

Спосіб приготування середовища “Картопляно-глюкозний агар”

Середовище, яке ще називається картопляно-глюкозний агар, складається з відвару, приготованого з 200 г очищеної картоплі у 1 л водогінної води. Для цього вже проварену картоплю прибирають та проціджують отриманий навар через ватно-марлевий фільтр та доводять до об'єму в 1000 мл водою. Додають 15 г глюкози та таку ж кількість агар-агару, і, нагріваючи та постійно помішуючи, доводять до повного розчинення інгредієнтів. Далі доводять рН до 7,0 і розливають по флаконам, стерилізуючи в автоклаві [43 с. 31]. Оскільки КГА є доволі поживним як для грибів, так і бактерій, на ньому ми спостерігали ріст і проводили облік загальної кількості ґрунтових мікроорганізмів.

Спосіб приготування агаризованого поживного середовища “Ешбі”

Для отримання 1 л поживного середовища “Ешбі” необхідно у відповідній кількості води розчинити 20 г сахарози; 0,2 г K_2HPO_4 ; 0,2 г семиводного $MgSO_2$; 0,2 г $NaCl$; 0,1 г K_2SO_4 ; 5 г $CaCO_3$, попередньо розчиненого у воді; 0,2 г суміші мікроелементів; на вогні та постійно помішуючи розчиняють у отриманій суміші 15 г агар-агару та після повного розчинення розливають по флаконам і піддають стандартній стерилізації [43 с. 40; 47 ст. 419]. На агарі “Ешбі” ми проводимо облік пласких, прозоро-безбарвних колоній *Azotobacter*, що нагадують слиз, а також інших олігонітрофільних мікроорганізмів. [47 с. 9]

Спосіб приготування ґрунтового агару із витяжки

Приготування ґрунтового агару починається з ґрунтової витяжки, для якої 250 г ґрунту (такого ж типу, як і досліджувані зразки з поля) заливаються 1,25 л води і плавляться на водяній бані протягом 3-5 годин не доводячи до кипіння (за приблизної температури в 80-90°C). Отримана суспензія проціджується через ватно-марлевий фільтр і настоюється ніч. Для приготування 1 л агаризованого середовища відмірюють 250 мл приготованої витяжки, доливають до необхідного об'єму дистильованої води та ставлять на вогонь і, постійно помішуючи, розчиняють додані 10 г пептону та 15 г агар-агару. Після повного розчинення отримане середовище розливають по флаконам і проводять стандартну стерилізацію

автоклавуванням. На отриманому середовищі проводять загальний облік мікробіому досліджуваного ґрунту.

2.3 Отримання ґрунтової суспензії для аналізу методом серійних розведень

Отже, для дослідження проводилося приготування ґрунтової суспензії методом серійних розведень проб ґрунту [43 с 41]. Для цього по чергово з кожної проби відібрали наважку ґрунту в розмірі 10 г, що далі висипалася в конічну колбу об'ємом у 250 мл. До неї додали 90 мл стерильної води та підписували за номером проби. Таким чином отримали первинну суспензію у варіантах 1, 2, 3 і 4 відповідно до зразків ґрунту з поля обидвох облікових років, що тепер має пройти серію розведень, необхідну для висіву на кожне з поживних агаризованих середовищ.

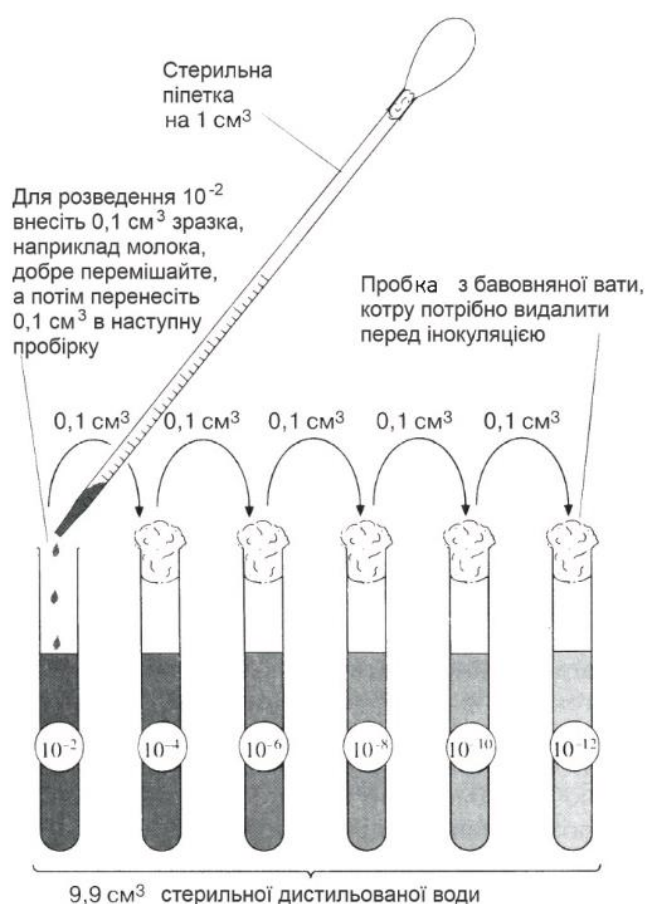


Рис. 2.2 Загальна схема приготування серійних розведень [43 с. 41 рис. 10]

Після приготування всіх 4 суспензій колби ставилися на лабораторний шейкер, де розведені зразки ґрунту збовтувалися круговими рухами протягом 10 хв при 140 об/хв, і по закінченню цього процесу відстоювалися кілька хвилин для осадження твердих часточок зразку. Оскільки максимально необхідне розведення – 5 (1:100000), необхідно підготувати по 60 пробірок на кожну пробу (3 повтори

кожного варіанту проходять 5 серій розведення), самплер на 0,1 см³, що відповідає 1000μL і відповідні йому стерильні носики. Для зручності та оптимізації процесу в пробірки попередньо були додані 9 мл дистильованої води в асептичних умовах боксу біологічної безпеки, і промарковані згідно проби, повтору і ступеню



розведення.

Рис. 2.3 Виконання послідовних серійних розведень ґрунтової суспензії в ламінарному боксі в лабораторії

Розведення №2 (1:100) і подальші проводилися за наступним алгоритмом: в асептичних умовах ламінарного боксу з уже підготованим робочим місцем самплером із стерильним носиком, що утилізували після кожного зразка і замінювали на новий, відбирається з колби 1 см³ (1000μL) суспензії, при цьому елюат декілька разів випускали та набирали знову для кращого проникнення мікроорганізмів у пори пластику носика, і, внаслідок цього, у наступу пробірку.

Аліквота проби переноситься у відповідно промарковану пробірку (наприклад, 1.1.2) і додається до 9мл стерильної води, після чого ретельно перемішується. За тим же принципом наповнюються наступні пробірки кожного варіанту та проби і відповідно промарковуються.

Для культивування мікроорганізмів на 5 поживних середовищах із 4 варіантів зразків по 3 повтори заздалегідь стерилізуються 60 чашок Петрі в сухожаровій шафі при 160°C протягом 120 хв. [43 с. 16] Оскільки на 4 поживних середовищах досліджувані мікроорганізми потребують глибинного методу культивування, і тільки на агаі “Ешбі” зразки мають культивуватися поверхнево, заздалегідь це поживне середовище було розлите по чашкам Петрі та залишено застигати. Усі інші середовища були розплавлені безпосередньо перед посівом у флаконах для правильного глибинного методу посіву у чашки Петрі.

Для глибинного посіву стерильною піпеткою (в нашому випадку саплером зі змінним носиком) відбирається аліквота ґрунтового розчину необхідної серії розведень у розмірі 0,5 см³ (500μL) в стерильних умовах ламінарного боску та при палаючому вогні пальника переноситься в стерильну чашку Петрі, після чого носик піпетки утилізується, а зразок у чашці Петрі заливається адекватною кількістю попередньо розплавленого, але остиглого до помірної температури (приблизно 45-50°C) необхідного поживного середовища, з попередньо обпаленим флаконом для запобігання контамінації. Після цього, обережними похитуваннями чашки Петрі рівномірно розподіляється поживне середовище, після чого чашка промарковується згідно варіанту та повторення, та лишається застигати. [41 с. 48-49]

Для проведення поверхневого посіву за методом Дригальського на тверде агаризоване середовище, в умовах стерильного боксу біологічної безпеки та поблизу полум'я пальника, за допомогою піпетки наносять визначену аліквоту ґрунтової суспензії з необхідної серії розведень на поверхню живильного середовища. Потім, використовуючи стерильний шпатель Дригальського, який попередньо про-стерилізували фламбуванням, цю нанесену краплю рівномірно розподіляють по всій площі поверхні середовища, виконуючи посів газоном.

Кожну чашку маркують та акуратно відставляють. Шпатель знову фламбують, і за аналогічною процедурою здійснюють посів для наступних варіантів та їх повторень. [43 с. 42]

Таким чином, ми отримуємо наступні зразки, що культивуються на твердих поживних середовищах:

- На агарі Чапека-Докса методом глибинного культивування проводиться висів зразків ґрунтової суспензії із 3 серії розведень (1:1000).
- На крохмале-аміачному агаризованому середовищі культивуються мікроорганізми з 5 серії розведень суспензії (1:100000) методом глибинного посіву.
- На картопляно-глюкозний агар проводиться висів 4 серії розведень ґрунтової суспензії (1:10000), що культивується глибинним методом.
- На твердому поживному середовищі “Ешбі” ми проводимо поверхневий посів зразків із 5 серії розведень ґрунтової суспензії методом газону.
- На ґрунтовому агарі з витяжки висівається аліквота суспензії з 5 серії розведень глибинним методом.

Далі засіяні 60 чашок Петрі після повного застигання середовищ перевертаються на кришку (для уникнення падіння крапель конденсату на агар) і



поміщаються в шафу для інкубації протягом 6 днів, після чого проводиться облік мікроорганізмів.

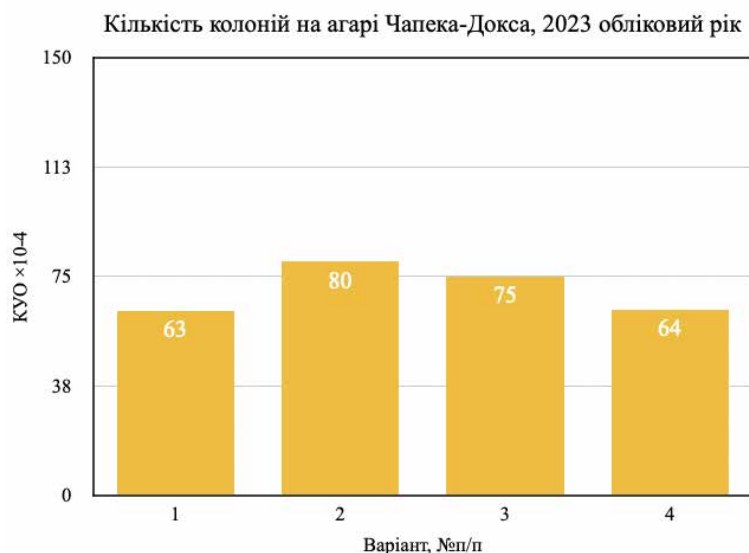
Рис. 2.4 Чашки Петрі з досліджуваними зразками, готові до інкубації

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Після відбору зразків, приготування необхідних поживних середовищ і ґрунтових суспензій, їх посіву, проводився облік життєздатних колоній на твердих поживних середовищах. Знаючи, які групи мікроорганізмів ростуть на кожному з середовищ, ми можемо прослідкувати динаміку їх росту, а також порівняти результати 2023 і 2024 облікових років, і зробити висновки про вплив вирощування *Miscanthus × giganteus*, застосування біочару у двох різних концентраціях і допоміжне застосування біоукорінювача “БіоХелп. Для цього бралися усереднені показники 3 повторів кожного варіанту.

3.1 Вплив досліджуваних препаратів на динаміку мікроміцетів та загальну кількість мікроорганізмів у ґрунті

В 2023 обліковому році на середовищі **Чапека-Докса** спостерігається приблизно однакова кількість життєздатних колоній земних грибів – на всіх 4 варіантах їх не більше 100 КУО. Найбільше мікроорганізмів спостерігається в 2 варіанті, куди було внесено 5% біочару з деревини. На початковому обліку після 6 днів культивування спостерігалось чимало бактеріальних колоній у чашках, втім, з



плином часу гриби здобули перевагу і в кількості, і в розмірі колоній.

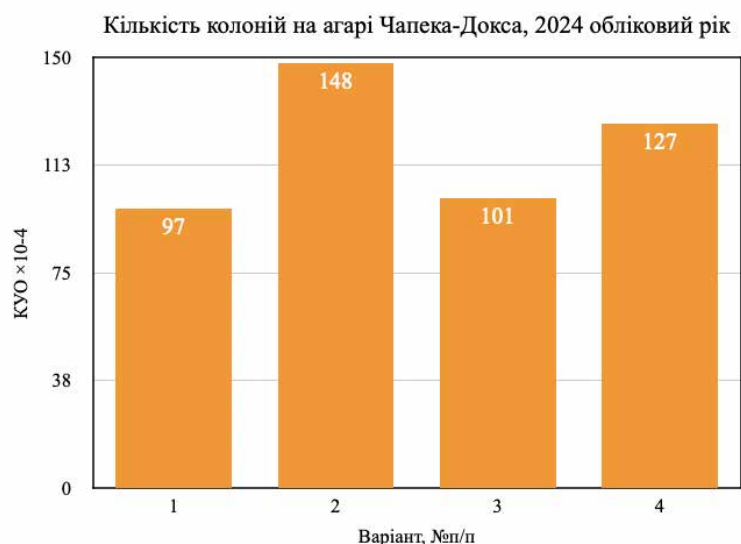
Рис. 3.1 Життєздатні колонії грибів на всіх варіантах, дані обліку 2023 року.

Спостерігаються незначні відмінності між варіантами

В 2024 обліковому році спостерігалось значне збільшення життєздатних колоній грибів, і більша їх різноманітність. Кількість бактерій, які не були потрібні в обліку, також була значно меншою за ті, що були минулого облікового року. В 1 варіанті, попри відсутність застосування біопрепаратів, спостерігається збільшення на 34 життєздатні колонії, що становить 54% від початкового значення.

В 2 варіанті, де відбувалося одночасне вирощування *Miscanthus* × *giganteus* і застосування 5% біочару з деревини, відбувається найбільша кількість колоній. Це збільшення на 68 одиниць, що в відсотках становить 85%.

В 3 варіанті за вирощування Міскантусу та застосування 10% деревного біочару ріст не такий вражаючий: збільшення колоній на 26 одиниць, що становить неповних 35% від початкового показника, і можна назвати гіршим результатом, ніж



у 1 варіанті за вирощування *Miscanthus* × *giganteus* без доданих біопрепаратів.

Рис. 3.2 Графічне зображення кількості життєздатних колоній грибів у 2024 обліковому році

Приголомшливий результат у майже 100% збільшення кількості життєздатних колоній грибів спостерігається в 4 варіанті, де вирощуванням місканту гігантського проводилося на обробленому біоукорінювачем “БіоХелп”. З початкових 64 колоній, що спостерігалися в 2023 обліковому році, в 2024 підраховано вже 127.

На картопляно-глюкозному агарі в 2023 обліковому році ми спостерігаємо невелику кількість колоній, втім, вони мають великий розмір і займають майже всю площу чашок Петрі. Найбільша кількість життєздатних колоній спостерігається в варіанті 2 – ділянка поля, на якій застосовувався 5% біочар із деревини. Найменша кількість ґрунтових мікроорганізмів була під варіантом 4.

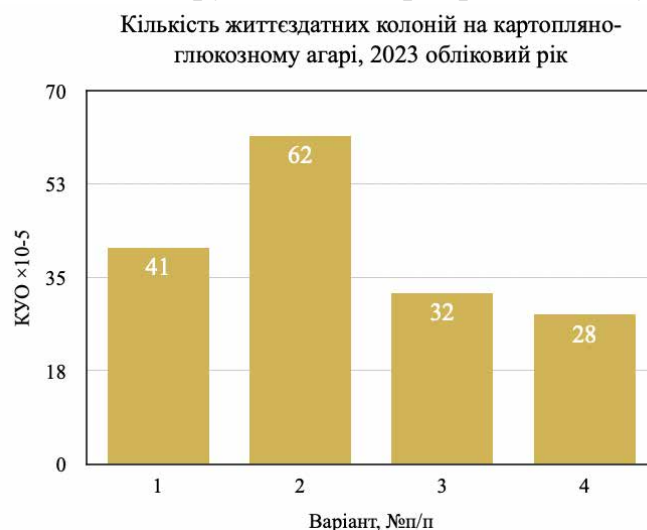


Рис. 3.3 Життєздатні колонії мікроорганізмів на агаризованому крохмаль-декстрозному середовищі, дані за 2023 обліковий рік

В 2024 обліковому році спостерігається різке збільшення кількості мікроорганізмів: число життєздатних колоній під кожним варіантом має значення більше 140 КУО×10⁻⁵. Можна зробити висновок, що вирощування місканту і без застосування біопрепаратів, і з ним, позитивно впливає на кількісний склад мікробіоти та її різноманіття. Найкращий відсотковий показник спостерігається в 4 варіанті, де кількість колоній збільшилася з 28 до 155 – на 454%.

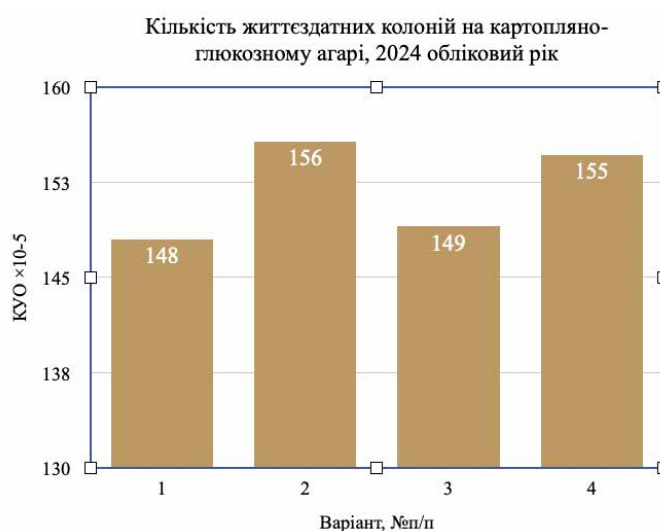


Рис. 3.4 Результати обліку колоній на картопляно-глюкозному агаризованому середовищі в 2024 році

3.2 Розвиток амоніфікаторів, нітрифікуючих і азотфіксуючих бактерій за дії досліджуваних біопрепаратів

На крохмаль-аміачному середовищі в 2023 обліковому році спостерігався слабкий ріст актиноміцетів і мікобактерій, тому кількість життєздатних колоній мікроорганізмів була в межах від 1 до 10 КУО $\times 10^{-6}$, тобто у варіантах від 1 до 3 спостерігається кількість у межах норми, і більша за норму кількість у варіанті 4. Це може свідчити як про спрятливу концентрацію аміаку в досліджуваному зразку [39 с.63], низький рівень забруднення важкими металами [39 с.243] чи попереднє удобрення екскрементами тварин, що не було згадано перед початком проведення дослідів [39 с. 63], що є малоімовірним.

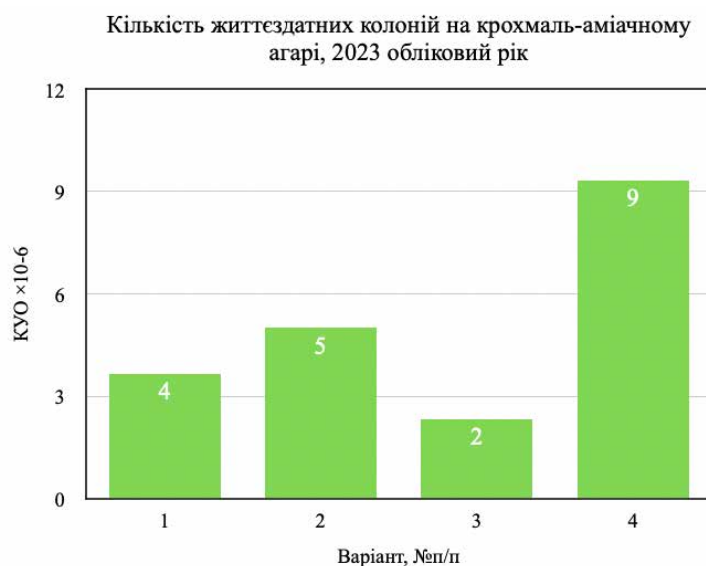
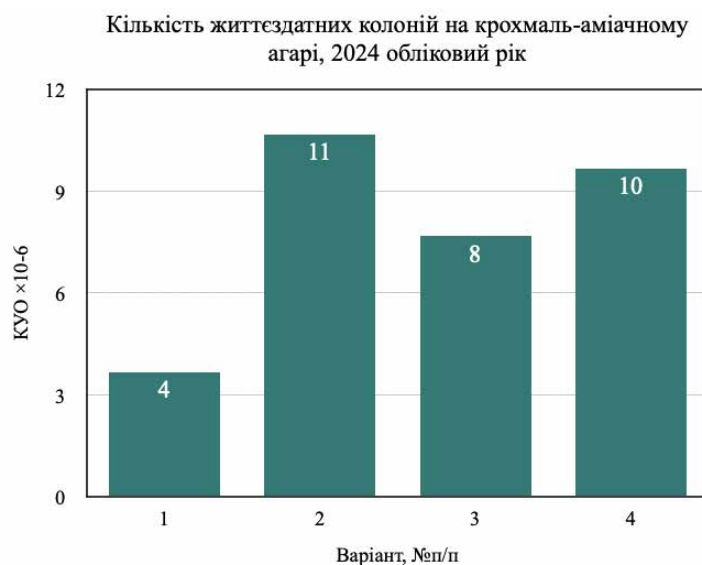


Рис. 3.5 Облік життєздатних колоній актиноміцетів і мікобактерій на крохмаль-аміачному твердому середовищі у 2023 обліковому році

Власне, в 2024 обліковому році спостерігається наступна картина: в 1 варіанті за вирощування лише Міскантусу гігантського без біостимуляторів і біочару свідчить про відсутність прямої кореляції між цими факторами.

В 2 варіанті в порівнянні з 2023 обліковим роком, у 2024 кількість колоній збільшується трохи більше ніж вдвічі: замість 5 життєздатних колоній спостері-

галося 11. В 3 варіанті відбулося найбільше зрушення: в порівнянні з 2 колоніями у 2023, в 2024 постерігалось 8, що є ростом у 300%, що свідчить про однозначну



кореляцію між застосуванням 10% біочару та збільшенням кількості життєздатних колоній актиноміцетів і мікобактерій.

Рис. 3.6 Кількість життєздатних колоній на крохмалє-аміачному агаризованому середовищі в 2024 обліковому році.

У 4 варіанті кількість колоній актиноіцетів і мікобактерій збільшилась всього на 1 одиницю в порівнянні з результатом 2023 облікового року.

Початкові показники на **поживному середовищі “Ешбі”** (результати обліку 2023 року) показують, що в зразках усіх варіантів кількість колоній роду *Azotobacter* є відносно невеликою – в межах 1-5 КУО×10⁻⁶.

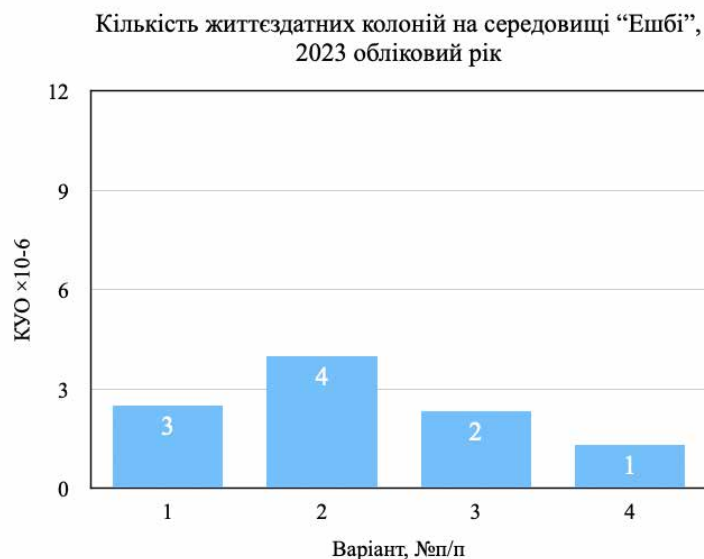


Рис. 3.7 Кількість колоній виду *Azotobacter* на агарі “Ешбі” в 2023 обліковому році

У наступному обліковому році в зразках під варіантами 1-3 кількість колоній істотно не змінюється. Втім, під варіантом 4 кількість колоній зростає в 11 разів – немає сумніву, що внесення біоактиватора з бактеріями *Azotobacter chroococcum* у складі наглядно змінить показник на краще.

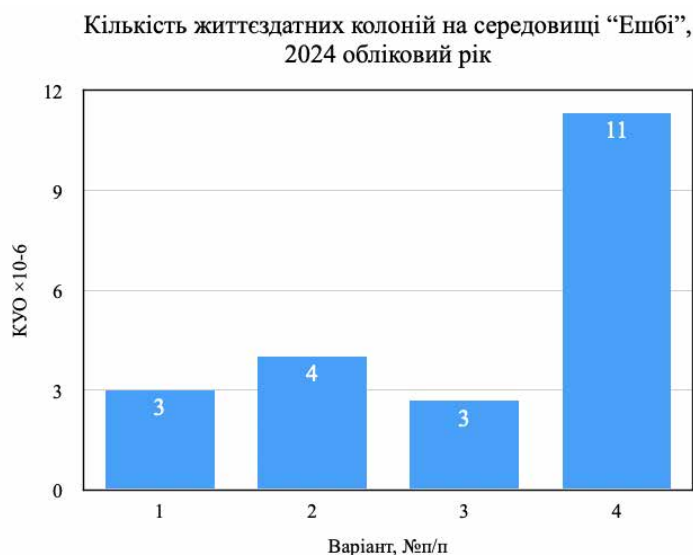


Рис. 3.8 Життєздатні колонії на агарі “Ешбі” в 2024 обліковому році

3.3 Розвиток педотрофної мікробіоти при вирощуванні міскантусу за впливу препаратів

В 2023 році в 1-3 варіантах спостерігається кількість мікроорганізмів у межах $360-393 \text{ КУО} \times 10^{-5}$, з найбільшим значенням у 2 варіанті. Втім, на ділянці варіанту 4 ґрунтових мікроорганізмів виявилось статистично менше – втім, на чашках Петрі під іншими варіантами було багато дрібних колоній, а під 4 варіантом спостерігалися декілька набагато більших за розміром (площу як мінімум чверті твердого середовища).

В 2024 році спостерігалися як позитивні, так і негативні кількісні зміни в різних варіантах. Однозначно можна заявити тільки про кореляцією між зміною біорізноманіття зразків кожного варіанту та вирощуванням *Miscanthus × giganteus* і застосуванням біочару в різних концентраціях та біоукорінювача.



Хоч під варіантом 1 кількість колоній зменшилась, вони були більші за розміром, ніж у попередньому році, і спостерігалось набагато більше морфологічно



різноманітних видів.

Рис. 3.9 Кількість життєздатних колоній мікробів на ґрунтовому агарі,
2023 обліковий рік

Рис. 3.10 Результати обліку життєздатних колоній мікроорганізмів на агарі
з ґрунтової витяжки в 2024 обліковому році.

Вже краща статистика спостерігається у зразках під варіантом 2 – кількість колоній у порівнянні з минулим роком зросла на $54 \text{ КУО} \times 10^{-6}$, що становить майже 17%. Несуттєво підвищилась кількість колоній у 3 варіанті – всього на 9 одиниць. Але, як і в інших варіантах, збільшився їх розмір і біорізноманітність. Найістотніше зростання кількості мікроорганізмів у чашках із ґрунтовим агаром із витяжки

спостерігається в зразках під варіантом 4, разом із тим, зросла кількість різноманітних відмінних морфологічно мікроорганізмів, які не спостерігалися при обліку 2023 року.

ВИСНОВКИ

Після ознайомлення з літературними джерелами, затвердженням робочого і проведення власних досліджень під наглядом наукового керівника, можливо проаналізувати результати та скласти власні висновки щодо стану мікробного складу ґрунту з 4 варіантів, і впливу на нього вирощування *Miscanthus × giganteus* та застосування біочару в двох різних концентраціях, а також біоукорінювача.

Кількість колоній грибів значно зросла в усіх варіантах – найменший показник становив збільшення кількості життєздатних колоній на 35% у порівнянні з початковим показником. Такі темпи зростання кількості грибів у ґрунті можуть бути спричинені не лише застосуванням біопрепаратів і вирощуванням Міскантусу гігантського, а і сприятливими фізико-хімічними умовами. Втім, щоб довести, що причиною цього були оптимальна кількість вуглекислого газу чи аміаку – необхідно провести подальші дослідження. Оскільки тематика кваліфікаційної роботи дозволяє спиратися лише на зазначені в першу чергу фактори, можна сміливо заявити, що спостерігається сильна кореляція між кількістю грибів у ґрунті та вирощуванням $M \times G$ і застосуванням біочару та біоукорінювача.

Кількість актиноміцетів та мікобактерій на крохмаль-аміачному середовищі істотно зросла на зразках 2 і 3 варіантів (у 2 та 4 рази відповідно). За таких результатів можна заявити, що саме вирощування Місканту не впливає істотно на кількісний склад досліджуваних мікроорганізмів, утім, додавання біочару в концентраціях 5% і 10% точно корелює зі збільшенням кількості життєздатних колоній.

На картопляно-глюкозному середовищі ми спостерігали ріст колоній найрізноманітніших ґрунтових організмів, адже сам агар є дуже поживним для багатьох еколого-трофічних груп. Як було вже зазначено у попередньому розділі, збільшення кількості життєздатних колоній відбулося в зразках кожного варіанту, але найбільш істотні зміни відбулися в 4 варіанті, де виросло на 127 колоній більше.

Отже, вирощування *Miscanthus* × *giganteus* позитивно впливає на кількість і різноманіття ґрунтових мікробів, а найкраще у поєднанні з попередньою обробкою ділянки препаратом біоукорінювач від “БіоХелп”.

На ґрунтовому агаризованому середовищі ми спостерігали зменшення кількості, але збільшення розмірів і видового різноманіття життєздатних колоній мікроорганізмів. Це може свідчити про активне розмноження кожної колонієутворюючої одиниці в порівнянні з минулим обліковим роком, хоч статистично і дає негативний результат.

Кількість колоній бактерій виду *Azotobacter*, облік яких проводиться на твердому поживному середовищі “Ешбі”, був доволі передбачуваним, адже найкращий результат проявився в зразку під варіантом 4, де було внесено біопрепарат із живими колоніями *Azotobacter chroococcum*. Втім, не до кінця зрозуміло, чому в інших зразках не сталося “стрибка” кількості колоній – можливо, у ґрунті в результаті вирощування *Miscanthus* × *giganteus* і застосування біочару знаходиться більше доступних джерел азоту аніж потрібних для розщеплення діазотрофними бактеріями. Для того, щоб дати точну відповідь на таке запитання, варто провести подальші дослідження.

Можна зі сміливістю заявити, що проведені дослідження підтвердили зв’язок кількісного складу ґрунтових мікроорганізмів різних груп та вирощування Міскантуса гігантського і застосування біочару в різних концентраціях, і що для кожної піддослідної еколого-трофічної групи мікробів він свій. Це було передбачувано після ознайомлення з літературними джерелами, в яких було доказано, що існує взаємозв’язок із якісним та кількісним складом ґрунтової біоти та застосуванням біочару, вирощуванням *Miscanthus* × *giganteus* як окремо, так і одночасно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Impacts of Agricultural Management Practices on Soil Health. *Exploring Linkages Between Soil Health and Human Health* / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC : The National Academies Press, 2024. С. 99–156. ISBN 978-0-309-71508-9. URL: <https://doi.org/10.17226/27459>.
2. What is Soil Health?. www.nrcs.usda.gov. URL: <https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns/soils/soil-health> (дата звернення: 15.05.2025).
3. ДСТУ ISO 10381-2:2002. Якість ґрунту. ВІДБИРАННЯ ПРОБ. Частина 2. Настанови з методів відбору проб. Чинний від 01.04.2006.
4. @ Hamsterdancer. Miscanthus Bestand.JPG. *Wikipedia*. 20.10.2011. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Miscanthus_Bestand.JPG (дата звернення: 15.05.2025).
5. Abbott L. Soil health characteristics. *Open Access Government*. 2024. January 2024. С. 399–400. ISSN 2516-3817. URL: <https://doi.org/10.56367/OAG-041-11193>.
6. Azarbad H. Conventional vs. Organic Agriculture—Which One Promotes Better Yields and Microbial Resilience in Rapidly Changing Climates?. *Frontiers in Microbiology*. 2022. С. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.903500>.
7. Positive effect of the Miscanthus bioenergy crop on microbial diversity in wastewater-contaminated soil / E. Bourgeois та ін. *Environmental Chemistry Letters*. 2015. Т. 13. С. 495–501. URL: <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0531-5>.
8. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment / M. Brtnicky та ін. *Science of the Total Environment*. 2021. Т. 796 : 148756. ISSN 0048-9697. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148756>.
9. Soil health – a perspective / L. K. Fausak та ін. *Frontiers Soil Science*. 2024. Volume 4. URL: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1462428>.

10. Gauri S. G. Land Degradation and Challenges of Food Security. *Review of European Studies*. 2019. Т. 11, вип. 1. С. 63–72. URL: <https://doi.org/10.5539/res.v11n1p63>.
11. Impacts and mechanisms of biochar on soil microorganisms / К. Huang та ін. *Plant, Soil and Environment*. 2023. Т. 69. С. 45–54. URL: <https://doi.org/10.17221/348/2022-PSE>.
12. Huang L. The Call of the Soil: Unveiling the Rise and Future Trends of the Global Soil Health Industry. *AgroPages*. 2024. Annual Review 2023. С. 84–88.
13. Kabir E., Kim K.-H., Kwon E. E. Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science*. 2023. С. 17. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>.
14. Bioenergy crop *Miscanthus x giganteus* acts as an ecosystem engineer to increase bacterial diversity and soil organic matter on marginal land / J. L. Kane та ін. *Soil Biology and Biochemistry*. 2023. вип. 184. С. 40. URL: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109178>.
15. Katiyar D., Sachan R., Jat L. Soil Quality and Soil Health: A mini-review. *Journal of Current Opinion in Crop Science*. 2022. Т. 3 : (1). С. 6–15. ISSN 2583-0392. URL: <https://doi.org/10.62773/jcocs.v3i1.151>.
16. ORGANIC COMPOUNDS IN ROOT EXUDATES OF *Miscanthus × Giganteus* GREEF ET DEU AND LIMITATION OF MICROORGANISMS IN ITS RHIZOSPHERE BY NUTRIENTS / H. Kaňová та ін. *ACTA UNIVERSITATIS AGRICULTURAE ET SILVICULTURAE MENDELIANAE BRUNENSIS*. 2010. вип. 58. С. 203–210.
17. Biochar Production and Characteristics, Its Impacts on Soil Health, Crop Production, and Yield Enhancement: A Review / S. Khan та ін. *Plants*. 2024. С. 18. URL: <https://doi.org/10.3390/plants13020166>.

18. Kibblewhite M. G., Ritz K., Swift M. J. Soil health in agricultural systems. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*. 2008. Series B, Biological sciences. C. 685–701. URL: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>.
19. Biochar as a Multi-Action Substance Used to Improve Soil Properties in Horticultural and Agricultural Crops—A Review / A. Koziol та ін. *Agriculture*. 2024. Т. 14. URL: <https://doi.org/10.3390/14122165>.
20. Biochar effects on soil biota – A review / J. Lehmann та ін. *Soil Biology & Biochemistry*. 2011. Т. 43. С. 1812–1836.
21. Soil, biochar, and nitrogen loss to runoff from loess soil amended with biochar under simulated rainfall / Y. Li та ін. *Journal of Hydrology*. 2020. С. 10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125318>.
22. Biochar application in remediating salt-affected soil to achieve carbon neutrality and abate climate change / Q. Liu та ін. *Biochar*. 2023. С. 25. URL: <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00244-8>.
23. Liu Y., Ludewig U. Nitrogen-dependent bacterial community shifts in root, rhizome and rhizosphere of nutrient-efficient *Miscanthus x giganteus* from long-term field trials. *Global Change Biology Bioenergy*. 2019. Т. 11 : Issue 11. С. 1334–1347. URL: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12634>.
24. Montgomery D. R., Biklé A. Soil Health and Nutrient Density: Beyond Organic vs. Conventional Farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. С. 14. URL: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.699147>.
25. Morris S. J., Blackwood C. B. The Ecology of the Soil Biota and their Function. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* / ред. E. A. Paul. Academic Press, 2015. С. 273–309. ISBN 978-0-12-415955-6. URL: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05497-2>.
26. Effect of Growing *Miscanthus x giganteus* on Soil Microbial Communities in Post-Military Soil / D. Nebeská та ін. *Sustainability*. 2018. Т. 10 : 11. URL: <https://doi.org/10.3390/su10114021>.

27. Oregon Department Of Forestry. Biochar sample size. *Flickr.com*. 26.06.2014. URL: <https://www.flickr.com/photos/oregondepartmentofforestry/14536084053/> (дата звернення: 15.05.2025).
28. Miscanthus × giganteus Phytoremediation of Soil Contaminated with Trace Elements as Influenced by the Presence of Plant Growth-Promoting Bacteria / V. Pidlisnyuk та ін. *Agronomy*. 2022. Т. 12. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy12040771>.
29. Saytam R., Ashwani Y. Precision Agriculture: Harnessing Technology for Efficient Farming. *Fields of Tomorrow : Advancements in Modern Agriculture* / B. Prasad та ін. 2024. С. 50–63. ISBN 978-93-5838-975-3.
30. Biochar-Induced Microbial Shifts: Advancing Soil Sustainability / M. Sharma та ін. *Sustainability*. 2025. С. 15. URL: <https://doi.org/10.3390/su17041748>.
31. An appraisal of Miscanthus x giganteus cultivation for fly ash revegetation and soil restoration / D. Técher та ін. *Industrial Crops and Products*. 2012. Т. 36 : Issue 1. С. 427–433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.009>.
32. Prospects of Miscanthus x giganteus for PAH phytoremediation: A microcosm study / D. Técher та ін. *Industrial Crops and Products*. 2012. Т. 36. С. 276–281. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.030>.
33. United States Department Of Agriculture. Applying Soil Health Management Systems to Reduce Climate and Weather Risks in the Northwest. *www.climatehubs.usda.gov*. URL: <https://www.climatehubs.usda.gov/sites/default/files/Mngmt%20Systems%20Reduce%20Risks%20in%20the%20NW.pdf> (дата звернення: 15.05.2025).
34. Engineering microbial technologies for environmental sustainability: choices to make / W. Verstraete та ін. *Microbial Biotechnology*. 2021. С. 13. URL: <https://doi.org/doi:10.1111/1751-7915.13986>.
35. Wall D. H., Nielsen U. N., Six J. Soil biodiversity and human health. *Nature*. 2015. С. 8. URL: <https://doi.org/doi:10.1038/nature15744>.

36. Biochar and its impact on soil profile and plant development / L. Xu та ін. *Journal of Plant Interactions*. 2024. С. 8. URL: <https://doi.org/10.1080/17429145.2024.2401356>.
37. Mineral Constituents Profile of Biochar Derived from Diversified Waste Biomasses: Implications for Agricultural Applications / L. Zhao та ін. *Journal of Environmental Quality*. 2013. С. 545–552. URL: <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0232>.
38. van Bruggen A. H. C., Semenov A. M. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Applied Soil Ecology*. 2000. Т. 15. С. 13–24. URL: [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00068-8).
39. Іутинська Г. О. 2.6. Роль мікроорганізмів у ґрунтоутворенні. *Ґрунтова мікробіологія* : навчальний посібник. Київ : Арістей, 2006. С. 275. ISBN 966-8458-95-8.
40. Кривцова М. В., Сікура А. О. Санітарна мікробіологія : навчально-методичний посібник / Ужгородський національний університет. Ужгород : ПП Данило С.І., 2022. 22 с.
41. Кілочок Т., Гончар Н. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “мікробіологія з основами вірусології” / ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ. Дніпропетровськ, 2007. 91 с.
42. Лабораторія Агроєкологічного Моніторингу М. Полтава, Полтавська Державна Аграрна Академія. Схема відбору проб ґрунту. www.pdau.edu.ua. 29.03.2016. URL: https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/node/2219/poslidovnashemavidboru_probgruntu2_0.pdf (дата звернення: 13.05.2025).
43. Промислова біотехнологія : навчальний посібник / М. Д. Мельничук та ін. ; Національний університет біоресурсів і природокористування України. Вінниця : ФОП Корзун Д. Ю., 2014. 252 с.

44. Назаренко І. І., Польчина С. М., Нікорич В. А. Ґрунтознавство : підручник для студентів вищих навчальних закладів. Чернівці : Книги – ХХІ, 2004. 400 с. ISBN 966-8029-45-3.
45. Тонха О. Л. ВІДНОВЛЕННЯ БІОЛОГІЧНОЇ АКТИВНОСТІ І ГУМУСНОГО СТАНУ ЧОРНОЗЕМІВ ТИПОВИХ І ЗВИЧАЙНИХ УКРАЇНИ : дис. ... д-ра с.-г. наук : 06.01.03 агрогрунтознавство і агрофізика / Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2016. 370 с.
46. Цапко Ю. Л., Водяк Я. М. Changes in Soil Parameters as a Result of Growing of *Miscanthus x Giganteus*. *Journal of Mountain Agriculture on the Balkans*. 2021. Т. 24. С. 377–389. ISSN 2367-836.
47. Черниш Є. Ю. НАУКОВІ ЗАСАДИ ЕКОЛОГО-СИНЕРГЕТИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ПРОЦЕСУ УТИЛІЗАЦІЇ ФОСФОГІПСУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 екологічна безпека / Сумський державний університет. Суми, 2019. 463 с.