

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри молекулярної біотехнології та біоінформатики
доцент Нипорко Олексій Юрійович
Протокол № ____ засідання кафедри
від “ ____ ” _____ 20__ р.

**ВПЛИВ БІОПРЕПАРАТІВ НА ОСНОВІ ҐРУНТОВОЇ
АЗОТФІКСУЮЧОЇ ЦΙΑНОБАКТЕРІЇ НА РІСТ І РОЗВИТОК РОСЛИН,
ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ У ФІТОРЕКУЛЬТИВАЦІЇ
ШЛАМОСХОВИЩ**

Випускна кваліфікаційна робота магістра
студентки спеціальності
162 Біотехнології та біоінженерія
ОП «Високі технології (біотехнологія)»
Нестеренко Марії Володимирівни

Науковий керівник від кафедри
к.б.н., доцент **Футорна Оксана Андріївна**

Робота виконана у Відділі фітогормонології Інституту ботаніки ім. М.Г.
Холодного НАН України під керівництвом к.б.н., старшого наукового
співробітника Романенко К.О.

Оцінка захисту роботи

Київ – 2024 р.

АНОТАЦІЯ

Нестеренко М.В. Вплив біопрепаратів на основі ґрунтової азотфіксуючої ціанобактерії на ріст і розвиток рослин, що використовуються у фіторекультивациї шламосховищ. – Випускна кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 162 Біотехнології та біоінженерія ОП «Високі технології (біотехнологія)».

Було досліджено вплив біопрепаратів на основі ґрунтової азотфіксуючої ціанобактерії *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet & Flahault на ріст і розвиток рослин жита (*Secale cereale* L.) та сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), що використовуються у фіторекультивациї шламосховищ. Вперше визначені ефективні концентрації біопрепаратів на основі азотфіксуючої ціанобактерії *N. commune* для праймування насіння рослин-рекультиваторів, що стимулює їх проростання, ріст і розвиток та фотосинтетичну активність у складних умовах шламового середовища. Результати показали, що найбільш ефективним для стимулювання проростання насіння жита є 25-% розчин продуктів життєдіяльності *N. commune*, а для насіння сорго – 25-% розчин продуктів життєдіяльності *N. commune* та жива культура *N. commune*. Біопрепарат на основі живої культури *N. commune* пришвидшує ріст і розвиток молодих проростків жита та сорго на шламі, суттєво підвищує вміст фотосинтетичних пігментів у рослин, вирощених на шламі та є найбільш ефективним для попереднього праймування насіння жита та сорго. Отримані результати можуть бути використані у розробці агробіотехнологічних підходів використання синьозелених водоростей для праймування рослин-рекультиваторів, що сприятиме підвищенню їхньої продуктивності та екологічної стійкості у фіторекультивацийних системах шламосховищ.

Ключові слова: шлам, *Nostoc commune*, жито, сорго, праймування насіння.

ABSTRACT

Nesterenko M. V. Effect of biopreparations based on soil nitrogen-fixing cyanobacteria on the growth and development of plants used in phytoremediation of sludge collectors. – Master’s qualification work in the programme subject area 162 Biotechnology and bioengineering in the educational programme «High technologies (biotechnology)».

Effect of biopreparations based on soil nitrogen-fixing cyanobacterium *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet & Flahault on the growth and development of rye (*Secale cereale* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) plants used in phytoremediation of sludge collectors was researched. Effective concentrations of biopreparations based on the nitrogen-fixing cyanobacterium *N. commune* for seed priming of phytoremediation plants were determined for the first time. Seed priming stimulates germination, growth and development, and photosynthetic activity of phytoremediation plants in difficult sludge environments. The results showed that a 25%-solution of metabolic byproducts of *N. commune* is the most effective for stimulating the germination of rye seeds. A 25%-solution of metabolic byproducts of *N. commune* and live culture of *N. commune* are the most effective for stimulating the germination of sorghum seeds. The biopreparation based on the live culture of *N. commune* accelerates the growth and development of young seedlings of rye and sorghum on sludge, significantly increases the content of photosynthetic pigments in plants grown on sludge, and is the most effective for priming of rye and sorghum seeds. These results can be used in the development of agrobiotechnological approaches to the use of blue-green algae for priming of phytoremediation plants, which will increase their productivity and environmental sustainability in phytoremediation systems of sludge collectors.

Keywords: sludge, *Nostoc commune*, rye, sorghum, seed priming.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	9
1.1. Шламові відходи: характеристика та забезпечення екобезпеки...	9
1.1.1. Загальна характеристика шламових відходів.....	9
1.1.2. Сучасні методи консервації та утилізації шламових відходів.	11
1.1.3. Негативний вплив шламових відходів на навколишнє середовище та здоров'я населення.....	13
1.1.4. Способи покращення екологічного стану територій при зберіганні шламових відходів.....	14
1.2. Ціанобактерії - ефективний біоресурс для підтримки екосистеми..	18
1.2.1. Ціанобактерії як члени ґрунтового мікробіому.....	18
1.2.2. Функціональні особливості ціанобактерій.....	19
1.2.3. Біотехнологічний потенціал ціанобактерій.....	21
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	25
2.1. Обладнання та реактиви.....	25
2.2. Матеріали.....	25
2.3. Обробка насіння біопрепаратами Nostoc-L та Nostoc-M.....	28
2.4. Енергія проростання, лабораторна схожість, швидкість та дружність проростання.....	29
2.5. Вирощування жита та сорго на шламі.....	31
2.6. Визначення вмісту пігментів.....	31
2.7. Статистичний аналіз даних.....	32
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ.....	34
3.1. Показники проростання насіння жита та сорго за обробки біопрепаратами на основі ціанобактерії <i>Nostoc commune</i>	34
3.2. Ростові характеристики жита та сорго, вирощених на шламі, за обробки біопрепаратами на основі ціанобактерії <i>Nostoc commune</i>	42

3.3. Вміст фотосинтетичних пігментів жита та сорго, вирощених на шламi, за обробки біопрепаратами на основі ціанобактерії <i>Nostoc commune</i>	49
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ВСТУП

Внаслідок техногенного впливу та довготривалого видобутку корисних копалин в Україні відбулися значні зміни довкілля і перетворення природних комплексів на природно-техногенні. У процесі видобутку разом з корисними копалинами вилучаються і відвальні шахтні породи. Відходи гірничодобувної промисловості накопичуються в хвостосховищах у вигляді рудничних шламів, відпрацьованого гірничого відвалу та інших відходів, що можуть містити різноманітні хімічні речовини та токсичні сполуки [1]. Накопичення шламових відходів має негативний вплив на довкілля та здоров'я населення. Так, відкриті поверхні шламосховищ під впливом вітрових потоків виділяють велику кількість пилу, що забруднює атмосферне повітря житлових масивів, викликає у людей патології дихальних шляхів і осаджується на великих площах сільськогосподарських угідь, роблячи їх непридатними для використання [2].

Для усунення пилових викидів, відновлення родючості порушених земель та покращення навколишнього середовища проводять заходи з фіторекультивациі шламосховищ, найчастіше використовуючи злакові культури, через їхню здатність до швидкого розвитку кореневої системи [3]. Пошук способів підвищення росту і стресостійкості рослин, залучених у фіторекультивацию шламосховищ, є особливо актуальним.

Чисельні дослідження підтверджують, що ґрунтові азотфіксуючі ціанобактерії мають позитивний вплив на життєдіяльність вищих рослин на всіх стадіях їхнього розвитку та підвищують стресостійкість рослин до абіотичних і біотичних факторів [4]. Ґрунтові ціанобактерії здатні фіксувати атмосферний азот, підвищувати доступність поживних речовин для рослин, покращувати структуру ґрунту та утримувати воду [5-8]. Вони також можуть стимулювати ріст рослин шляхом вивільнення біологічно активних сполук (білків, вітамінів, вуглеводів, амінокислот та фітогормонів) [9]. Через це сьогодні ціанобактерії є популярними об'єктами в біотехнології та вже

активно використовуються в таких сферах, як сільське господарство, біотестування, біоремедіація, виготовлення харчових продуктів та кормів, косметологія та фармацевтична промисловість [9-14]. Використання біопрепаратів на основі ґрунтових азотфіксуєуючих ціанобактерій для підвищення росту і стресостійкості рослин, залучених у фіторекультивуацію шламосховищ, є новим і актуальним методом у вирішенні проблем екологічного відновлення територій, що постраждали від гірничодобувної промисловості.

Метою даної роботи є дослідження впливу біопрепаратів на основі ґрунтової азотфіксуєуючої ціанобактерії *N. commune* на ріст і розвиток жита та сорго, які використовуються у фіторекультивуації шламосховищ.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

1. Підібрати ефективні концентрації біопрепаратів на основі *N. commune* для праймування насіння жита та сорго.
2. Визначити показники проростання насіння за умови праймування насіння сорго та жита різними концентраціями біопрепаратів на основі *N. commune*.
3. Дослідити морфологічні особливості росту та розвитку молодих проростків жита та сорго, вирощених на шламi, насіння яких було запраймовано ефективними концентраціями біопрепаратів на основі *N. commune*.
4. Визначити вміст фотосинтетичних пігментів у молодих проростків жита та сорго, вирощених на шламi, насіння яких було запраймовано ефективними концентраціями біопрепаратів на основі *N. commune*.

Об'єкт дослідження – рослини жита (*Secale cereale* L.) та сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).

Предмет дослідження – показники проростання насіння жита та сорго, за умов праймування різними концентраціями біопрепаратів на основі

грунтової азотфіксуючої ціанобактерії *Nostoc commune*; морфометричні показники росту і розвитку 14-добових сорго та жита, вирощених на шламі із праймованого насіння; вміст фотосинтетичних пігментів в паростках жита та сорго, вирощених на шламі із праймованого насіння.

Методи дослідження: метод праймування насіння, методи кількісного обліку проростання насіння; методи морфометричного аналізу; спектрофотометричні методи; методи статистичного аналізу.

Новизна роботи. Вперше визначені ефективні концентрації біопрепаратів на основі азотфіксуючої ціанобактерії *N. commune* для праймування насіння рослин-рекультиваторів, що стимулює їх проростання, ріст і розвиток та фотосинтетичну активність у складних умовах шламового середовища.

Практичне значення роботи. Отримані результати можуть бути використані у розробці агробіотехнологічних підходів використання синьозелених водоростей для праймування рослин-рекультиваторів, що сприятиме підвищенню їхньої продуктивності та екологічної стійкості у фіторекультиваційних системах шламосховищ.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Шламові відходи: характеристика та забезпечення екобезпеки

1.1.1. Загальна характеристика шламових відходів

Шлам – це дисперсні тверді неорганічні відходи, які утворюються в результаті технологічних процесів на металургійних, хімічних та інших виробництвах і які в суміші з водою мають текучу властивість [15]. Він утворюється при бурінні гірських порід (з використанням води чи промивного розчину) або подрібненні корисних копалин у водному середовищі (перед збагачуванням їх, при підготовці сировини у цементному і керамічному виробництві). Шлами мають слабо лужну реакцію, характеризуються відсутністю гумусу і біофільних елементів, підвищеним вмістом хлоридів [1]. Існують такі різновиди шламів:

1) Рудний шлам – це відходи видобутку та збагачення залізної руди, які утворюються в результаті механічного роздрібнення залізорудної сировини на гірничо-збагачувальних комбінатах [16]. За гранулометричним складом – це зв'язний пісок, або супісок із вмістом фізичної глини 6-13 % [16]. В рудному шламі переважають фракції дрібного піску (25-29,2 %), крупного піску (56,9-63,9 %). Рудний шлам містить значну частку заліза – 35-65 %, а також інші компоненти у вигляді оксидів, карбонатів заліза, вуглецю, флюсів тощо, які забезпечують високу ефективність при їх утилізації [16].

2) Металургійний шлам – це відходи технологічних процесів металургійного виробництва [17]. До таких відходів відноситься окалина – продукт високотемпературного окислення металу, що являє собою лускоподібні частинки різної товщини і розміру, що містять оксиди заліза FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 [18].

3) Вугільний шлам – це вуглевмісні продукти крупністю менше 0,5-1 мм [19]. Залежно від місця утворення, відзначають первинні (надходять на фабрику із рядовим вугіллям) та вторинні (утворюються під час процесу збагачення) вугільні шлами [19].

4) Буровий шлам є одним із видів відходів, які утворюються при експлуатації нафтових родовищ [20]. Це порода, яка подрібнюється породоруйнуючим інструментом та піднімається на поверхню буровим розчином у вигляді текучо-пластичної пастоподібної маси. Буровий шлам містить важкі метали, незначну кількість нафтопродуктів, синтетичні поверхнево-активні речовини, карбоксиметилцелюлозу, синтетичні органічні речовини тощо [21].

5) Червоний шлам – це тверда або пастоподібна суміш відходів, яка утворилася внаслідок виділення оксиду алюмінію (Al_2O_3) з бокситів [22]. Також червоний шлам містить оксиди заліза (Fe_2O_3), титану (TiO_2), кремнію (SiO_2), кальцію (CaO), натрію (Na_2O) та елементи-домішки: купрум (Cu), берилій (Be), бор (B), сульфур (S), кобальт (Co), галій (Ga), скандій (Sc), лантан (La), церій (Ce), молібден (Mo), ітрій (Y), нікель (Ni) [23]. Шлам характеризується сильно лужним середовищем (pH 11-13) [24].

6) Осад стічних вод – це твердий або напівтвердий залишок, який залишається після очищення стічних вод [25]. Осад стічних вод є складною гетерогенною сумішшю мікроорганізмів, неперетравлених органічних речовин (таких як целюлоза), рослинних залишків, неорганічного матеріалу, піску. Він є джерелом органічних речовин, азоту, фосфору, мікроелементів і важких металів [26]. Осад стічних вод може бути використаний як ресурс для виробництва біопалива, водню, синтез-газу, біомасла, біодизеля, біопластику, біопестицидів, білків, ензимів, біодобрив [26].

1.1.2. Сучасні методи консервації та утилізації шламових відходів

Незважаючи на наявність розроблених технологій утилізації відходів, рівень їх використання все ще залишається досить низьким. Особливе значення в проблемі охорони довкілля займають питання зберігання відходів [27]. Основні способи зберігання, складування та консервації шламових відходів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Методи консервації шламових відходів

Метод	Опис
Зберігання відходів у шламонакопичувачах (хвостосховищах)	Зберігання у гідротехнічних спорудах, які призначені для складування або захоронення радіоактивних, токсичних та інших відвальних відходів, зневоднення, суха укладка, закріплення в'язучими матеріалами, збільшення об'єму шламонакопичувачів.
Складування відходів в об'єми виробок	Захоронення або закладка відходами кар'єрів і ярів. Захоронення відходів під поверхнею землі дозволяє зменшити забруднення земної поверхні, зменшити відчуження цінних земель.
Складування відходів у глибинах моря	Захоронення спресованих відходів у тюки або брикети у глибини моря через трубопроводи, судна, баржі, контейнери.
Зберігання радіоактивних відходів	Трансмутація вихідних радіонуклідів у короткоживучі, видалення радіоактивних відходів у глибокі геологічні формації або космічний простір, захоронення в льодовому покриві, в осадові формації океанічного дна

Для більшості видів відходів на даний час розроблені і частково реалізуються економічно ефективні технології їхньої утилізації. Методи, які застосовуються при переробці відходів, можна поділити на чотири основні групи: механічні, термічні, методи збагачування, фізико-хімічні.

1) Механічна обробка включає методи дроблення та подрібнення для зменшення розмірів матеріалу, змішування для виготовлення багатокomпонентних сумішей, а також класифікації та сортування для розділення матеріалів по фракціях за крупністю [28].

2) Термічні методи включають різні способи піролізу відходів пластмас, деревини, гумовотехнічних виробів, шлаків нафтопереробки, переплавки відвальних металургійних шлаків, відходів термопластмас, металобрухту, способи випалювання деяких шлаків кольорової металургії, піритних огарків, шлаків і пилу, що містять залізо, спалювання багатьох видів твердих відходів на органічній основі [28].

3) Метод збагачування – це сукупність процесів первинної переробки твердої сировини з метою вилучення продуктів, придатних для подальшої технологічно можливої та економічно доцільної переробки [29]. У результаті збагачування одержують два основних продукти: концентрат і хвости. Найбільш поширеними методами збагачування є гравітаційні методи, метод флотації, магнітна та електрична сепарація [29].

4) Фізико-хімічні методи утилізації твердих відходів включають методи екстрагування (вилуговування), розчинення та кристалізації [30]. Метод екстрагування полягає у вилученні одного або декількох компонентів із комплексного твердого матеріалу при його вибіркового розчиненні в рідині-екстрагенті [30]. Метод розчинення полягає в гетерогенній взаємодії твердої речовини та рідини з переходом твердої речовини в розчин. Метод кристалізації – виділення твердої фази у вигляді кристалів із насичених та перенасичених розчинів, розплавів або пари [30].

1.1.3. Негативний вплив шламових відходів на навколишнє середовище та здоров'я населення

Найбільшу кількість відходів накопичують підприємства гірничодобувних, металургійних та теплоенергетичних галузей. Накопичення цих відходів суттєво порушує екологічну рівновагу, стає джерелом навколишнього забруднення. Гірничо-видобувна промисловість створює екологічні ризики, такі як вимивання солей, самозаймання, отруйні випаровування та стоки, радіоактивне забруднення довкілля, погіршують умови мешкання людей, є причиною значного пилоутворення та перенесення пилу на великі відстані [2]. Відкриті поверхні сухих хвостосховищ під впливом вітрових потоків виділяють велику кількість пилу, що забруднює атмосферне повітря житлових масивів і осаджується на значних площах сільськогосподарських угідь. Дрібнодисперсні фракції хвостосховищ є джерелом пилу, який викликає у людей захворювання на силікоз та інші патології дихальних шляхів [2]. Металургійна галузь, яка накопичує сталеплавильні, доменні та феросплавні шлаки, а також червоні шлами глиноземного виробництва, викидає в атмосферу димові та аерозольні частки. Це призводить до збільшення вмісту у ґрунтах та водоймах розчинних сполук важких металів, таких як цинк, свинець, ртуть, хром та інші, а також фенолів, сульфатів і хлоридів [31].

В Україні велику загрозу становлять шламосховища Миколаївського глиноземного заводу, де щорічно накопичується 1,2 млн тон червоних шлаків, призводячи до потенційних техногенних катастроф. За офіційними даними за 2012 рік, на території заводу сталися два випадки розпилення шламу зі шламосховища [24]. Під час шквальних вітрів частки шламу розносилися на великі відстані. Проте, через відсутність фінансування досліджень, оцінка комплексного впливу шлаків на навколишнє середовище ускладнена. Тим не менш, звіт санітарного департаменту Угорщини за 2010 рік підтверджує, що червоний шлам може призводити до знищення рослин,

шкодити водному середовищу та спричиняти серйозні проблеми здоров'ю людей [23].

Також серйозною загрозою для навколишнього середовища та здоров'я населення є бурові шламові відходи. Аналіз водної витяжки бурового відходу виявив присутність таких небезпечних елементів, як титан, хром, залізо, нікель та мідь [32]. Ці елементи представляють ризик для біоти. Мідь та хром віднесені до другого класу небезпеки для ґрунтів, а нікель – до першого. При наявності у підземних водах вони входять до третього класу небезпеки. Хром і нікель є канцерогенами з різними властивостями, такими як мутагенність, пошкодження хромосом, порушення репарації ДНК і т.д. Вони викликають рак легень, органів шлунково-кишкового тракту і носової порожнини [33].

1.1.4. Способи покращення екологічного стану територій при зберіганні шламових відходів

З метою зменшення негативного впливу на навколишнє природне середовище підприємств гірничо-видобувної галузі необхідно вживати заходів щодо ліквідації або рекультивації відвалів гірничої маси [3]. Метод рекультивації земель застосовується у випадках, коли ліквідація відвалів є неможливою. Мета рекультивації полягає у відновленні рівня родючості гірських порід хвостосховищ, формуванні природного ґрунтового профілю та розвитку рослинного покриву під час фітомеліорації гірських порід [34].

Біологічні методи закріплення пилових поверхонь мають високу пилоутримуючу здатність, не призводять до вторинного забруднення довкілля, не виявляють токсичної дії і можуть бути застосовані в широкому діапазоні екологічних умов [35]. Агротехнічні заходи по створенню стійких насаджень прості у виконанні і економічно вигідні. Рослини, що рекомендуються для створення насаджень на порушених землях, витримують значні перепади вологості, однаково добре ростуть у вологому і сухому середовищі, витримують значне засолення субстратів; зростають без

внесення додаткових субстратів, мають високу біологічну активність (самовідновлюються насіннєвим і вегетативним шляхом) [35].

Рекультивация земель на шламосховищах складається з трьох етапів: підготовчого, технічного і біоекологічного [36]. Під час підготовчого етапу проводять обстеження і типізацію земель, вивчення властивостей розкритих порід, визначення напрямів і методів рекультивации [36]. Під час технічної рекультивации проводять роботи щодо підготовки земель для подальшого використання. Цей етап включає зняття, складування і збереження придатних для біоекологічної рекультивации порід, формування відвалів порід, планування і покриття поверхні родючим ґрунтом, засипання і планування деформованих поверхонь, меліоративні та протиерозійні заходи [36]. Одним із поширених шляхів підготовки хвостосховищ до проведення на них біологічної рекультивации є мульчування їхньої поверхні [34]. Мульчування є одним з популярних методів стабілізації поверхонь, що пілять. Для цього використовують органічні речовини рослинного походження, такі як солома, сіно, тирса, кора дерев та ін. [34]. Мульчування покращує водно-фізичні та біологічні характеристики хвостосховищ. Цей метод стабілізує умови вирощування рослин, знижує ризики прояву вітрової та водної ерозії, покращує водну інфільтрацію, умови вологозабезпечення (за рахунок зниження випаровування), температурний режим. Мульчування покращує умови схожості рослин та захищає проростки [34].

Після технічної рекультивации проводять біоекологічну рекультивацию [36]. Методи біологічної рекультивации включають гідропосів трав або фіторекультивацию досліджуваних шламових масивів [24]. Фіторекультивация є одним з найдешевших і найефективніших способів відновлення порушених земель. Біологічна рекультивация шламосховищ має на меті формування рельєфу, наближеного до навколишніх прилеглих територій, ліквідації ерозії земель та забруднення повітряного і водного середовища. Дослідження показали, що для фіторекультивации червоного шламу ключовими критеріями є рН субстрату, ступінь засоленості та

токсичність. Рослини в процесі фіторекультивуваці зменшують рН, нейтралізуючи токсичні солі [37].

Перевагами методу фіторекультивуваці є прискорені темпи закріплення поверхонь, що пилять, і несуттєві витрати на добрива і насіння. Відбір рослин для фіторекультивуваці шламових масивів відбувається за критеріями, такими як надання переваги використанню місцевих видів, підбір видів з широким ареалом розповсюдження, здатність до виживання та росту в місцях з низьким вмістом поживних речовин, високою концентрацією важких металів і підвищеною лужністю субстрату, наявність видів у комерційних розсадниках рослин або можливість малозатратного культивування [24].

Найбільш ефективними фіторекультиваторами показали себе злакові, а також бобові рослини [24]. Для лугових трав, що використовуються в якості рослин-рекультиваторів, велике значення має процес накопичення кореневої маси. На першому місці по накопиченню підземної маси йде костриця червона (*Festuca rubra* L.), за нею в порядку зменшення тонконіг лучний (*Poa pratensis* L.), костриця лучна (*Lolium pratense* (Huds.) Darbysh.), тонконіг альпійський (*Poa alpina* L.), арктагростіс широколиста (*Arctagrostis latifolia* (R.Br.) Griseb.), щучка дерниста (*Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv.) [24].

Рослини мають різну чутливість до вмісту в ґрунті рухомого алюмінію. Високою стійкістю до рухомого алюмінію володіють овес (*Avena*), тимофіївка (*Phleum*), середньою – кукурудза (*Zea*), люпин (*Lupinus*), просо (*Panicum*), чумиза (*Setaria*) [24]. На підставі вивчення процесу природного заростання, досвіду фіторекультивуваці на шламосховищах рекомендовані наступні види водних культур: очерет звичайний (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), рогіз широколистий (*Typha latifolia* L.), рогіз вузьколистий (*Typha angustifolia* L.), куга озерна (*Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla) і бульбокомиш приморський (*Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla) [24]. Встановлено, що ці рослини не тільки невибагливі до умов середовища, а й здатні виживати в умовах інтенсивних промислових забруднень (зокрема, ґрунто-суміші з різним співвідношенням шламу) і при цьому мають

унікальну здатність акумулювати в своїх тканинах розчинені у воді хімічні речовини, таким чином очищаючи ґрунтове середовище. Температура нагріву шламів сонячними променями в зонах, що вкриті рослинністю, в два рази нижче, ніж на відкритих ділянках. З огляду на зниження температури нагріву, шлами менше висушуються і зберігають певний запас вологи, що також знижує запилювання [38]. Попередження розпилювання шламу досягається завдяки зв'язуванню мінеральних часток в межах зміцнюваного шару і екрануванню поверхні від зовнішніх впливів. Ефект зміцнення створюється в результаті з'єднувальної дії продуктів життєдіяльності мікроорганізмів (бактерій, нижчих рослин) або внаслідок армуючої дії кореневої системи рослин [24].

В зв'язку з дефіцитом продуктивної вологи в складі відходів збагачення залізної руди (шламів), для сільськогосподарської рекультивації хвостосховищ бажано використовувати озимі культури, які зможуть використати невеликі запаси продуктивної вологи, що накопичуються шлами хвостосховищ в осінньо-зимовий і ранньовесняний періоди. Серед озимих культур для цієї мети найбільш перспективним є використання озимого жита (*Secale cereale* L.) або озимого тритикале (*Triticosecale* Wittm. ex A. Camus.) [39]. Ці культури не вибагливі до несприятливих умов навколишнього середовища. *S. cereale* краще росте на бідних ґрунтах, ніж більшість зернових культур [39]. *S. cereale* добре використовує поживні речовини з важкорозчинних речовин ґрунту, позитивно реагує на внесення фосфорних добрив, завдяки яким краще розвиваються коренева система і надземні органи, а також ефективніше засвоюється рослинами азот. Коренева система тритикале мичкувата, з добре розвиненими вузловими коренями, проникає у ґрунт на глибину до 1,5 м і глибше [39]. Ці культури за осінній і ранньовесняний періоди встигають розкущитись і сформованою кореневою системою та стеблами міцно утримувати пилюваті частинки шламів хвостосховищ від видування їх вітром.

1.2. Ціанобактерії - ефективний біоресурс для підтримки екосистеми

1.2.1. Ціанобактерії як члени ґрунтового мікробіому

Ціанобактерії – група фотосинтезуючих прокариотів з унікальною фізіологією, широкою екологічною валентністю та пластичністю [40]. Це дозволяє їм домінувати в різноманітних екологічних середовищах існування, включаючи екстремальні: пустелі, гарячі джерела, гіперсолоні та лужні басейни, вулканічні субстрати тощо [41]. Ціанобактерії є найважливішим компонентом не лише водної, а і ґрунтової мікробіоти [42]. Щільність популяцій ціанобактерій при «цвітінні» ґрунту в різних ектопах варіює в межах від 20 до 92 млн клітин/см², а довжина їх ниток може досягати понад 8 км/см² [43]. У посушливих та напівпосушливих регіонах на поверхні ґрунту утворюється біологічна ґрунтова кірка або біокірка, у склад якої разом із водоростями, лишайниками та мохами в тісній асоціації з верхніми міліметрами поверхні ґрунту домінують ціанобактерії [44]. Ціанобактерії часто є першими компонентами біокірки в екстремальних природних умовах, таких як жаркі або холодні середовища з мінімальними опадами і тривалими періодами посухи при високих рівнях сонячної радіації [45]. Колонізуючи поверхню ґрунту, ціанобактерії покращують його родючість шляхом хелатування мінералів, захоплення пилу та фіксації поживних речовин, підготовляючи ґрунт до формування більш складних рослинних і тваринних спільнот [46]. Дослідження показали, що ціанобактерії, синтезуючи позаклітинні полімерні речовини, зв'язують частинки ґрунту, підвищуючи його агрегатну стабільність і зменшуючи ерозійний вплив вітру та води [47]. Збільшення органічної речовини внаслідок фізіологічної активності ціанобактерій підвищує водовідштовхувальні властивості ґрунту і адгезію між його частинками, покращуючи структуру і стабільність ґрунту [48]. Багато досліджень засвідчило, що ціанобактерії поширені в різноманітних природних середовищах, починаючи від полярних районів і закінчуючи

сільськогосподарськими полями. На видовий склад і види-домінанти ґрунтових ціанобактерій впливають не лише тип і склад ґрунту, а його рН, мінеральний та гранулометричний склад [40]. Ґрунтові ціанобактерії сприяють покращенню структури ґрунту та утриманню води, а також стимулюють ріст рослин шляхом підвищення доступності поживних речовин або вивільнення біологічно активних сполук (таких як осмоліти, феноли, білки, вітаміни, вуглеводи, амінокислоти, полісахариди та фітогормони), і можуть діяти як природні біостимулятори та/або пом'якшувати біотичний та абіотичний стреси [49].

Багато представників від мохоподібних до покритонасінних, демонструють симбіотичні взаємодії з різними представниками водоростей, в тому числі і ціанобактеріями [50]. Водорості, що взаємодіють з рослинами, можуть колонізувати їх поверхню, проникати в клітини або тканини рослин, подібно до інших мікроорганізмів, що співпрацюють з рослинами у симбіотичних або мутуалістичних зв'язках. Хорошим прикладом такої взаємодії є колонізація ціанобактеріями *Nostoc sp.* пшениці та рису або *Anabaena sp.* коренів бавовнику [51, 52]. Ціанобактерії можуть проникати у тканину листка через продихи та колонізувати міжклітинний простір, утворюючи петлі та внутрішньоклітинні клубки [53]. На поверхні коренів ціанобактерії демонструють два типи колонізації: утворення нещільних колоній у кореневих волосках та щільних колоній в обмеженій зоні на поверхні кореня [54]. Важливо зауважити, що ціанобактерії сприяють росту та врожайності рослин, а також можуть захищати їх від патогенів та абіотичних стресів [4, 9, 55].

1.2.2. Функціональні особливості ціанобактерій

Функціональні особливості ціанобактерій полягають у продукуванні органічної речовини, N-фіксації, підвищенні доступності фосфору та інших

елементів для рослин, виділенні фітогормонів і токсинів, покращенні фізико-хімічних властивостей ґрунту.

Продукція біологічно активних речовин, що стимулюють ріст і розвиток рослин. Ціанобактерії продукують такі біологічно активні сполуки, як ліпіди, амінокислоти, вітаміни, фітогормони, поліфеноли, полісахариди, сидерофори тощо [9]. Ціанобактерії активно сприяють проростанню насіння, росту та розвитку рослин завдяки своїй здатності виробляти фітогормони (ауксини, цитокініни та гібереліни) [9]. Згідно з дослідженнями, за обробки насіння ціанобактеріями *Nostoc sp.* зростає схожість та енергія проростання, що має важливу роль для процесу формування урожаю рису [9]. Крім того, ціанобактерії виробляють вітаміни груп А, В, С, D, Е [56]. *Arthrospira platensis* здатна накопичувати велику кількість токоферолів (вітамін Е) [57].

Продукція інгібуючих речовин. Ґрунтові ціанобактерії інгібують розмноження інших мікроорганізмів, зокрема патогенів, за рахунок виділення токсинів [58]. Токсини можуть бути білками, алкалоїдами, гетероциклічними сполуками [59]. Токсини багатьох видів ціанобактерій проявляють бактерицидний, фунгіцидний та альгіцидний ефект [60, 61]. Наприклад, *Nostoc commune* має фунгіцидну активність за рахунок синтезу ностофунгіцидину [62]. *Fisherella sp.*, *Oscillatoria sp.* та *Anabaena sp.* пригнічує ріст мікроміцетів, грамнегативних і грампозитивних бактерій [58]. Деякі ціанобактерії утворюють токсини, згубні для тварин і людини, наприклад, нейротоксини [63].

Фіксація азоту. Основним джерелом азоту в ґрунті є біологічна фіксація атмосферного азоту мікроорганізмами (нітрогенфіксація) [5]. Нітрогенфіксація пов'язана з активністю ферментного комплексу нітрогенази, яка локалізована в спеціалізованих клітинах – гетероцистах [5]. *Nostoc linkia*, *Anabaena variabilis*, *Aulosira fertilissima* та *Calothrix sp.* є найбільш ефективними ціанобактеріями у фіксації атмосферного азоту в ґрунті [5].

Підвищення доступності фосфору. Ціанобактерії перетворюють фосфатні добрива в доступну для рослин форму. Це відбувається за допомогою ферментів фосфатаз, які перетворюють нерозчинні фосфати на розчинні форми [6]. Тому ціанобактерії полегшують засвоєння фосфору рослинами.

Покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту. У верхній кірці ґрунту ціанобактерії продукують екзополісахариди та позаклітинні полімери. Ці сполуки покращують фізико-хімічні властивості ґрунту [7]. Також слиз, який виділяють ціанобактерії, сприяє утриманню та агрегації ґрунтових частинок, таким чином зміцнюючи структуру ґрунту [7]. Крім того, ціанобактерії мають протиерозійне значення і сприяють збереженню вологи в ґрунті [8].

1.2.3. Біотехнологічний потенціал ціанобактерій

Завдяки своїм корисним властивостям та виробленню біологічно активних сполук ціанобактерії є популярними об'єктами в біотехнології. Ціанобактерії активно використовуються в таких сферах, як сільське господарство, біотестування, біоремедіація, виготовлення харчових продуктів та кормів, косметологія та фармацевтична промисловість [9-14].

Ціанобактерії як біостимулятори. Ціанобактерії є корисними для родючості ґрунту та врожайності сільськогосподарських культур завдяки здатності фіксувати атмосферний азот, перетворювати нерозчинні фосфати в розчинні форми, виробляти біологічно активні речовини [64]. Біоактивні сполуки ціанобактерій діють як сигнальні молекули, сприяючи росту рослин і синтезу фітогормонів, таких як ауксин, цитокініни, гібереліни, етилен, жасмонова або абсцизова кислоти [65]. Ці речовини впливають на фізіологічні процеси в рослинах, включаючи стимуляцію росту та розгалуження коренів, росту саджанців, цвітіння та дозрівання плодів [66].

Ціанобактерії як біодобрива. Одним з перспективних напрямків у сільському господарстві є розробка біодобрив на основі ціанобактерій, які сприяють засвоєнню поживних речовин (мінеральних добрив) рослинами. Відомо, що внесення біодобрив на основі *Nostoc* spp. підтримує родючість ґрунту на рисових полях та збільшує врожайність рису [9]. Також, *Nostoc* стимулює ріст та врожайність не тільки рису, а також ячменю, огірка, помідорів, червоного буряку, бавовнику, конюшини, кукурудзи і салату [9].

Індукція стресостійкості у рослин. Абіотичний стрес для рослин може бути спричинений такими факторами, як температура, посухи, засолення ґрунтів та наявність важких металів у ґрунті [10]. Ціанобактерії мають велике значення для посилення стійкості рослин до абіотичних стресів. Так, ціанобактерії поглинають та видаляють з ґрунту важкі метали, зменшують негативну дію пестицидів на рослини, підсилюють стійкість рослин до посухи та засолення ґрунтів [4, 9, 67, 68]. Ціанобактерії синтезують та вивільняють сигнальні сполуки (еліситори), які індукують стійкість рослин до стресів та сприяють їхньому росту та розвитку [65]. Сигнальні сполуки впливають на експресію генів рослин і стимулюють накопичення широкого спектру речовин (алкалоїдів, поліфенолів, амінокислот, флавоноїдів, сапонінів), які забезпечують захист рослин від абіотичних стресів [65].

Боротьба з фітопатогенами. Ціанобактерії використовуються для обробки ґрунту і насіння проти фітопатогенних грибів, хвороботворних бактерій та нематод, які викликають серйозні захворювання рослин [10, 55, 66]. Для боротьби з фітопатогенами ціанобактерії використовують такі механізми, як антибіоз; виділення хімічних сполук, які пригнічують ріст і розвиток фітопатогенів; конкуренція за простір і активація захисних реакцій рослин [69]. Ціанобактерії *Oscillatoria* sp. та *Anabaena* sp. пригнічують проростання спор фітопатогенних грибів та активно запобігають поширенню грибкової інфекції [55]. Обприскування *Anabaena minutissima* рослин гарбуза зменшує симптоми борошнистої роси, спричиненої *Podosphaera xanthii* [55]. Ціанобактерії продукують ферменти, які безпосередньо впливають на

клітинну стінку збудника грибкового захворювання рослин. Наприклад, *Anabaena sp.* та *Calothrix elenkinii* продукують хітинази, ендоглюканази та глюкозидази, які руйнують клітинні стінки *Rhizoctonia solani* та *Fusarium solani* [70]. *Anabaena sp.* може конкурувати за місце в ризосфері, утворюючи біоплівки на коренях бавовнику і блокуючи місця інфікування ґрунтових патогенів [71]. *Nostoc muscorum* і *Anabaena oryzae* активують захисні реакції рослин помідорів проти грибкових патогенів шляхом збільшення загального вмісту фенолу та активності ферментів пероксидази, супероксиддисмутази та поліфенолоксидази в листі помідорів [72]. Токсини ціанобактерій здатні руйнувати мембрани хвороботворних бактерій рослин [73]. Наприклад, *Anabaena flos-aquae* повністю пригнічує *Ralstonia solanacearum*, яка викликає хворобу бурої гnilі картоплі [74]. Також ціанобактерії (наприклад, *Arthrospira platensis*) здатні боротися з нематодами шляхом підвищення активності каталази в коренях бананових рослин і стимулювання вироблення жасмонової кислоти в рослинах помідорів [75].

Біотестування. Біотестування з використанням ціанобактерій дозволяє оцінити токсичність ґрунтів, забруднених важкими металами, пестицидами та іншими антропогенними забруднювачами [9, 11]. Біоплівки *N. commune* широко використовуються для оцінки рівня забруднення ґрунтів важкими металами, завдяки короткому часу життя угруповань ціанобактерій та їхній здатності накопичувати важкі метали в організмі [11]. Також біопрепарати на основі *N. commune* використовуються для визначення фітотоксичності ґрунтів, забруднених пестицидами [9].

Використання ціанобактерій в біоремедіації. Ціанобактерії використовуються для очищення води та ґрунтів від різноманітних забруднювачів, таких як важкі метали, пестициди, сира нафта, нафталін, фенол і ксенобіотики. *Anabaena sp.*, *Lyngya sp.*, *Microcystis sp.*, *Nostoc sp.* і *Arthrospira sp.* продемонстрували здатність видаляти гербіциди із забрудненого ґрунту [76]. Також ціанобактерії зменшують надлишок нітратів і фосфатів на сільськогосподарських полях [77]. Ціанобактерії *Anabaena*

variabilis, *Nostoc muscorum*, *Aulosira fertilissima* та *Tolypothrix tenuis* здатні поглинати та видаляти важкі метали, зокрема Cr, Cu, Pb та Zn [67]. Для біоремедіації водойм, забруднених нафтою, використовуються консорціуми ціанобактерій і хемотрофних бактерій, які здатні розкласти компоненти нафти [12].

Використання ціанобактерій для виготовлення харчових продуктів і кормів. Ціанобактерії є джерелом білків, ліпідів, мінералів, антиоксидантів і вітамінів. *Nostoc*, *Arthrospira* та *Anabaena* використовуються як харчові добавки в Перу, Мексиці, Філіппінах і Чилі [78]. Препарати на основі ціанобактерій є комерційно доступними у формі пластівців, порошку, капсул або таблеток. Наприклад, *Arthrospira platensis* використовується в якості харчової добавки, оскільки містить понад 60% білків, є багатим джерелом тіаміну, рибофлавіну, бета-каротину, вітаміну Е та вітаміну B₁₂ [13].

Використання ціанобактерій в косметології та фармацевтичній промисловості. Ціанобактерії використовуються у фармацевтичній та косметичній індустрії. Біоактивні сполуки ціанобактерій є цінними в медицині та косметології. Вони мають антиоксидантні, протизапальні, антикоагулянтні, антитромботичні, протипухлинні, гіпоглікемічні та вологоутримуючі властивості [14]. Відомо, що екстракт *N. commune*, багатий на сульфатовані полісахариди, може бути корисним для розробки ранозагоювальної та протиалергічної косметики, оскільки ці полісахариди здатні ефективно інгібувати прозапальні цитокіни (інтерлейкін-6) та сприяти секреції колагену [14].

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обладнання та реактиви

В роботі було використано наступне обладнання: спектрофотометр Jenway UV-6850 (Великобританія), фітокамера, сушильна шафа, аналітичні ваги, хімічний посуд (чашки Петрі, фільтрувальний папір, фільтри Шотта, пробірки, сэмплери на 5 мл та 200 мкл). Використані реактиви: 70%-розчин етилового спирту, 100 % ацетон для виділення пігментів.

2.2. Матеріали

Біопрепарати Nostoc-L та Nostoc-M розроблені на основі водної культури ґрунтової ціанобактерії *Nostoc commune* компанією «Носток Технолоджі» (м. Київ, Україна). Nostoc-L містить живу біомасу ціанобактерії *N. commune* (рис. 2.1). Цей біопрепарат використовується для обробки насіння сільськогосподарських культур, а також для внесення в ґрунт для покращення його родючості. Nostoc-M – рідке поживне середовище, отримане після вирощування *N. commune* (рис. 2.2). Nostoc-M використовується для позакореневого підживлення рослин. Обидва біопрепарати сертифіковані згідно з міжнародними стандартами компанії «Органік стандарт», що підтверджує їхню придатність для використання в органічному землеробстві [79].



Рис. 2.1. Біопрепарат Nostoc-L (жива культура *N. commune*)



Рис. 2.2. Біопрепарат Nostoc-M (концентрат продуктів життєдіяльності *N. commune*)

Дослідження впливу біопрепаратів Nostoc-L та Nostoc-M на ростові процеси проводили з рослинами жита *Secale cereale* L. сорту Каліпсо та сорго *Sorghum bicolor* (L.) Moench сорту Краєвид. Сорт жита Каліпсо внесений в

державний реєстр в 2020 році, його оригінаторами є Інститут рослинництва ім. В.Я. Юр'єва НААН. Сорт надзвичайно стійкий до вилягання, морозостійкий, має високу посухостійкість, толерантний до основних хвороб [80]. Оригінаторами сорго сорту Краєвид є Інститут зернового господарства Української академії аграрних наук. Сорт характеризується високою кущистістю, коротким вегетаційним періодом, посухо- і морозостійкістю, стійкий до ураження основних хвороб. Насіння жита та сорго цих сортів отримано від науково-технічного відділу Полтавського гірничо-збагачувального комбінату (м. Горішні Плавні, Україна). Шлам також отримано з одного з хвостосховищ Полтавського гірничо-збагачувального комбінату (цех шламового господарства № 2240) (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Зразок шламу, відібраний з хвостосховища Полтавського гірничо-збагачувального комбінату

Хімічний склад шламу, використаний у роботі, наведений у табл. 2.1. Дані про хімічний склад шламу надані співробітниками науково-технічного відділу Полтавського гірничо-збагачувального комбінату (дані від 2022 р.).

Таблиця 2.1.

Хімічний склад шламу (% мас), відібраний з «хвостів» цеху шламового господарства № 2240 Полтавського гірничо-збагачувального комбінату

Fe	SiO ₂	CaO	MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	Гематит	Сидерит	Сидерит
Σ							мартит	силікат	
19,4	66,7	1,2	0,6	0,07	1,16	0,07	3,4	4,5	2,9

2.3. Обробка насіння біопрепаратами Nostoc-L та Nostoc-M

Для обробки насіння жита та сорго в досліді використано біопрепарати Nostoc-L без розведення та Nostoc-M у чотирьох концентраціях 25%, 50%, 75%, 100% у п'ятиразовій повторності для кожного з дослідів. Контролем було насіння, замочене у воді. Об'єми рідин для замочування зернівок представлені в табл. 2.2. Попередньо відкалібровані зернівки жита та сорго стерилізували у 70% розчині етилового спирту, промивали водою і замочували у дистильованій воді, біопрепаратах Nostoc-L та Nostoc-M на 4 години при температурі 23°C. Робочі розчини робили безпосередньо перед обробкою насіння.

Таблиця 2.2.

Об'єми дистильованої води (контролю), розчинів біопрепаратів Nostoc-L та Nostoc-M при обробці зернівок жита та сорго

Розчини	Об'єм
Контроль (К)	100 мл
25 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	25 мл біопрепарату Nostoc-M з розведенням водою до 100 мл

50 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	50 мл біопрепарату Nostoc-M з розведенням водою до 100 мл
75 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	75 мл біопрепарату Nostoc-M з розведенням водою до 100 мл
100 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	100 мл біопрепарату Nostoc-M без розведення водою
Біопрепарат Nostoc-L	100 мл

2.4. Енергія проростання, лабораторна схожість, швидкість та дружність проростання

Вплив обробки насіння біопрепаратами Nostoc-L та Nostoc-M на енергію проростання (%), швидкість (кількість діб) та дружність (%) проростання, лабораторну схожість (%) жита та сорго проводили в чашках Петрі на фільтрувальному папері в два шари. В кожну чашку поміщали по 10 насінин жита сорту Каліпсо та сорго сорту Краєвид та додавали по 20 мл води. Перші три дні насіння пророщували в термостаті за температури 23°C, а в наступні дні – в фітокамері за температури 23-24 °C, інтенсивності освітлення 690 мкмоль/(м²·с), фотоперіоду 16/8 год (день/ніч), відносної вологості повітря 75±5%. Енергію проростання та лабораторну схожість визначали у відповідності до ДСТУ 4138 (2002) [81] для кожної культури. Облік енергії проростання жита та сорго проводили на 4-й день експерименту. Облік схожості насіння жита проводили на 7-й день експерименту, насіння сорго – на 10-й день. Енергію проростання (%) та лабораторну схожість (%) насіння вираховували за формулами 2.1, 2.2, 2.3 та 2.4 [82].

$$E_{\text{жито}} = n_1 (\text{жито}) \div N_{\text{жито}} \times 100 \quad (2.1)$$

$$E_{\text{сорго}} = n_1 (\text{сорго}) \div N_{\text{сорго}} \times 100 \quad (2.2)$$

$$C_{\text{жито}} = n_2 (\text{жито}) \div N_{\text{жито}} \times 100 \quad (2.3)$$

$$C_{\text{сорго}} = n_{2(\text{сорго})} \div N_{\text{сорго}} \times 100, \quad (2.4)$$

де $E_{\text{жито}}$ – енергія проростання насіння жита, %;

$E_{\text{сорго}}$ – енергія проростання насіння сорго, %;

$C_{\text{жито}}$ – схожість насіння жита, %;

$C_{\text{сорго}}$ – схожість насіння сорго, %;

$n_{1(\text{жито})}$ – кількість насіння жита, пророслого на 4-й день після висіву, шт.;

$n_{1(\text{сорго})}$ – кількість насіння сорго, пророслого на 4-й день після висіву, шт.;

$n_{2(\text{жито})}$ – кількість насіння жита, пророслого на 7-й день після висіву, шт.;

$n_{2(\text{сорго})}$ – кількість насіння сорго, пророслого на 10-й день після висіву, шт.;

$N_{\text{жито}}$ – загальна кількість висіяного насіння жита, шт.;

$N_{\text{сорго}}$ – загальна кількість висіяного насіння сорго, шт.

Для визначення швидкості проростання підраховували середню кількість днів, необхідних для проростання; для визначення дружності проростання – середню кількість насінин, що проростала протягом однієї доби [83, 84]. Щодоби підраховували кількість пророслого насіння жита протягом 7 днів та насіння сорго протягом 10 днів, потім розраховували швидкість проростання насіння (діб) відповідно до формули Піпера (формула 2.5) [84]:

$$A = K_1 \times S_1 + K_2 \times S_2 + \dots + K_m S_m / K_1 + K_2 + K_m, \quad (2.5)$$

де A – середня швидкість проростання насіння, діб;

K – кількість пророслих насінин за добу у дні підрахунку;

m – кінцевий день підрахунку;

S – строки проростання.

Дружність проростання (%) розраховували за формулою 2.6 [83]:

$$D = C \div П, \quad (2.6)$$

де D – дружність проростання, %;

C – кінцева схожість насіння, %;

$П$ – кількість діб проростання.

2.5. Вирощування жита та сорго на шламi

Рослини вирощували в пластикових стаканах об'ємом 0,5 л. На дно стаканчика насипали промитий і прожарений річковий пісок (товщина шару 2 см) та шламу (товщина шару 7 см), змочували водою до вологості субстрату 60 %. У розрахунку на 10 стаканчиків окремо готували наступну суміш: 300 мл дистильованої води, 15 г целюлози, 6 г насіння сорго або 12 г насіння жита попередньо праймованих у воді (контроль), 25-% розчині препарату Nostoc-M та Nostoc-L (без розведення). Підготовлене таким чином насіння разом з целюлозою викладали на поверхню зволоженого субстрату. Рослини вирощували у фітокамері при температурі 23/18 °C (день/ніч), інтенсивності освітлення 690 мкмоль/(м²·с), фотоперіоду 16/8 год (день/ніч), відносної вологості повітря 75±5%, вологість субстрату підтримували на рівні 60 % повної вологоємності. Поливали проростки по мірі підсихання субстрату. Повторність кожного досліді – п'ятикратна.

Ріст і розвиток рослин оцінювався за морфометричними показниками: сира і суха маса, довжина надземної і підземної частини проростків, які визначали на 14 день вирощування жита та сорго на шламi. Для цього в кожному з дослідів відбирали по 30 добре розвинутих 14-денних проростків жита та сорго. Повторність морфометричних вимірів для кожного досліді – трикратна.

2.6. Визначення вмісту пігментів

Фотосинтетичні пігменти визначали у 14-добових проростках жита та сорго, що були вирощені на шламi [85]. Для виділення пігментів наважки біомаси жита та сорго (по 200 мг) розтирали в ступці з 0,5 г скляного піску і

0,5 г Na₂SO₄ (безводного). Розтерту суміш переносили на фільтри Шотта і екстрагували 100% ацетоном до кінцевого об'єму екстракту 3 мл. У кювету вносили 3 мл ацетону і 0,2 мл екстракту. Вимірювання проводили за допомогою спектрофотометра при довжині хвилі 662, 644 і 440,5 нм; контролем слугував ацетон. Повторність вимірів для кожного досліду – трикратна.

Концентрацію пігментів розраховували за формулами 2.7, 2.8, 2.9 та 2.10:

$$C_{X_{лa}} = 9,784 \times E_{662} - 0,990 \times E_{644} \quad (2.7)$$

$$C_{X_{лb}} = 21,426 \times E_{644} - 4,650 \times E_{662} \quad (2.8)$$

$$C_{X_{ла} + X_{лb}} = 5,134 \times E_{662} + 20,436 \times E_{644} \quad (2.9)$$

$$C_K = 4,695 \times E_{440,5} - 0,268 \times (C_{X_{ла}} + C_{X_{лb}}), \quad (2.10)$$

де С – концентрація пігментів у витяжці, мг/л;

Е – оптична густина.

Вміст пігментів у зразку (мг/г сирової речовини) розраховували за формулою 2.11 [86]:

$$A = C \times V \div H \times 1000, \quad (2.11)$$

де С — концентрація пігментів, мг/л;

V — об'єм екстракту, мл;

H — наважка, г.

2.7. Статистичний аналіз даних

Статистичний аналіз даних проводили за допомогою програми Microsoft Excel (Redmond, USA). Отримані результати виражені як середнє арифметичне значення (μ) \pm стандартне відхилення ($\pm\sigma$). Відмінності в середніх значеннях аналізували за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (one-way ANOVA). Критичний рівень значимості під час перевірки

статистичних гіпотез у дослідженні приймався на рівні $P \leq 0,05$. Для розрахунку статистичних показників обсяг вибірки відрізнявся і залежав від виду досліджуваних ознак (енергія проростання, лабораторна схожість, швидкість і дружність проростання, морфометричні показники, вміст фотосинтетичних пігментів) і становив від 3 до 30 вимірів ($n=3$; $n=5$; $n=10$; $n=30$). Експериментальні дані відображали графічно за допомогою програми Microsoft Excel (Redmond, USA).

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Показники проростання насіння жита та сорго за обробки біопрепаратами на основі ціанобактерії *Nostoc commune*

Важливими показниками, що характеризують початковий етап росту насіння, а також його посівні якості, є енергія проростання, лабораторна схожість, дружність та швидкість проростання. Енергія проростання – показник, що характеризує потенційні можливості насіння проростати [83]. Енергія проростання дає повне уявлення про потенційну польову схожість і врожайність насіння, характеризує здатність насіння давати вчасні і дружні сходи. Насіння, яке проростає пізніше оптимального строку для визначення енергії проростання, є баластом, а рослини, які виростають з нього, характеризуються значно нижчою продуктивністю [83]. Схожість насіння (лабораторна) – це визначене в лабораторних умовах відношення кількості пророслого насіння до кількості висіяного, виражене у відсотках [82]. Лабораторна схожість визначає посівні якості насіння і є основною характеристикою його загальної життєздатності [83].

Проведені дослідження показали, що енергія проростання насіння сорго в контролі становила 36 %, насіння жита – 88 % (рис. 3.1). За обробки насіння сорго 25-% розчином біопрепарату Nostoc-M енергія проростання перевищувала контроль на 23 %, а за обробки насіння жита – перевищувала контроль на 5 % (рис. 3.1). За обробки насіння сорго 50 %-розчином біопрепарату Nostoc-M енергія проростання зменшилась на 7 %, за обробки насіння жита – зменшилась на 5 %, порівняно з контролем (рис. 3.1). За

обробки насіння сорго і жита 75 %-розчином біопрепарату Nostoc-M енергія проростання підвищилась на 2 %, порівняно з контролем (рис. 3.1). За обробки 100 %-розчином біопрепарату Nostoc-M енергія проростання сорго і жита не відрізнялась від контролю (рис. 3.1). За обробки насіння сорго біопрепаратом Nostoc-L енергія проростання перевищувала контроль на 13 %, за обробки насіння жита – зменшилась на 9 %, порівняно з контролем (рис. 3.1).

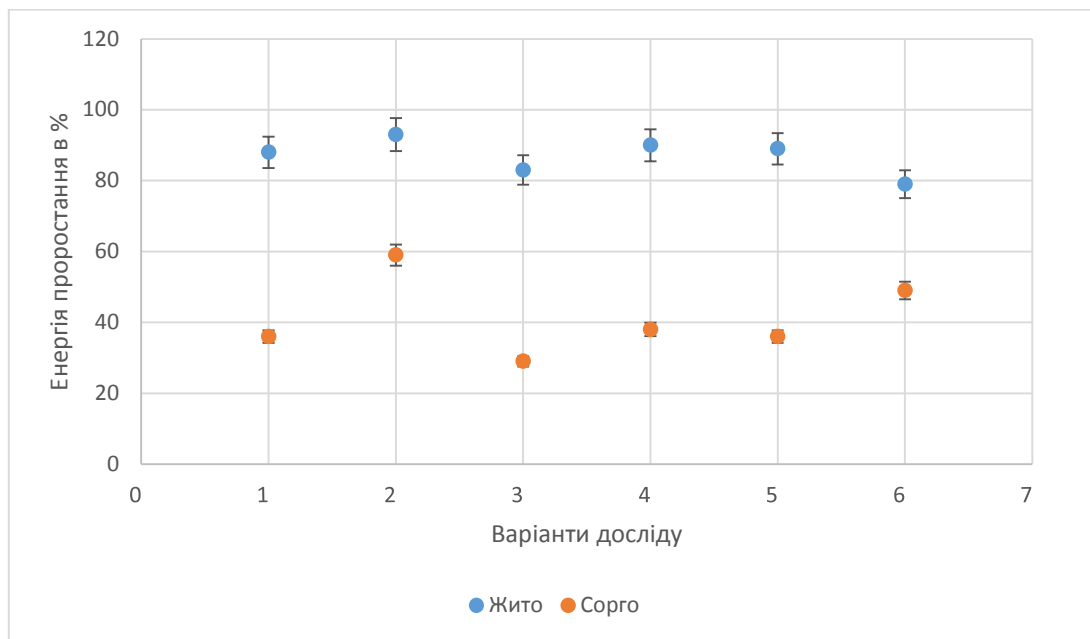


Рис. 3.1. Вплив різних концентрацій біопрепаратів Nostoc-M та Nostoc-L на енергію проростання насіння сорго та жита. 1 – контроль; 2 – 25 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 3 – 50 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 4 – 75 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 5 – 100 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 6 – біопрепарат Nostoc-L (без розведення). Примітка: на рисунку 3.1 представлені середні значення при $n = 10$, планки похибок відображають стандартне відхилення $\pm\sigma$.

Лабораторна схожість насіння жита в контролі становила 89 %, насіння сорго – 41 % (рис. 3.2). За обробки насіння сорго та жита 25-% розчином

біопрепарату Nostoc-M лабораторна схожість перевищувала контроль на 25 % і 2 % відповідно (рис. 3.2).

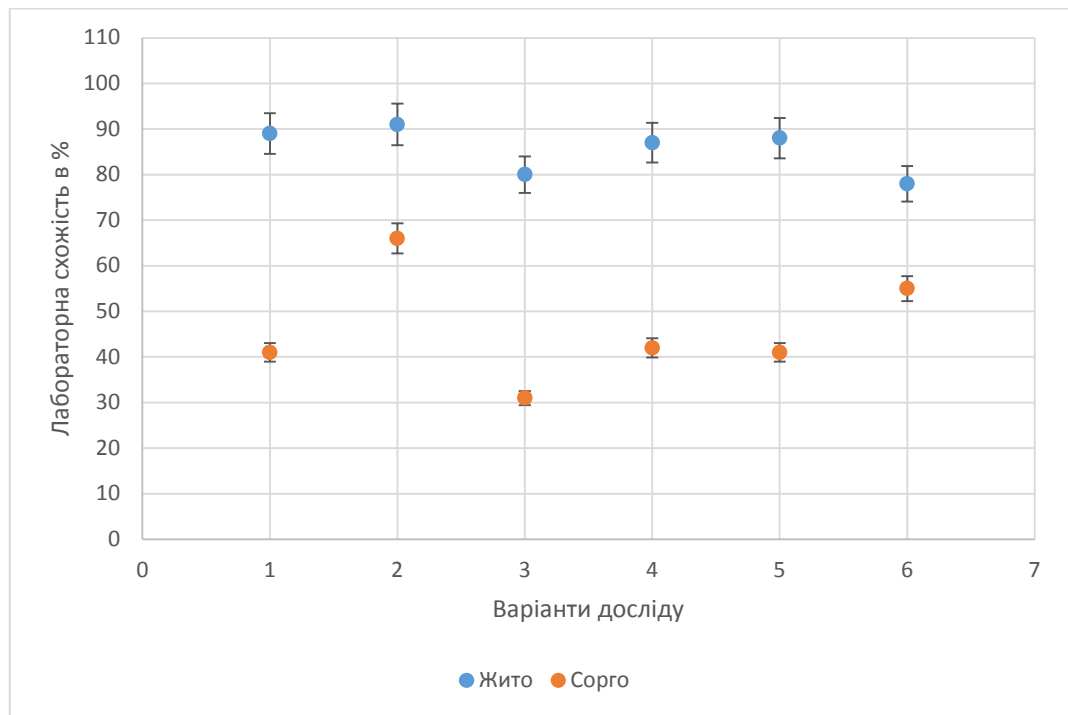


Рис. 3.2. Вплив різних концентрацій біопрепарату Nostoc-M та біопрепарату Nostoc-L на лабораторну схожість насіння сорго та жита. 1 – контроль; 2 – 25 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 3 – 50 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 4 – 75 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 5 – 100 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 6 – біопрепарат Nostoc-L (без розведення). Примітка: на рисунку 3.2 представлені середні значення при $n = 10$, планки похибок відображають стандартне відхилення $\pm\sigma$.

За обробки насіння сорго 50 %-розчином біопрепарату Nostoc-M лабораторна схожість зменшилась на 10 %, за обробки насіння жита – зменшилась на 9 % порівняно з контролем (рис. 3.2). За обробки насіння сорго і жита 75 % та 100 %-розчином біопрепарату Nostoc-M лабораторна схожість не відрізнялась від контролю (рис. 3.2). За обробки 100 %-розчином біопрепарату Nostoc-M лабораторна схожість сорго і жита також не відрізнялась від контролю (рис. 3.2). За обробки насіння сорго біопрепаратом

Nostoc-L лабораторна схожість перевищувала контроль на 14 %, за обробки насіння жита – зменшилась на 11 %, порівняно з контролем (рис. 3.2). Отже проведене нами дослідження показало, що обробка насіння сорго та жита 25%-розчином біопрепарату Nostoc-M підвищує енергію проростання та лабораторну схожість насіння (рис. 3.3, рис. 3.4). Ця концентрація біопрепарату є оптимальною для забезпечення проростання і розвитку обох культур. Також варто зазначити, що обробка насіння біопрепаратом Nostoc-L сприяла позитивній динаміці проростання та схожості сорго, але виявила незначний негативний вплив на жито.

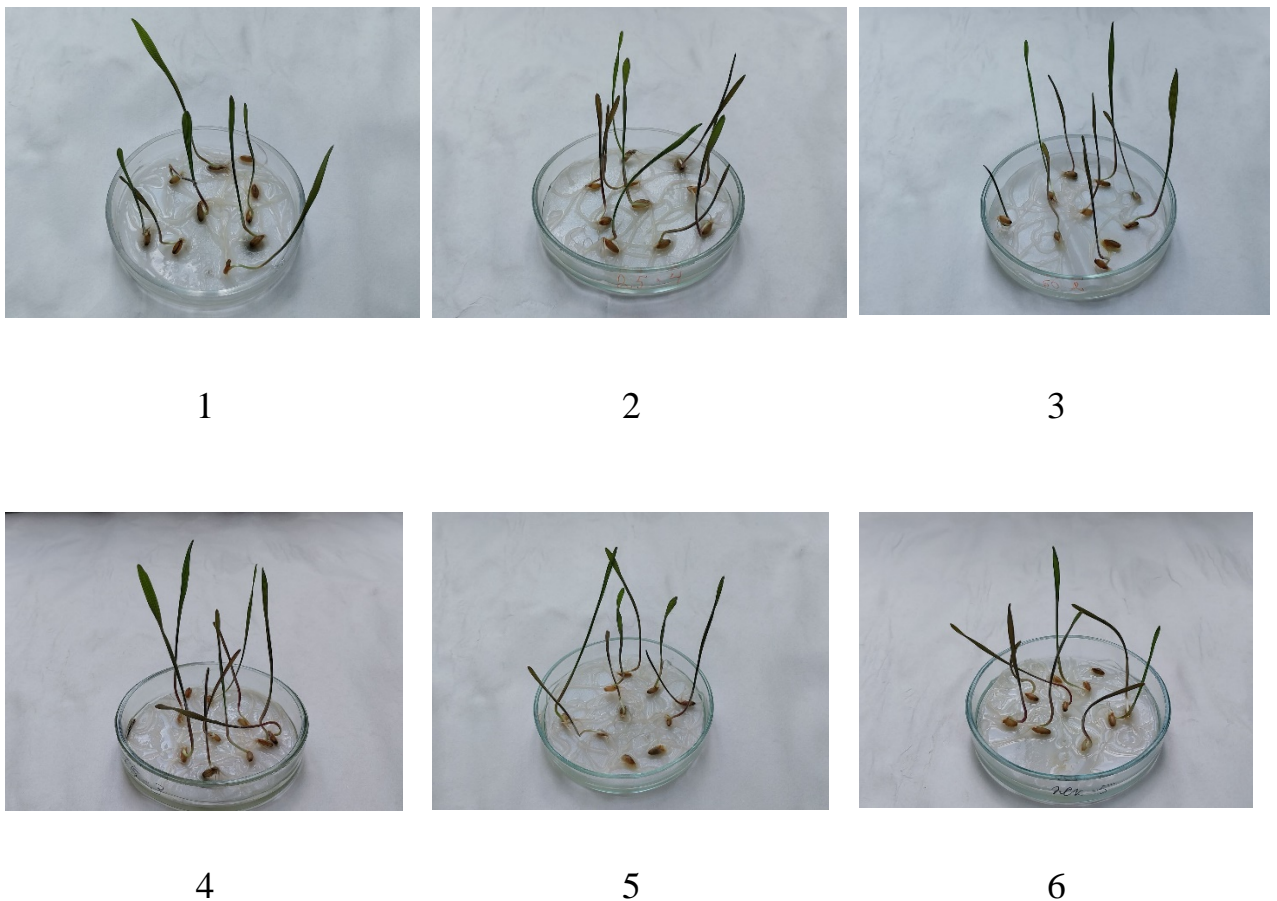


Рис. 3.3. Проростання жита на 7-й день експерименту: 1 – контроль; 2 – 25 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 3 – 50 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 4 – 75 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 5 – 100 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 6 – біопрепарат Nostoc-L (без розведення).

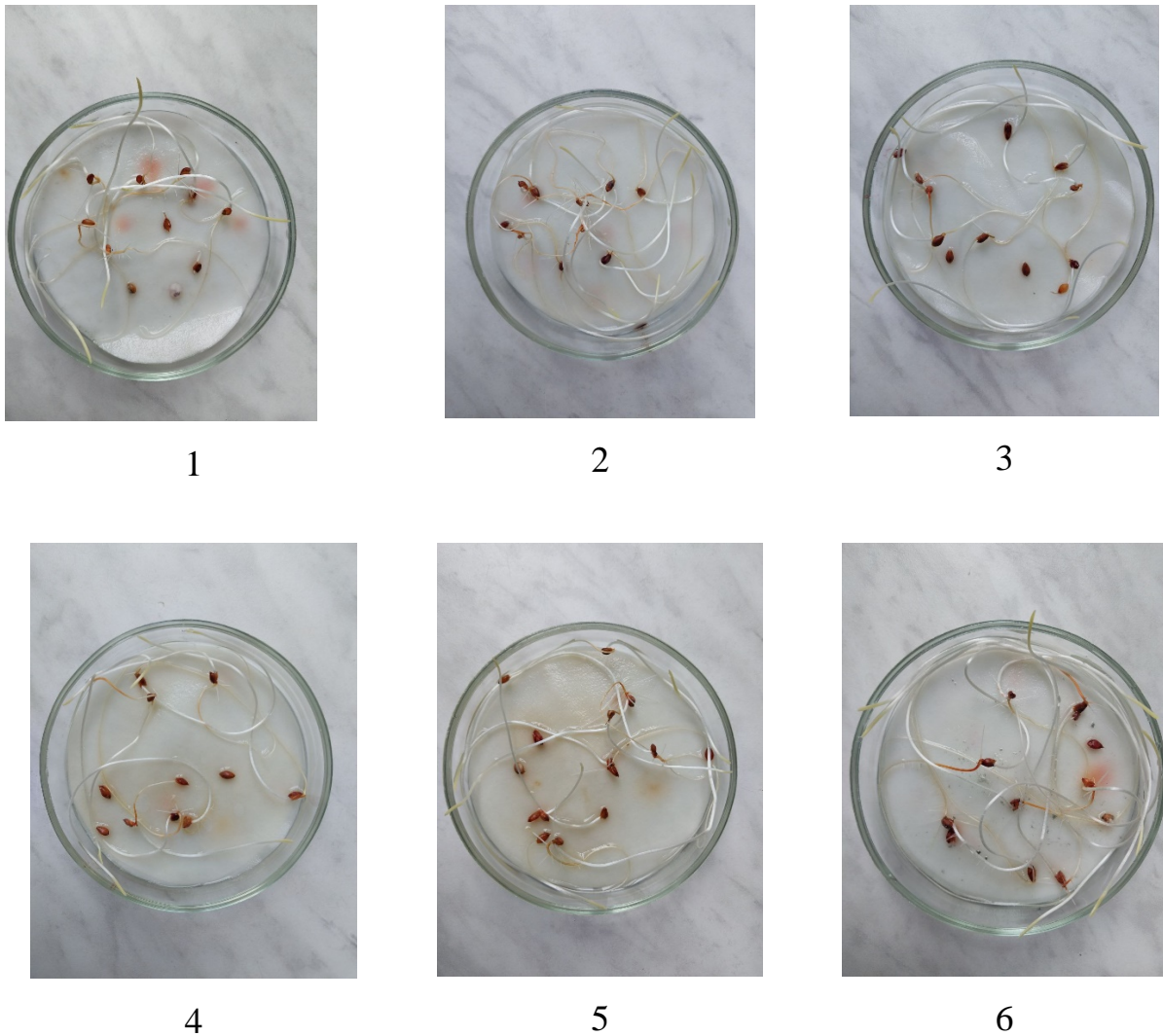


Рис. 3.4. Проростання сорго на 7-й день експерименту: 1 – контроль; 2 – 25 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 3 – 50 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 4 – 75 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 5 – 100 %-розчин біопрепарату Nostoc-M; 6 – біопрепарат Nostoc-L (без розведення).

Також в ході роботи були визначені такі показники якості насіння, як дружність та швидкість проростання насіння жита та сорго за умов обробки різними концентраціями біопрепаратів Nostoc-M та Nostoc-L без розведення. Дружність проростання насіння вказує на рівномірність та одночасність проростання насіння, що є важливим для отримання однорідних сходів і високого врожаю [84]. Швидкість проростання насіння вказує на життєздатність та потенційну врожайність насіння, оскільки швидке

проростання може свідчити про його високу якість та здатність швидко розвиватися після висіву [84].

Дружність проростання насіння жита в контролі становила 13 %/добу, насіння сорго – 5,5 %/добу (табл. 3.1). За обробки насіння сорго 25%-розчином біопрепарату Nostoc-M дружність проростання перевищувала контроль на 3 %/добу, за обробки насіння жита – на 0,3 %/добу (табл. 3.1). За обробки насіння сорго 50 %-розчином біопрепарату Nostoc-M дружність проростання зменшилась на 1,1 %/добу, за обробки насіння жита зменшилась на 1,3 %/добу, порівняно з контролем (табл. 3.1). За обробки насіння сорго 75 %-розчином біопрепарату Nostoc-M дружність проростання була на рівні контролю, за обробки насіння жита – менше на 0,3 %/добу (табл. 3.1). За обробки насіння сорго 100 %-розчином біопрепарату Nostoc-M дружність проростання перевищувала контроль на 0,9 %/добу, за обробки насіння жита – зменшилась на 0,1 %/добу, порівняно з контролем (табл. 3.1). За обробки насіння сорго біопрепаратом Nostoc-L дружність проростання перевищувала контроль на 0,9 %/добу, за обробки насіння жита – зменшилась на 1,6 %/добу, порівняно з контролем (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Вплив різних концентрацій біопрепарату Nostoc-M та біопрепарату Nostoc-L на дружність проростання насіння сорго та жита

Варіанти дослідів	Дружність проростання, в %/добу	
	Жито	Сорго
Контроль (К)	12,7	5,4
25 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	13	8,6
50 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	11,4	4,3

75 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	12,4	5,4
100 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	12,6	6,3
Біопрепарат Nostoc-L	11,1	6,3

Швидкість проростання насіння жита в контролі становила 4,22 доби, насіння сорго – 5,86 діб (табл. 3.2). За обробки насіння сорго біопрепаратами Nostoc-L та Nostoc-M швидкість проростання переважно збільшилась у всіх варіантах дослідження порівняно з контролем (табл. 3.2). У жита швидкість проростання у всіх варіантах дослідження була близькою до контролю (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Вплив різних концентрацій біопрепарату Nostoc-M та біопрепарату Nostoc-L на швидкість проростання насіння сорго та жита

Варіанти дослідження	Швидкість проростання, діб	
	Жито	Сорго
Контроль (К)	4,22	5,86
25 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	4,05	5,97
50 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	4,13	6,29
75 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	4,18	6,13
100 %-розчин біопрепарату Nostoc-M	4,17	6,29

Біопрепарат Nostoc-L	4,09	6,18
----------------------	------	------

Отже, результати визначення показників дружності і швидкості проростання насіння жита та сорго дозволили встановити, що найефективнішою концентрацією біопрепарату Nostoc-M для стимуляції дружності проростання насіння обох культур є 25%-розчин. Також, біопрепарат живої культури Nostoc-L найефективніше діяв на насіння сорго, тоді як на жито показав нейтральний ефект.

Згідно з літературними даними встановлено, що лише 0,025 г/л екстракту *N. commune* значно збільшує відсоток схожості насіння рису – на 23 % відносно контролю [87]. При концентраціях екстракту *N. commune* 0,05; 0,1 г/л спостерігалось незначне збільшення відсотка проростання насіння рису, а при 0,2; 0,4 г/л екстракту *N. commune* – незначне зниження відсотка проростання насіння відносно контролю [87]. Найвищий показник дружності проростання насіння рису було отримано за обробки насіння 0,025 г/л екстракту *N. commune*, вищі концентрації екстракту *N. commune* (0,3 та 0,5 г/л) мали негативний вплив на дружність проростання насіння [87].

Проведені нами лабораторні дослідження показали, що 25-% розчин продуктів життєдіяльності *Nostoc commune* є найбільш ефективним для стимулювання проростання насіння жита. Для стимулювання проростання насіння сорго ефективними є 25-% розчин продуктів життєдіяльності *Nostoc commune* та жива культура *Nostoc commune*. 75 % та 100 % розчин продуктів життєдіяльності *Nostoc commune* не впливають суттєво на проростання жита та сорго. За обробки 50 %-розчином продуктів життєдіяльності *Nostoc commune* проростання сорго та жита пригнічується. За обробки живою культурою *Nostoc commune* показники ефективності проростання насіння жита були незначно відрізнялись від контрольної групи.

3.2. Ростові характеристики жита та сорго, вирощених на шламi, за обробки біопрепаратами на основi ціанобактерії *Nostoc commune*

Скринінг концентрацій біопрепаратів на основі *Nostoc commune* дозволив встановити, що найефективнішою концентрацією був 25%-й розчин біопрепарату Nostoc-M (продукти життєдіяльності *N. commune*), який позитивно впливав на показники проростання і розвитку насіння жита та сорго в чашках Петрі. Крім того, біопрепарат Nostoc-L (жива культура *N. commune*) також значно пришвидшував проростання насіння сорго, проте виявив менш виразний ефект на ріст і розвиток насіння жита. Тому в другій частині нашої експериментальної роботи ми обрали саме таку концентрацію біопрепарату Nostoc-M, а також живу культуру *N. commune* (біопрепарат Nostoc-L) для праймування насіння жита та сорго для подальшого дослідження їх росту і розвитку на шламi, отриманому нами з одного з хвостосховищ Полтавського гірничо-збагачувального комбінату. Вплив 25-% розчину продуктів життєдіяльності *Nostoc commune* та живої культури *Nostoc commune* на ріст та розвиток рослин жита та сорго визначали на 14 день вирощування рослин на шламi за ключовими фенотипними ознаками метаболічних процесів – динамікою ростових показників, накопиченням біомаси вегетативними органами й коренями рослин.

У контрольній групі довжина надземної частини жита та сорго становила відповідно $13,3 \pm 2,2$ см та $7,9 \pm 1,4$ см, а довжина кореня – $4,5 \pm 0,9$ см та $2,1 \pm 0,7$ см (рис. 3.5).

А



Б



Рис. 3.5. Загальний вигляд 14-денних проростків *Secale cereale* L. сорту Каліпсо (А) та *Sorghum bicolor* (L.) Moench сорту Краєвид (Б) на шламi в контролі.

У варіанті, де насіння жита було попередньо запраймовано 25-% розчином біопрепарату Nostoc-M, довжина надземної частини та кореня жита була близька до контрольних значень (табл. 3.3, рис. 3.6).

Таблиця 3.3.

Вплив різних концентрацій біопрепарату Nostoc-M та біопрепарату Nostoc-L на ростові показники жита *Secale cereale* L. сорту Каліпсо та сорго *Sorghum bicolor* (L.) Moench сорту Краєвид

Варіанти дослідів	Показники		
	Довжина надземної частини, см	Довжина кореня, см	Вміст сухої речовини, г
Жито			
Контроль, вода	13,3 ± 2,2	4,5 ± 0,9	0,220 ± 0,014
25-% розчин біопрепарату Nostoc-M	12,9 ± 3,1*	4,7 ± 2,7*	0,197 ± 0,009
Біопрепарат Nostoc-L	15,9 ± 2,5*	8,5 ± 2,0*	0,230 ± 0,017
Сорго			
Контроль, вода	7,9 ± 1,4	2,1 ± 0,7	0,127 ± 0,024
25-% розчин біопрепарату Nostoc-M	6,7 ± 1,1*	1,8 ± 0,4*	0,120 ± 0,031*
Біопрепарат Nostoc-L	9,3 ± 2,0*	6,9 ± 1,8*	0,205 ± 0,011*

Дані представляють середні значення (n=30 вимірів довжин надземної та підземної частини; n=3 вимірів сухої ваги); зірочкою * позначені достовірні відмінності між показниками контрольної та експериментальної групи групою (P ≤ 0,05).

У варіанті аналогічного дослідів із сорго довжина надземної частини та кореня зменшилась в 1,2 рази порівняно із контролем (табл. 3.3, рис. 3.6).

А



Б



Рис. 3.6. Загальний вигляд 14-денних проростків *Secale cereale* L. сорту Каліпсо (А) та *Sorghum bicolor* (L.) Moench сорту Краєвид (Б) на шламi, за умов праймування насіння 25-% розчином Nostoc-M.

За попередньої обробки насіння обох злакових культур препаратом Nostoc-L показники надземної частини та коренів жита та сорго були найвищими (табл. 3.3). У рослин жита довжина надземної частини була більшою за контроль на 20 %, а сорго – на 17 %. Аналогічно довжина кореня жита та сорго перевищувала контроль у 1,9 та 3,3 рази відповідно (табл. 3.3, рис. 3.7).

А



Б



Рис. 3.7. Загальний вигляд 14-денних проростків *Secale cereale* L. сорту Каліпсо (А) та *Sorghum bicolor* (L.) Moench сорту Краєвид (Б) на шламi, за умов праймування насіння препаратом Nostoc-L.

Важливим показником, що відображає інтенсивність фізіологічних процесів, які відбуваються в клітинах рослини, є маса сухої речовини. За попередньої обробки насіння жита та сорго 25-% розчином Nostoc-M маса сирої речовини у 14-денних проростків, вирощених на шламi, була близька до контрольних значень (табл. 3.3). Маса сухої речовини порівняно із контролем, зросла у проростках жита та сорго на шламi, насіння яких

попередньо було оброблено біопрепаратом Nostoc-L, відповідно на 22% та 10%.

Згідно з літературними даними, показано, що позакореневе обприскування рослин пажитника екстрактом ціанобактерії *Arthrospira platensis* в концентрації 10 г/л призвело до збільшення довжини кореня на 35 % та сухої речовини на 20 % порівняно з контролем [88]. Обробка томатів екстрактом іншої ціанобактерії *Aphanothece* sp. призвела до збільшення сухої речовини на 35 %, довжини кореня на 113 % та довжини пагона на 46 % порівняно з контролем [89]. Обробка рослин шпинату ціанобактерією *Anabaena sphaerica* призводила до збільшення сухої речовини на 29% порівняно з контролем [90]. Позитивний ефект обробки рослин екстрактами ціанобактерій пояснюється тим, що вони багаті на фітогормони, такі як ауксин, цитокініни та абсцизову кислоту [88]. Ауксин впливає на розвиток коренів, покращуючи формування бічних коренів і збільшуючи загальний об'єм кореневої системи [88]. Більша коренева система збільшує площу поверхні коренів і безпосередньо покращує поглинання поживних речовин і води з ґрунту, тим самим покращуючи ріст і розвиток рослин [88]. Збагачення коренів рослин цитокінінами може спричинити посилення експресії генів, що кодують транспортери корневих нітратів і сірки, тим самим збільшуючи поглинання поживних речовин рослинами [88]. Високі рівні абсцизової кислоти пригнічують синтез етилену, який, у свою чергу, зменшує транспорт ауксину та біосинтез у верхівці кореня [88].

Отже, показано, що попередня обробка насіння сорго *Sorghum bicolor* (L.) Moench сорту Краєвид та жита *Secale cereale* L. сорту Каліпсо живою культурою *N. commune* в цілому позитивно впливає на ріст і розвиток 14-денних проростків, що ростуть на шламi (рис. 3.8, рис. 3.9). Біопрепарат на основі живої культури *N. commune* (Nostoc-L) виявився найбільш ефективним для попередньої обробки насіння, оскільки пришвидшував ріст і розвиток молодих проростків жита та сорго на шламi, і в першу чергу, впливав на ріст кореневої системи у цих рослин, а це, в свою чергу може

сприяти прискоренню процесу закріплення поверхонь шламу, зменшуючи викиди забруднюючих речовин у навколишнє середовище. Обробка насіння сорго та жита 25-% розчином продуктів життєдіяльності *N. commune* (Nostoc-M) не суттєво впливала на ріст коренів та пагонів у сорго і жита, а також на збільшення маси сухої ваги проростків (рис. 3.8, рис. 3.9).

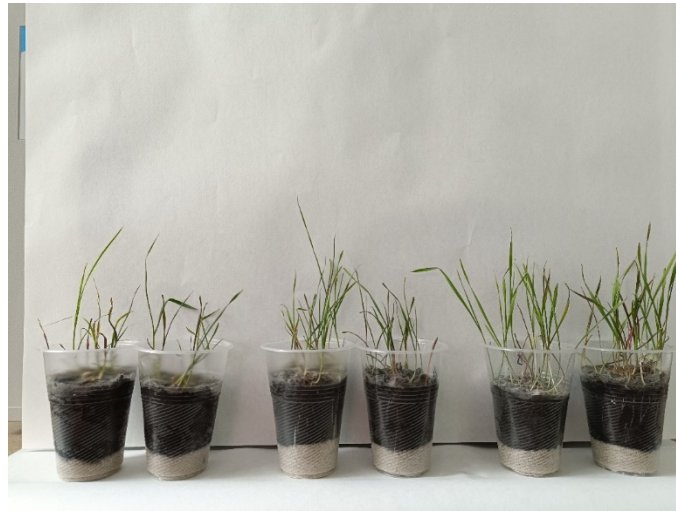


Рис. 3.8. Загальний вигляд 14-денних проростків *Secale cereale* L. сорту Каліпсо на шламi, за умов праймування насіння препаратом 25-% розчином Nostoc-M та Nostoc-L.

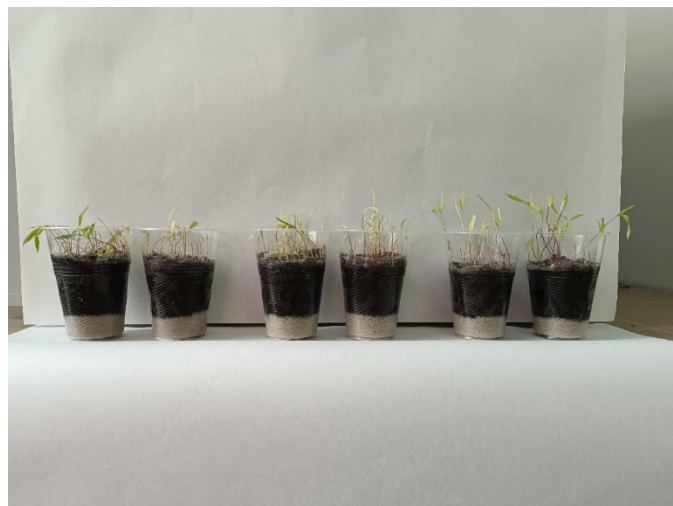


Рис. 3.9. Загальний вигляд 14-денних проростків *Sorghum bicolor* (L.) Moench сорту Краєвид на шламi, за умов праймування насіння препаратом 25-% розчином Nostoc-M та Nostoc-L.

3.3. Вміст фотосинтетичних пігментів жита та сорго, вирощених на шламi, за обробки біопрепаратами на основі ціанобактерії *Nostoc commune*

З фізіологічних процесів фотосинтез займає особливе місце, оскільки є основним джерелом надходження органічних речовин і енергії, необхідних для життєдіяльності рослинного організму [91]. Ріст і врожайність рослин в кінцевому підсумку визначаються фотосинтетичною активністю, яка суттєво залежить від вмісту та співвідношення фотосинтетичних пігментів у рослинах [92].

Хлорофіл *a* є основним пігментом, який бере участь у процесі фотосинтезу, а хлорофіл *b* виконує допоміжну функцію, спрямовану на підвищення світлозбиральної спроможності пігментного комплексу в короткохвильовій області червоного світла [91, 93]. Молекули хлорофілу відіграють вирішальну роль у фотосинтетичних реакціях, залежних від світла, шляхом захоплення енергії світла та передачі поглиненої енергії до реакційних центрів фотосистем [92]. На вміст хлорофілів та їх співвідношення особливо впливають зовнішні чинники – освітлення, температура, склад ґрунту та концентрація в ньому хімічних сполук та елементів (наприклад магнію та заліза), дія токсичних сполук (важких металів, нафтопродуктів, пестицидів), зараженість патогенами тощо [92]. Також важливим компонентом фотосинтетичних систем є каротиноїди, які виконують роль допоміжних пігментів, вловлюють світло у процесі фотосинтезу, захищають хлорофіл від руйнування під час окиснювального стресу, зумовленого несприятливими чинниками довкілля [94].

Показники вмісту і співвідношення фотосинтетичних пігментів характеризують стан фотосинтетичного апарату. Так, показник суми хлорофілів (*a+b*) корелює із продуктивністю фотосинтезу [95]. Зміни у співвідношенні хлорофілів відбуваються переважно внаслідок змін вмісту

хлорофілу *a* [96]. Величину співвідношення хлорофілів *a/b* розглядають як одну з ознак фотосинтетичної активності [97]. Співвідношення хлорофілів *a/b* та суми хлорофілів (*a+b*) до каротиноїдів характеризує здатність рослин пристосовуватись до різних умов (до зміни інтенсивності освітлення, зволоження, дії токсичних сполук).

Проведені нами дослідження показали, що за попереднього праймування насіння жита та сорго 25-% розчином біопрепарату Nostoc-M вміст хлорофілів *a*, *b* і каротиноїдів у листках 14-добових рослин жита збільшився порівняно з контролем, відповідно на 51, 37 і 38 % (рис. 3.10). У листках 14-добових рослин сорго вміст фотосинтетичних пігментів, навпаки зменшився, а саме, хлорофілів *a* і *b* на 16 і 18 % відповідно, каротиноїдів – на 35 % (рис. 3.10).

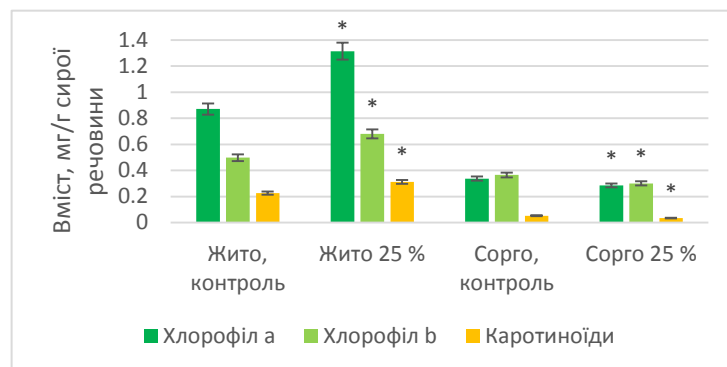


Рис. 3.10. Вплив праймування насіння жита та сорго 25-% розчином біопрепарату Nostoc-M на вміст фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин жита та сорго. Дані представляють середні значення ($n=3$); зірочкою * позначені достовірні відмінності між показниками контрольної та експериментальної групи групою ($P \leq 0,05$).

За попереднього праймування насіння жита та сорго 25-% розчином біопрепарату Nostoc-M показник суми хлорофілів (*a+b*) у жита збільшився в 1,5 раза, а у сорго зменшився в 1,2 раза (табл. 3.4). Співвідношення хлорофілів *a/b* у рослинах жита зросло на 10 % за рахунок збільшення вмісту

обох хлорофілів, тоді як у сорго цей показник залишився близьким до контрольних значень (табл. 3.4). Це свідчить про баланс фотосинтетичної системи у запраймованих рослин сорго, незважаючи на зменшення вмісту обох хлорофілів. Таке стабільне співвідношення a/b означає, що відносні пропорції хлорофілу a і b залишаються оптимальними, хоча і вміст хлорофілів зменшився, порівняно з контролем. Показник співвідношення суми хлорофілів ($a+b$) до каротиноїдів у рослинах жита не істотно збільшився (на 6 %), і таке збільшення відбулось за рахунок збільшення вмісту всіх фотосинтетичних пігментів. У молодих рослин сорго, праймованих 25-% розчином біопрепарату Nostoc-M, показник $(a+b)/$ каротиноїди збільшився на 31% (табл. 3.4). Цей коефіцієнт відображає баланс між хлорофілами та каротиноїдами в антенному комплексі, що збирає світло і підвищені його значення можуть свідчити про ефективне збирання світла фотосистемою запраймованих рослин сорго, незважаючи на те, що загальний вміст фотосинтетичних пігментів був нижче за контрольні значення [98].

Таблиця 3.4.

Вплив праймування насіння жита та сорго 25-% розчином біопрепарату Nostoc-M на співвідношення фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин жита та сорго

Зразок	Хлорофіл a/b	Хлорофіли $a + b$, мг/г сирової речовини	Хлорофіли $a + b /$ каротиноїди
Жито, контроль	1,75	$1,37 \pm 0,02$	6,05
Жито, 25-%	1,93	$1,99 \pm 0,01^*$	6,39
Сорго,	0,92	$0,70 \pm 0,03$	13,33

контроль			
Сорго, 25 %	0,95	0,58 ± 0,01*	17,49

Дані представляють середні значення (n=3); зірочкою * позначені достовірні відмінності між показниками контрольної та експериментальної групи групою (P ≤ 0,05).

За попереднього праймування насіння жита та сорго біопрепаратом Nostoc-L вміст хлорофілів *a*, *b* і каротиноїдів у листках 14-добових рослин жита та сорго збільшився порівняно з контролем. Вміст хлорофілів *a*, *b* і каротиноїдів у листках праймованих рослин жита живою культурою *N. commune* достовірно збільшився на 21, 9 і 4 % відповідно (рис. 3.11). У подібних рослин сорго достовірне збільшення фотосинтетичних пігментів відзначено для хлорофілу *a* та каротиноїдів, які збільшились на 26 і 30 % відповідно (рис. 3.11), тоді як вміст хлорофілу *b* не відрізнявся від контрольних значень (рис. 3.11).

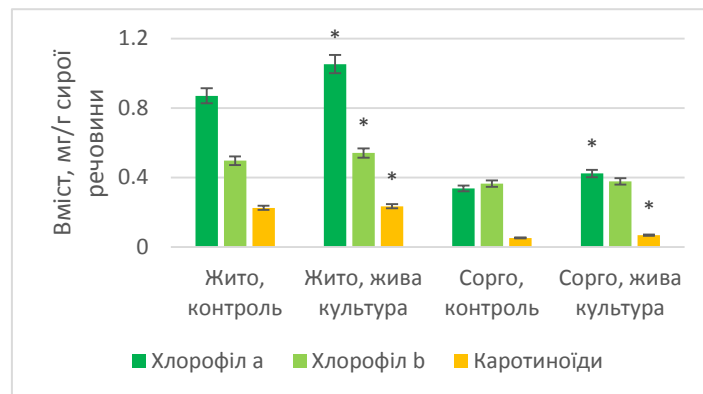


Рис. 3.11. Вплив праймування насіння жита та сорго біопрепаратом Nostoc-L на вміст фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин жита та сорго. Дані представляють середні значення (n=3); зірочкою * позначені достовірні відмінності між показниками контрольної та експериментальної групи групою (P ≤ 0,05).

За попереднього праймування насіння жита та сорго біопрепаратом Nostoc-L показник суми хлорофілів ($a+b$) у жита та сорго збільшився в 1,2 та 1,1 раза (табл. 3.5). Співвідношення хлорофілів a/b у рослинах жита та сорго збільшилось на 11 і 22 % відповідно (табл. 3.5). Збільшення цих обох показників у рослин, що були попередньо запраймовані живою культурою *N. commune*, і вирощених на шламi, свiдчить про те, що обидвi запраймованi рослини мають вищу загальну концентрацiю хлорофілів i їх збільшення вказує на ефективну роботу фотосинтетичної системи збирати світло i перетворювати його в хiмiчну енергiю. А це, в свою чергу, позитивно впливає на загальний рiст i продуктивнiсть рослин. Показник співвідношення суми хлорофілів ($a+b$) до каротиноїдiв у запраймованих рослинах жита збільшився на 12 %, що свiдчить про їхню підвищену фотосинтетичну активнiсть в умовах росту на шламi. Коефіцієнт $(a+b)/$ каротиноїди у рослин сорго, попередньо праймованих живою культурою *N. commune* (біопрепарат Nostoc-L), навпаки зменшився (на 12 %) (табл. 3.5), що пов'язано зi змiною в динамiцi пiгментiв у фотосинтетичнiй системi, а саме підвищений загальний вміст хлорофілів i зменшення внеску каротиноїдiв у поглинаннi світла.

Таблиця 3.5.

Вплив праймування насіння жита та сорго біопрепаратом Nostoc-L на співвідношення фотосинтетичних пiгментiв у листках 14-добових рослин жита та сорго

Зразок	Хлорофіл a/b	Хлорофіли $a + b$, мг/г сирової речовини	Хлорофіли $a + b /$ каротиноїди
Жито, контроль	1,75	$1,37 \pm 0,02$	6,05
Жито, жива	1,94	$1,59 \pm 0,01^*$	6,77

культура			
Сорго, контроль	0,92	0,70 ± 0,03	13,33
Сорго, жива культура	1,12	0,80 ± 0,03*	11,76

Дані представляють середні значення (n=3); зірочкою * позначені достовірні відмінності між показниками контрольної та експериментальної групи групою ($P \leq 0,05$).

Згідно з літературними даними, при обробці томатів екстрактами *Aphanothese* sp. та *C. ellipsoidea*, вміст хлорофілу *a* у листі зріс на 42 % та 40 % відповідно порівняно з контролем [89]. При обробці екстрактами *Aphanothese* sp., *A. maxima* і *C. pyrenoidosa* вміст хлорофілу *b* в листі томатів збільшився на 92,45 %, 92,28 % і 83,95 % відповідно порівняно з контролем [89]. При обробці томатів екстрактами *Tetraselmis* sp, *N. gaditana* та *Aphanothese* sp, вміст каротиноїдів зріс на 129 %, 124 % та 123 % відповідно порівняно з контрольними рослинами [89]. За обробки кукурудзи біопрепаратом *Phormidium* sp. вміст хлорофілів *a* і *b* в листі кукурудзи значно збільшився порівняно з контрольною групою [92]. Грунтування насіння люпину культуральними фільтратами *C. muscicola* та *A. oryzae* призвело до збільшення хлорофілів у листі люпину, відповідно збільшуючи фотосинтетичну активність і вміст вуглеводів у пагоні [92]. Підвищення вмісту хлорофілу в рослинах, оброблених екстрактами ціанобактерій, може бути наслідком більшої доступності мікроелементів, необхідних для шляху біосинтезу хлорофілу, таких як залізо та магній, або захисним ефектом біостимулятора, який зменшує деградацію хлорофілу та затримує старіння рослин [88, 92]. Відомо, що екзогенне застосування амінокислот стимулює ефективність метаболізму азоту та синтез хлорофілів в оброблених рослинах [88]. Такі фітогормони, як цитокініни, бетаїни та гібереліни в екстрактах

ціанобактерій, можуть відігравати важливу роль у зменшенні деградації хлорофілу, головним чином через інгібування активності хлорофілази [88]. Серед речовин з гормоноподібною активністю екзогенно застосовані поліаміни можуть бути ковалентно кон'юговані з білками, пов'язаними з хлорофілом, за допомогою пластидіальних трансглютаміназ, таким чином покращуючи стабільність хлорофілу під час старіння листя [88]. Таким чином, обробка препаратами на основі ціанобактерій позитивно впливає на фотосинтетичну активність оброблених рослин і сприяє зменшенню негативного впливу абіотичного стресу на сільськогосподарські культури.

Отже, проведені дослідження показали, що попереднє праймування насіння жита та сорго 25-% розчином біопрепарату *Nostoc-M* та *Nostoc-L* в цілому позитивно впливає на фотосинтетичну активність рослин, переважно збільшуючи вміст фотосинтетичних пігментів. За попереднього праймування насіння сорго 25-% розчином продуктів життєдіяльності *Nostoc commune* вміст хлорофілів *a*, *b* і каротиноїдів, показник суми хлорофілів у листках 14-добових рослин сорго зменшились порівняно з контролем. Тоді як попереднє праймування насіння сорго живою культурою *Nostoc commune* підвищує вміст хлорофілів *a*, *b* і каротиноїдів, показники суми хлорофілів та співвідношення хлорофілів *a* і *b* у листках 14-добових рослин сорго, вирощених на шламi. У жита праймування обома біопрепаратами призвело до значного збільшення вмісту хлорофілів та каротиноїдів, а також підвищення співвідношення хлорофілів *a/b*. Ці результати свідчать про позитивний вплив попереднього праймування біопрепаратів на фотосинтетичну активність жита в умовах розвитку рослин на шламi, що в подальшому сприяє більш ефективному розвитку рослин у відповідних умовах.

ВИСНОВКИ

1. Підібрано ефективні концентрації біопрепаратів на основі азотфіксуючої ціанобактерії *N. commune* (Nostoc-M та Nostoc-L) для праймування насіння жита та сорго. Найбільш ефективним для стимулювання проростання насіння жита є 25-% розчин продуктів життєдіяльності *N. commune*. Обробка живою культурою *N. commune* показала незначний ефект на проростання насіння жита. Для стимулювання проростання насіння сорго ефективними є 25-% розчин продуктів життєдіяльності *N. commune* та жива культура *N. commune*.

2. Виявлено, що 75 % та 100 % розчини продуктів життєдіяльності *N. commune* не впливають на проростання жита та сорго, а 50 %-й розчин пригнічує проростання обох видів рослин.

3. Біопрепарат на основі живої культури *N. commune* є найбільш ефективним для попереднього праймування насіння жита та сорго, оскільки пришвидшує ріст і розвиток молодих проростків жита та сорго на шламi. Показано, що попередня обробка таким біопрепаратом позитивно впливала на ріст кореневої системи у обох рослин. Праймування насіння жита та сорго 25-% розчином продуктів життєдіяльності *N. commune* не суттєво впливає на ріст коренів та пагонів у жита та сорго на шламi, а також на збільшення маси сухої речовини.

4. Показано, що попереднє праймування насіння жита та сорго біопрепаратами на основі азотфіксуючої ціанобактерії *N. commune* позитивно впливало на фотосинтетичну активність рослин, вирощених на шламi, збільшуючи загальний вміст фотосинтетичних пігментів. Попереднє праймування насіння сорго 25% розчином продуктів життєдіяльності *N. commune* зменшило вміст хлорофілів та каротиноїдів, проте дисбалансу у розподілі пігментів не виявлено. Попереднє праймування насіння сорго живою культурою *N. commune* суттєво підвищило вміст фотосинтетичних

пігментів у рослин, вирощених на шламi, особливо значно збільшивши вміст хлорофілу *a*. У жита праймування обома біопрепаратами Nostoc-M та Nostoc-L сприяло збільшенню вмісту хлорофілів та каротиноїдів, а також підвищенню співвідношення хлорофілів *a/b*, що свідчить про позитивний вплив цих заходів на фотосинтетичну активність рослин у складних умовах шламового середовища.

5. Проведене дослідження показало, що біопрепарат на основі живої культури *N. commune* (Nostoc-L) є найефективнішим для попереднього праймування насіння жита та сорго на шламi. Він стимулює проростання насіння та сприяє збільшенню росту та розвитку молодих проростків на шламi, що може позитивно позначитися на загальній продуктивності рослин у таких умовах. Отже, можна рекомендувати використання цього біопрепарату для праймування рослин-рекультиваторів з метою активації їхнього росту і розвитку, а також підвищення їхньої екологічної стійкості у фіторекультивацийних системах шламосховищ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крамарьов С.М. Характеристика хвостосховищ відходів збагачення залізної руди / С.М. Крамарьов, Л.П. Бандура, В.В. Гулін, В.М. Гулін // Науково-практичний посібник з проведення закріплення поверхонь хвостосховищ, для пілопригнічення техноземів забруднених промисловими відходами, способом вирощування сільськогосподарських культур стійких до повітряної та ґрунтової посухи в умовах гострого дефіциту рухомих форм поживних речовин – Дніпро: ТОВ підприємство «Дріант», 2020. – С. 14-17.
2. Крамарьов С.М. Коротка характеристика хвостосховищ Кривбасу / С.М. Крамарьов, Л.П. Бандура, В.В. Гулін, В.М. Гулін // Науково-практичний посібник з проведення закріплення поверхонь хвостосховищ, для пілопригнічення техноземів забруднених промисловими відходами, способом вирощування сільськогосподарських культур стійких до повітряної та ґрунтової посухи в умовах гострого дефіциту рухомих форм поживних речовин – Дніпро: ТОВ підприємство «Дріант», 2020. – С. 17-26.
3. Мазницька, О.В. Вплив пилового навантаження гірничо-збагачувальних підприємств на довкілля та можливі шляхи його усунення / О.В. Мазницька, Т.В. Александрова, В.І. Орел // Нові технології. – 2010. – № 3 (29). – С. 153-157.
4. Singh N.K. Cyanobacterial reclamation of salt-affected soil / N.K. Singh, D.W. Dhar // Lichtfouse E, editor. Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming. Dordrecht, The Netherlands: Springer. – 2010. – pp. 243-275.
5. Mahanty T. Biofertilizers: A potential approach for sustainable agriculture development / T. Mahanty, S. Bhattacharjee, M. Goswami, P. Bhattacharyya, B. Das, A. Ghosh, et al. // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24. – No. 4. – P. 3315-3335.

6. Rai A.N. Plant growth-promoting abilities in cyanobacteria / A.N. Rai, A.K. Singh, M.B. Syiem // *Cyanobacteria*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. – 2019. – pp. 459-476.
7. Garlapati D. Role of cyanobacteria in agricultural and industrial sectors: An outlook on economically important byproducts / D. Garlapati, M. Chandrasekaran, A. Devanesan, T. Mathimani, A. Pugazhendhi // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2019. – V. 103. – P. 4709-4721.
8. Rastogi R.P., Sinha R.P. Biotechnological and industrial significance of cyanobacterial secondary metabolites // *Biotech. Adv.* 2009. №27. P. 521–539.
9. Сальнікова А.В. Дослідження впливу біопрепарату Soil Algae на токсичність залишків пестицидів за допомогою біотестів / А.В. Сальнікова, С.М. Сальніков // *Biological systems: theory and innovation*. – 2022. – Vol. 14. – № 3-4. – P. 79-86.
10. Cramer G.R. Effects of abiotic stress on plants: A systems biology perspective / G.R. Cramer, K. Urano, S. Delrot, M. Pezzotti, K. Shinozaki // *BMC Plant Biology*. – 2011. – V. 11. – P. 163.
11. Fokina A.I. Cyanobacteria as Test Organisms and Biosorbents / A. I. Fokina, S. Yu. Ogorodnikova, L.I. Domracheva, E.I. Lyalina, E.A. Gornostaeva, T. Ya. Ashikhmina, L.V. Kondakova // *Eurasian Soil Science*. – 2017. – Vol. 50. – No. 1. – P. 70–77.
12. Abed R. M. M. The direct role of aerobic heterotrophic bacteria associated with cyanobacteria in the degradation of oil compounds / R. M. M. Abed, J. Köster // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* – 2005. – V. 55. – P. 29–37.
13. Abed R. M. M. Applications of cyanobacteria in biotechnology / R. M. M. Abed, S. Dobretsov, K. Sudesh // *J. Appl. Microbiol.* – 2009. – V. 106. – P. 1–2.
14. Tseng C.-C. An in vitro study shows the potential of Nostoc commune (Cyanobacteria) polysaccharides extract for wound-healing and anti-allergic use in the cosmetics industry / C.-C. Tseng, H.-Y. Yeh, Z.-H. Liao, S.-W.

- Hung, B. Chen, P.-T. Lee, F.-H. Nan, W.-L. Shih, C.-C. Chang, M.-C. Lee // *Journal of Functional Foods*. – 2021. V. 87. – P. 1-9.
- 15.Оглобля О. ДБН В.2.4-5:2012 «Хвостосховища і шламонакопичувачі. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво» / О. Оглобля, Г. Пархомович, К. Островська, В. Чванова, Г. Лавріненко // Київ, Мінрегіон України, 2012. – 130 с.
- 16.Засельський В. Й. Підвищення ефективності використання рудних та металургійних шламів / В. Й. Засельський, Д. В. Пополов, А. В. Сорокін, Ю. Г. Осадчук, С. А. Жуков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2018. – № 6. – С. 87-89.
- 17.Рудь В.Д. Аналіз кількості утворених відходів машинобудування та металургії на території України / В.Д. Рудь, І.В. Савюк, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяна // *Вісник ТНТУ*, – Т.: ТНТУ, 2015. – Т. 79. – № 3. – С. 130-136.
- 18.Копач, П.І. Аналіз процесів відходоутворення на виробництвах гірничо-металургійного регіону / П.І. Копач, Д.В. Чілий. // *Екологія і природокористування*. – 2012. – № 15. – С. 118-132.
- 19.Сергеев П. В. Загальні характеристики вугільних шламів / П. В. Сергеев, В. С. Білецький // *Селективна флокуляція вугільних шламів органічними реагентами – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, Редакція гірничої енциклопедії*, 2010. – С. 6-9.
- 20.Аблеєва І.Ю. Дослідження складу та структури бурового шламу з метою обґрунтування вибору методу його подальшої утилізації / І.Ю. Аблеєва, Л.Д. Пляцук, О.П. Будьоний // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – 2014. – Т. 85. – № 2. – С. 172-178.
- 21.Балаба В.И. Обеспечение экологической безопасности строительства скважин на море // *Бурение и нефть*. – 2004. – № 1. – С. 18–21.
- 22.Утков В. А. Промышленные способы переработки красных шламов / Утков В. А., Мешин В. В., Ланкин В. П. // *Состояние, проблемы и*

- направлення використання в народному господарстві червоного шламу // Николаев, 1999.– с. 11.
- 23.Хром'як У.В. Перероблення червоних шламів на Миколаївському глиноземному заводі / У.В. Хром'як, І.Д. Борщисин // Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – С. 165-170.
- 24.Трохименко Г.Г. Підвищення екологічної безпеки регіону за рахунок фіторекультивациі шламових масивів МГЗ / Г.Г. Трохименко, Ц.Р. Яценко // Науково-технічний журнал. – 2016. – Т. 14. – № 2. – С. 122-128.
- 25.Fijalkowski K. The presence of contaminations in sewage sludge / K. Fijalkowski, A. Rorat, A. Grobelak, M.J. Kasprzak // J Environ Manage. – 2017. – V. 203. – P. 1126–1136.
- 26.Kumar T.V. Sludge: a waste or renewable source for energy and resources recovery? / T.V. Kumar, L. Shang-Lien // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2013. – V. 25. – P. 708–728.
- 27.Станкевич С.В. Зберігання відходів / С.В. Станкевич, Л.В. Головань, Є.М. Білецький та інші. // Управління та рекуперація відходів: навч. посіб. – Х.: Видавництво Іванченка І. С., 2020. – С. 23-28.
- 28.Станкевич С.В. Класифікація методів переробки відходів / С.В. Станкевич, Л.В. Головань, Є.М. Білецький та інші. // Управління та рекуперація відходів: навч. посіб. – Х.: Видавництво Іванченка І. С., 2020. – С. 29-35.
- 29.Станкевич С.В. Методи збагачування / С.В. Станкевич, Л.В. Головань, Є.М. Білецький та інші. // Управління та рекуперація відходів: навч. посіб. – Х.: Видавництво Іванченка І. С., 2020. – С. 36-42.
- 30.Станкевич С.В. Фізико-хімічні методи переробки відходів / С.В. Станкевич, Л.В. Головань, Є.М. Білецький та інші. // Управління та рекуперація відходів: навч. посіб. – Х.: Видавництво Іванченка І. С., 2020. – С. 43-51.

31. Галич С.А. Перспективы использования золошлаков ТЭС в качестве микроудобрения для почв. – Институт проблем машиностроения Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина [Электронный ресурс] – Режим послання: <http://waste.ua/cooperation/2007/theses/galich.html>
32. Аблєєва І.Ю. Особливості процесу переробки бурового шламу хімічним методом з використанням фосфогіпсу / І.Ю. Аблєєва, Л.Д. Пляцук, І.Г. Коцюба // ВІСНИК ЖДТУ. – 2013. – Т. 67. – № 4. – С. 84-88.
33. Mishra S. A Review on Epigenetic Effect of Heavy Metal Carcinogens on Human Health / Mishra S., Dwivedi S.P., Singh R.V. // The Open Nutraceuticals Journal. – 2010. – Vol. 3. – Pp. 188–193.
34. Крамарьов С.М. Шляхи підготовки хвостосховищ до проведення на них біологічної рекультивациі / С.М. Крамарьов, Л.П. Бандура, В.В. Гулін, В.М. Гулін // Науково-практичний посібник з проведення закріплення поверхонь хвостосховищ, для пілопригнічення техноземів забруднених промисловими відходами, способом вирощування сільськогосподарських культур стійких до повітряної та ґрунтової посухи в умовах гострого дефіциту рухомих форм поживних речовин – Дніпро: ТОВ підприємство «Дріант», 2020. – С. 27-30.
35. Крамарьов С.М. Сільськогосподарська рекультивациія хвостосхових Криворіжжя / С.М. Крамарьов, Л.П. Бандура, В.В. Гулін, В.М. Гулін // Науково-практичний посібник з проведення закріплення поверхонь хвостосховищ, для пілопригнічення техноземів забруднених промисловими відходами, способом вирощування сільськогосподарських культур стійких до повітряної та ґрунтової посухи в умовах гострого дефіциту рухомих форм поживних речовин – Дніпро: ТОВ підприємство «Дріант», 2020. – С. 35-40.
36. Гавриловская М.А. Этапы рекультивации нарушенных земель // Современные промышленные технологии : [Материалы VI

- Всероссийской научно-технической конференции] / М. А. Гавриловская. – Нижний Новгород : ННИМЦ «Диалог», 2006. – 176 с.
37. Акт перевірки шламонакопичувачів ТОВ «Миколаївський глиноземний завод» міжвідомчою комісією. – 21.10.2010. – №4040/05-49. – с. 2-3.
38. Гурина И. В. О применении комплексных мелиораций при биологической рекультивации нарушенных земель / Гурина И. В. // Мелиорация и водное хозяйство. – 2013. – № 3. – с. 27-28.
39. Крамарьов С.М. Перспективи використання посівів озимого жита і озимого тритикале для сільськогосподарської рекультивації пилячих поверхонь хвостосховищ / С.М. Крамарьов, Л.П. Бандура, В.В. Гулін, В.М. Гулін // Науково-практичний посібник з проведення закріплення поверхонь хвостосховищ, для пилопригнічення техноземів забруднених промисловими відходами, способом вирощування сільськогосподарських культур стійких до повітряної та ґрунтової посухи в умовах гострого дефіциту рухомих форм поживних речовин – Дніпро: ТОВ підприємство «Дріант», 2020. – С. 40-45.
40. Temraleeva A. D. Modern Methods for Isolation, Purification, and Cultivation of Soil Cyanobacteria / A. D. Temraleeva, S. A. Dronova, S. V. Moskalenko, S. V. Didovich // Microbiology. – 2016. – Vol. 85. – No. 4, pp. 389–399.
41. Seckbach, J. Algae and cyanobacteria in extreme environments / Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology, Seckbach, J., Ed., New York: Springer Science, Business Media. – 2007. – V. 11. – P. 1–811.
42. Domracheva L.I. Exometabolites of soil cyanobacteria as a survival strategy in natural and technogenically disturbed ecosystems / L. I. Domracheva, A. I. Fokina, A. L. Kovina, T. Ya. Ashikhmina // Theoretical and Applied Ecology. – 2019. – No. 4. – P. 15-23.
43. Domracheva L.I. Biofilms Nostoc commune as special microbiota sphere / L.I. Domracheva, L.V. Kondakova, O.A. Pegushina, A.I. Fokina // Theoretical and Applied Ecology. – 2007. – No. 1. – P. 15–19.

44. Zhang B. Distribution and composition of cyanobacteria and microalgae associated with biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, China / B. Zhang, Y. Zhang, A. Downing, Y. Niu // *Arid Land Res. Manag.* – 2011. – V. 25 – P. 275-293.
45. Sepehr A. The protective role of cyanobacteria on soil stability in two Aridisols in northeastern Iran / A. Sepehr, M. Hassanzadeh, E. Rodriguez-Caballero // *Geoderma Regional* – 2018. – V. 16 – P. 1-10.
46. Mager D.M. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes / D.M. Mager, A.D. Thomas // *J. Arid Environ.* – 2011. – V. 75. – P. 91–97.
47. Rossi F. Complex role of the polymeric matrix in biological soil crusts / F. Rossi, G. Mugnai, R.D. Philippis // *Plant Soil.* – 2017. – P. 1–16.
48. Maqubela M. Nostoc cyanobacterial inoculation in South African agricultural soils enhances soil structure, fertility, and maize growth / M. Maqubela, P. Mnkeni, O.M. Issa, M. Pardo, L. D'Acqui // *Plant Soil.* – 2009. – V. 315. – No. 1–2. – P. 79–92.
49. Roque J. Isolation and characterization of soil cyanobacteria and microalgae and evaluation of their potential as plant biostimulants / J. Roque, A. Brito, M. Rocha et al. // *Plant Soil.* – 2023. – V. 493. – P. 115–136.
50. Meeks J. C. Regulation of cellular differentiation in filamentous cyanobacteria in free-living and plant-associated symbiotic growth states / J. C. Meeks, J. Elhai // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* – 2002. – V. 66. – P. 94–121.
51. Hussain A. Effect of IAA on in vitro growth and colonization of Nostoc in plant roots / A. Hussain, S. T. Shah, H. Rahman, M. Irshad, A. Iqbal // *Front. Plant Sci.* – 2015. – V. 6. – P. 46.
52. Karthikeyan N. Physiological characterization and electron microscopic investigation of cyanobacteria associated with wheat rhizosphere / N. Karthikeyan, R. Prasanna, A. Sood, P. Jaiswal, S. Nayak, B. Kaushik // *Folia Microbiol.* – 2009. – V. 54. – P. 43–51.

53. Krings M. Endophytic cyanobacteria in a 400-million-yr-old land plant: A scenario for the origin of a symbiosis? / M. Krings, H. Hass, H. Kerp, T. N. Taylor, R. Agerer, N. Dotzler // *Rev. Palaeobot. Palynol.* – 2009. – V.153. – P. 62–69.
54. Gantar M. Colonization of wheat (*Triticum vulgare* L.) by N₂-fixing cyanobacteria: II. An ultrastructural study / M. Gantar, N. Kerby, P. Rowell // *N. Phytol.* – 1991. – V. 118. – P. 485–492.
55. Roberti R. Induction of defence responses in zucchini (*Cucurbita pepo*) by anabaena sp. water extract / R. Roberti, S. Galletti, P.L. Burzi, H. Righini, S. Cetrullo, C. Perez // *Biological Control.* – 2015. – V. 82. – P. 61-68.
56. Большев Н.Н. Водоросли и их роль в образовании почв. М.:Изд-во МГУ, 1968. 84 с.
57. Nilsson M., Bhattacharya J., Rai A.N., Bergman B. Colonization of roots of rice (*Oryza sativa*) by symbiotic *Nostoc* strains // *New Phytologist.* 2002. V.156. P. 517–525.
58. Osman R.K. Evaluation of some extra- and intracellular cyanobacterial extracts as antimicrobial agents / R.K. Osman, H.A. Goda, A.M. Higazy // *Int. Jr. of Advanced Research.* – 2015. – V. 3. – No. 5. – P. 852–864.
59. Namikoshi M. Bioactive compounds produced by cyanobacteria / M. Namikoshi, K.L. Rinehart // *J. Ind. Microbiol.* – 1996. – V. 17. – No. 5–6. – P. 373–384.
60. Sing S. Bioactive compounds from cyanobacteria and microalgae: an overview / S. Sing, B.N. Kate, U.C. Banerjee // *Critical Reviews in Biotechnology.* – 2005. – V. 25. – P. 73–95.
61. Vepritskiy A.A. Formation of antibiotic-algicide cyanobacterin LU-2 by filamentous cyanobacteria *Nostoc* sp. / A.A. Vepritskiy, B.V. Gromov, N.N. Titova, K.A. Mamkayeva // *Microbiologiya.* – 1991. – V. 60. – No. 6. – P. 620–625.
62. Kajiyama S. *Nostoc* fungicide, an antifungal lipopeptide from the field grown terrestrial blue-green alga *Nostoc commune* / S. Kajiyama, H. Kanzaki, K.

- Kawazu, A. Kobayashi // *Tetrahedron Lett.* – 1998. – V. 39 – No 22. – P. 3737–3740.
63. Biatczyk J. Neurotoksyny syntetyzowane przez sinice / J. Biatczyk, Z. Lechowski, B. Bober // *Wiad. bot.* – 2008. – V. 52. – No. 3–4. – P. 43–53.
64. Sharma S.B. Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils / S.B. Sharma, R.Z. Sayyed, M.H. Trivedi, T.A. Gobi // *Springerplus.* – 2013. – V. 2. – P. 587.
65. Singh S. A review on possible elicitor molecules of cyanobacteria: Their role in improving plant growth and providing tolerance against biotic or abiotic stress / *J. Appl. Microbiol.* – 2014. – V. 117. – P. 1221–1244.
66. Bareke T. Biology of seed development and germination physiology / *Adv. Plants Agric. Res.* – 2018. – V. 8. – P. 336–346.
67. Kaur R. Heavy metal accumulation from coal fly ash by cyanobacterial biofertilizers / R. Kaur, D. Goyal // *Particulate Science and Technology.* – 2018. – V. 36. – P. 513-516.
68. Rai L.C. Biotechnological potential of naturally occurring and laboratory-grown microcystis in biosorption of Ni²⁺ and Cd²⁺ / L.C. Rai, S. Singh, S. Pradhan // *Current Science.* – 1998. – V. 74. – P. 461-464.
69. Singh D.P. Cyanobacteria-mediated phenylpropanoids and phytohormones in rice (*Oryza sativa*) enhance plant growth and stress tolerance / D.P. Singh, R. Prabha, M.S. Yandigeri, D.K. Arora // *Antonie Leeuwenhoek.* – 2011. – V. 100 – P. 557–568.
70. Mahawar H. Elucidating the disease alleviating potential of cyanobacteria, copper nanoparticles and their interactions in *Fusarium solani* challenged tomato plants / H. Mahawar, R. Prasanna, R. Gogoi // *Plant Physiology Reports.* – 2019. – V. 24. – P. 533-540.
71. Prasanna R. Prospecting cyanobacteria-fortified composts as plant growth promoting and biocontrol agents in cotton / R. Prasanna, S. Babu, N. Bidyarani, A. Kumar, S. Triveni, D. Monga, et al. // *Experimental Agriculture.* – 2014. – V. 51. – P. 42-65.

72. Attia M.S. Protective action of some bio-pesticides against early blight disease caused by *Alternaria solani* in tomato plant / M.S. Attia, A.E. Sharaf, A.S. Zayed // *IJISET*. – 2017. – V. 4. – P. 67-94.
73. Smith V.J. Conventional and unconventional antimicrobials from fish, marine invertebrates and micro-algae / V.J. Smith, A.P. Desbois, E.A. Dyrinda // *Marine Drugs*. – 2010. – V. 8. – No. 4. – P. 1213-1262.
74. Mikhail M.S. Using of cyanobacteria in controlling potato brown rot disease / M.S. Mikhail, B.A. Hussein, N.A. Messiha, K.M.M. Morsy, M.M. Youssef // *International Journal of Engineering Research*. – 2016. – V. 7. – P. 274-281.
75. Hamouda R. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Spirulina platensis* on suppressing root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* infecting banana plants under greenhouse conditions / R. Hamouda, M. Al-Saman, M. El-Ansary // *Egyptian Journal of Agronematology*. – 2019. – V. 18. – P. 90-102.
76. Forlani G. Biochemical basis for a wide spread tolerance of cyanobacteria to the phosphonate herbicide glyphosate / G. Forlani, M. Pavan, M. Gramek, P. Kafarski, J. Lipok // *Plant Cell Physiol*. – 2008. – V. 49. – P. 443–456.
77. Kesaano M. Algal biofilm based technology for waste water treatment / M. Kesaano, R.C. Sims // *Algal Res*. – 2014. – V. 5. – P. 231–240.
78. Pulz O. Valuable products from biotechnology of microalgae / O. Pulz, W. Gross // *Appl. Microbiol. Biotechnol*. – 2004. – V. 65. – P. 635–648.
79. Romanenko P.O. Innovative bioproduct based on soil nitrogen-fixing cyanobacterium *Nostoc commune* / P.O. Romanenko, K.O. Romanenko, O.A. Brytik // Publishing House “Baltija Publishing”. – 2023. – P. 24-27.
80. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні. – Міністерство аграрної політики та продовольства України [Електронний ресурс] – Режим посилання: <https://minagro.gov.ua/file-storage/reyestr-sortiv-roslin>.

81. Кіндрок М. Методи визначення якості насіння сільськогосподарських культур / О. Слюсаренко, В. Гечу, В. Маласай, М. Гаврилюк // Київ, Держспоживстандарт України, 2003. – 170 с.
82. Бойко Г.О. Схожість та енергія проростання насіння сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) різного кольору / Г.О. Бойко, Н.В. Пузріна // Лісові культури та лісова меліорація. – 2015. – С. 113-117.
83. Кушніренко О.І. Вплив обробки насіння соняшнику бактеріальними препаратами на посівні та врожайні властивості / О.І. Кушніренко, Г.О. Жатова // Селекція і насінництво. – 2008. – Випуск 95. – С. 203-209.
84. Пшиченко О.І. Формування посівних якостей насіння гречки залежно від передпосівної обробки / О.І. Пшиченко, М.В. Радченко // Меліорація, землеробство, рослинництво. – 2022. – № 13. – С. 121-125.
85. Wellburn A. The spectral determination of chlorophyll a and chlorophyll b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution // *J. Plant Physiol.* 1994. 144. P. 307—313.
86. Мусієнко М.М., Паршикова Т.В., Славний П.С. Спектрофотометричні методи в практиці фізіології, біохімії та екології рослин // Фітосоціоцентр. Київ. 2001, 201 с.
87. Firoozjaei M.H.A. Study the Effect of the Terrestrial Cyanobacterium *Nostoc commune* Aqueous Extract on Seed Germination and Seedling Growth of Rice / M.H.A. Firoozjaei, S.B. Hassani, E. Nazifi, S. Keypour // *Journal of Phycological Research.* – 2021. – V. 5. – No. 1. – P. 642-653.
88. Santini G. Plant Biostimulants from Cyanobacteria: An Emerging Strategy to Improve Yields and Sustainability in Agriculture / G. Santini, N. Biondi, L. Rodolfi, M.R. Tredici // *Plants (Basel).* – 2021. – V. 10. – No. 4. – P. 643.
89. Mutale-Joan C. Screening of microalgae liquid extracts for their biostimulant properties on plant growth, nutrient uptake and metabolite profile of *Solanum lycopersicum* L. / C. Mutale-joan, B. Redouane, E. Najib, K. Yassine, K. Lyamlouli, S. Laila, Y. Zeroual, H. El Arroussi // *Sci. Rep.* – 2020. – V. 10. – P. 2820.

90. Mahmoud S.A. Influence of different algal species application on growth of spinach plant (*Spinacia oleracea* L.) and their role in phytoremediation of heavy metals from polluted soil / S.A. Mahmoud, A.M. Abd El-Aty, H. Kandil, H.S. Siam // *Plant Archives*. – 2019. – Vol. 19. – Supplement 2. – P. 2275-2281.
91. Романенко К.О. Вплив короткотривалих температурних стресів і помірної ґрунтової посухи на пігментний комплекс пшениці, спельти і жита / К.О. Романенко, Л.М. Бабенко, І.В. Косаківська // *Фізіологія рослин і генетика*. – 2023. – Т. 55. – № 6. – С. 528-538.
92. Younesi H. Plant Growth Promoting Potential of *Phormidium* sp. ISC108 on Seed Germination, Growth Indices and Photosynthetic Efficiency of Maize (*Zea mays* L.) / H. Younesi, S.B. Hassani, A. Ghotbi-Ravandi, N. Soltani // *Journal of Phycological Research*. – 2019. – V. 3. – No. 2. – P. 375-385.
93. Ashraf M. Photosynthesis under stressful environments: an overview / M. Ashraf, P.J.C. Harris // *Photosynthetica*. – 2013. – V. 51. – pp. 163-190.
94. Asada K. Radical production and scavenging in the chloroplasts // *Photosynthesis and the Environment*. — Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1996. – P. 123-150.
95. Bailey S. Acclimation of *Arabidopsis thaliana* to the light environment: the relationship between photosynthetic function and chloroplast composition / S. Bailey, P. Horton, R.G. Walters // *Planta*. – 2004. – V. 218. – No. 5. – pp. 793-802.
96. Yang Y.-Z. Low temperature effects on carotenoids biosynthesis in the leaves of green and albino tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) / Y.-Z. Yang, T. Li, R.-M. Teng, M.-H. Han, J. Zhuang // *Sci. Hort.* – 2021. – V. 285. – P. 110-164.
97. Johnston M. Chlorophyll a/b ratios and photosystem activity of mesophyll and bundle sheath fractions from sodium-deficient C4 plants / M. Johnston, C.P.L. Grof, P.F. Brownell // *Aust. J. Plant Physiol.* – 1989. – V. 16. – pp. 449-457.

98. Lichtenthaler H.K. Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll a/b and chlorophylls to carotenoids $(a+b)/(x+c)$ in C4 plants as compared to C3 plants / H.K. Lichtenthaler, F. Babani // *Photosynthetica*. – 2022. – V. 60. – P. 3-9.