

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Кафедра екології та технологій захисту навколишнього середовища

О.С. Ковров

БІОМАЙНІНГ

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт
для здобувачів ступеня магістра освітньо-професійної програми
«Екологія» зі спеціальності Е2 Екологія

Дніпро
НТУ «ДП»
2026

Біомайнінг [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для здобувачів ступеня магістра освітньо-професійної програми «Екологія» зі спеціальності Е2 Екологія / уклад. О.С. Ковров ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2026. – 90 с.

Укладач

О.С. Ковров, д-р техн. наук, проф.

Затверджено науково-методичною комісією зі спеціальності Е2 Екологія (протокол №12 від 06.07.2026 р.) за поданням кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища (протокол №12 від 29.06.2026 р.).

Орієнтовано на активізацію навчальної діяльності здобувачів освітньо-професійної програми «Екологія» другого (магістерського) рівня вищої освіти, формування навичок виконання лабораторних досліджень у сфері біомайнінгу, біовилуговування, фіторе mediaції та фітомайнінгу, а також опрацювання даних для екологічно безпечного вилучення цінних компонентів із техногенних відходів і забруднених об'єктів довкілля.

Відповідальний за випуск завідувачка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища О.О. Борисовська, канд. техн. наук, доц.

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Методичні рекомендації до виконання циклу лабораторних робіт базуються на основних теоретичних положеннях лекційного курсу «Біомайнінг» та спрямовані на формування у здобувачів ступеня магістра системного уявлення про біотехнологічні методи вилучення, мобілізації, концентрування та екологічно безпечного поводження з цінними компонентами у техногенних субстратах, забруднених ґрунтах, гірничопромислових відходах, рослинній біомасі та продуктивних розчинах.

Предметна область лабораторного практикуму охоплює фіторе mediaцію, фітоекстракцію, фітомайнінг, оцінювання рослинної біомаси як біоруди, біовилуговування цінних і критичних елементів, біосорбцію та осадження металів із продуктивних розчинів. Особлива увага приділяється поєднанню природоохоронної мети з ресурсним підходом, тобто одночасному зменшенню екологічного ризику техногенних субстратів і попередній оцінці можливості вилучення корисних компонентів.

Порядок виконання лабораторних робіт викладено за типовою методичною схемою: тема, мета лабораторної роботи, завдання, об'єкт і предмет дослідження, теоретичні відомості, матеріали та вихідні дані, вимоги безпеки, хід виконання роботи, розрахункова частина, інтерпретація результатів, форми таблиць для звіту, контрольні питання та критерії оцінювання.

Мета лабораторних робіт полягає у підготовці здобувачів-магістрів як майбутніх фахівців-екологів до вирішення комплексних завдань, пов'язаних із використанням біотехнологічних і природоорієнтованих підходів для відновлення забруднених територій, перероблення техногенних відходів, оцінювання фітоекстракційного потенціалу рослин, моделювання біовилуговування та очищення металовмісних розчинів.

У межах лабораторного практикуму біомайнінг розглядається як міждисциплінарний напрям, що поєднує екологію, біогеохімію, мікробіологію, фіторе mediaцію, гідрометалургію, техноекологію та циркулярну економіку. Такий підхід дає змогу оцінювати не лише ефективність вилучення елементів, а й екологічні ризики, безпечність технологічного ланцюга та доцільність подальшого масштабування рішень.

Поставлена мета досягається послідовним вирішенням таких типових завдань у межах кожної лабораторної роботи:

- ознайомлення з теоретичними положеннями фіторе mediaції, фітоекстракції, фітомайнінгу, біовилуговування, біосорбції та осадження металів;
- вибір і обґрунтування рослин-фітоекстракторів, рослин-гіперакумуляторів або модельних тест-культур для роботи із забрудненими ґрунтами й техногенними субстратами;
- оцінювання фітотоксичності субстратів за показниками проростання, росту коренів, формування біомаси та морфологічного стану рослин;
- проведення вегетаційних або розрахунково-модельних експериментів із визначенням фітоекстракційного потенціалу рослин;

- розрахунок коефіцієнтів біоаккумуляції, біоконцентрації, транслокації, толерантності, збагачення, вилучення та залишкового забруднення;
- оцінювання рослинної біомаси і золи як потенційної біоруди для подальшого вилучення цінних компонентів;
- моделювання біовилуговування металів і критичних елементів із рослинної золи та техногенних субстратів без виконання небезпечних практичних операцій;
- моделювання біосорбції та осадження металів із продуктивних розчинів після біовилуговування;
- складання балансів мас і порівняльних рейтингових матриць для вибору найбільш перспективних біомайнінгових стратегій;
- формулювання екологічного висновку щодо доцільності застосування фіторе mediaційної, фітомайнінгової, біовилуговувальної або стабілізаційної технології.

У результаті виконання циклу лабораторних робіт здобувачі мають набути конкретних практичних навичок з:

- підбору рослин-фітоекстракторів і оцінювання їх придатності для вилучення важких металів та критичних елементів;
- проведення біотестування і біоіндикаційної оцінки фітотоксичності забруднених ґрунтів і техногенних субстратів;
- планування вегетаційних дослідів та аналізу ростових, морфологічних і біомасових показників рослин;
- інтерпретації коефіцієнтів ВАС, BCF, TF та інших індикаторів фітоекстракції, фітостабілізації й фітомайнінгу;
- оцінювання рослинної біомаси як потенційної біоруди за показниками сухої маси, зольності, умовної концентрації елементів у золі та коефіцієнтів збагачення;
- побудови розрахункових моделей біовилуговування цінних компонентів із золи та техногенних субстратів;
- оцінювання ефективності біосорбції, осадження металів і очищення продуктивних розчинів;
- побудови загального балансу біомайнінгового ланцюга «субстрат – рослина – біомаса – зола – продуктивний розчин – вторинний концентрат»;
- обґрунтування екологічної безпечності запропонованих технологічних рішень і виявлення можливих вторинних ризиків;
- оформлення лабораторного звіту з таблицями, розрахунками, графіками, екологічною інтерпретацією та висновками.

МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Виконання лабораторних робіт з дисципліни «Біомайнінг» передбачає підготовку вихідних даних, проведення навчальних лабораторних або вегетаційних спостережень, використання модельних наборів даних, виконання розрахунків і формування екологічно обґрунтованих висновків щодо перспективності біомайнінгової технології.

Вихідні дані можуть бути отримані під час безпечних лабораторних операцій, вегетаційних дослідів, біотестування, морфологічних спостережень, вимірювання рН та електропровідності, визначення маси рослинної біомаси або з апріорі підготовлених викладачем баз даних. Для окремих етапів, які потребують спеціального обладнання або можуть бути потенційно небезпечними, використовуються лише розрахункові чи демонстраційні дані.

Лабораторні роботи № 1–3 мають переважно експериментально-аналітичний характер і спрямовані на підбір рослин-фітоекстракторів, біотестування фітотоксичності субстратів та вегетаційну оцінку фітоекстракційного потенціалу. У цих роботах здобувачі працюють із насінням, рослинами, контрольними та дослідними субстратами, виконують спостереження, вимірювання, визначення біомаси і розрахунок індикаторів фітоекстракції.

Лабораторні роботи № 4–6 мають переважно розрахунково-модельний характер. У них аналізується рослинна біомаса як потенційна біоруда, моделюється біовилуговування цінних компонентів із золи або техногенних субстратів, а також виконується розрахункова оцінка біосорбції та осадження металів із продуктивних розчинів. Практичне озолення, кислотне розкладання, біовилуговування, культивування мікроорганізмів, осадження металів або робота з токсичними розчинами студентами не виконуються.

Підсумкова комплексна розрахункова робота узагальнює результати всіх лабораторних робіт і передбачає побудову наскрізного балансу біомайнінгового ланцюга від забрудненого субстрату до очищеного продуктивного розчину або вторинного металовмісного концентрату.

Загальна послідовність виконання лабораторної роботи включає такі етапи:

- отримання індивідуального завдання, ознайомлення з метою, завданнями та вихідними даними;
- аналіз типу досліджуваного субстрату, рослинної біомаси, золи або продуктивного розчину;
- вибір показників, які необхідно визначити або розрахувати відповідно до теми роботи;
- ознайомлення з вимогами безпеки та обмеженнями щодо роботи із забрудненими матеріалами;
- підготовка таблиць для первинних даних, розрахункових показників і екологічної інтерпретації;
- виконання лабораторних спостережень, вимірювань або розрахунково-модельних операцій;
- розрахунок основних коефіцієнтів, індексів, балансів мас і ефективності технологічних стадій;
- порівняння отриманих результатів із критеріальними шкалами або рейтинговими матрицями;
- побудова графіків, діаграм або блок-схем технологічного процесу;
- формування висновку щодо екологічної безпечності, технологічної доцільності та перспективності запропонованої біомайнінгової схеми.

Кожна лабораторна робота виконується за індивідуальним або груповим варіантом. Варіанти можуть відрізнятися типом субстрату, видом рослини, цільовим елементом, концентрацією металу, масою біомаси, зольністю, ефективністю біовилуговування, параметрами біосорбції або сценарієм очищення продуктивного розчину.

Для забезпечення порівнянності результатів усі розрахунки виконуються в узгоджених одиницях вимірювання. Маса субстратів і біомаси за потреби переводяться у кілограми, концентрації елементів подаються у мг/кг або мг/л, а ефективність процесів — у відсотках. Особливу увагу необхідно приділяти правильному складанню балансу мас, оскільки саме він дозволяє оцінити реалістичність запропонованої технологічної схеми.

У роботах, пов'язаних із рослинами, студент аналізує схожість, виживаність, ріст, біомасу, морфологічні ознаки, коефіцієнти біоаккумуляції, біоконцентрації та транслокації. У роботах, пов'язаних із біорудою, біовилуговуванням і очищенням розчинів, основна увага приділяється зольності, коефіцієнтам збагачення, ефективності переходу елементів у розчин, сорбційній ємності, осадженню, залишковим концентраціям та вторинним відходам.

При необхідності розрахунковий експеримент може повторюватися зі зміненими вихідними даними. Це дає змогу оцінити вплив різних сценаріїв на ефективність технології: зміну виду рослини, урожайності біомаси, концентрації елемента у субстраті, зольності, ефективності біовилуговування, маси біосорбенту або ефективності осадження.

Завершальним етапом кожної лабораторної роботи є екологічна інтерпретація результатів. Студент повинен не лише виконати розрахунки, а й пояснити, чи є досліджуваний об'єкт перспективним для фіторе mediaції, фітоекстракції, фітомайнінгу, біовилуговування або біосорбційного очищення, а також які ризики можуть виникати на кожній стадії технологічного ланцюга.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити: назву роботи, мету, завдання, коротке теоретичне обґрунтування, характеристику вихідних даних, хід виконання, таблиці первинних і розрахункових показників, необхідні формули, результати розрахунків, графічне подання даних, екологічну оцінку, висновки та відповіді на контрольні питання.

Усі лабораторні роботи виконуються з дотриманням принципу екологічної та лабораторної безпеки. Забруднені ґрунти, техногенні субстрати, рослинна біомаса, зола, модельні продуктивні розчини та металовмісні залишки розглядаються як потенційно небезпечні матеріали. Їх використання допускається лише в межах затверджених навчальних процедур, під контролем викладача та без виконання студентами небезпечних хімічних або мікробіологічних операцій.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ПІДБІР РОСЛИН-ФІТОЕКСТРАКТОРІВ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ТА КРИТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ І ТЕХНОГЕННИХ СУБСТРАТІВ

Мета роботи: Сформувати у здобувачів практичні навички підбору та порівняльної оцінки рослин-фітоекстракторів для вилучення важких металів, критичних елементів та інших потенційно токсичних компонентів із забруднених ґрунтів, гірничопромислових відходів, техногенних субстратів, хвостів збагачення, золи, шламів або модельних субстратів.

Лабораторна робота спрямована на оцінювання придатності різних видів рослин до фітоекстракції, фітоаккумуляції або фітостабілізації на основі показників схожості, виживаності, біомаси, морфологічного стану, толерантності до забруднення, накопичення елементів у коренях і надземній частині рослин, а також розрахунку коефіцієнтів біоконцентрації, транслокації та інтегрального індексу фітоекстракційної придатності.

Завдання лабораторної роботи:

1. Обрати групу потенційних рослин-фітоекстракторів для досліджуваного субстрату.
2. Провести попереднє ранжування рослин за біологічними, екологічними та технологічними критеріями.
3. Закласти лабораторний або вегетаційний дослід із вирощування тестових рослин на контрольному та забрудненому субстратах.
4. Визначити показники проростання, виживаності, росту, біомаси та морфологічної стійкості рослин.
5. За наявності результатів хімічного аналізу визначити концентрації металів у субстраті, коренях і надземній біомасі.
6. Розрахувати коефіцієнти біоаккумуляції, біоконцентрації, транслокації, індекс толерантності та потенціал вилучення металу.
7. Побудувати рейтингову матрицю придатності рослин до фітоекстракції.
8. Зробити екологічний висновок щодо доцільності використання обраних рослин для фіторе mediaції, фітостабілізації або фітомайнінгу.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження: забруднений ґрунт або техногенний субстрат, що потенційно містить важкі метали, критичні елементи або інші токсичні компоненти.

Предмет дослідження: здатність різних видів рослин до проростання, росту, виживання, накопичення та транслокації металів у забрудненому субстраті.

1. Теоретичні відомості.

Фітоекстракція – це напрям фіторе mediaції, що передбачає поглинання рослинами забруднювачів із ґрунту або субстрату, їх транспортування з коренів до надземної біомаси та подальше вилучення забруднювачів разом із рослинною масою. Цей підхід застосовується для зменшення вмісту важких металів,

металоїдів і деяких критичних елементів у забруднених ґрунтах або техногенних субстратах.

Фітомайнінг є спеціалізованим напрямом фітоекстракції, у якому рослини використовують не лише для очищення середовища, а й для одержання біомаси, збагаченої цінними елементами. Після збирання рослинна біомаса може бути висушена, термічно оброблена або використана як біоруда для подальшого вилучення металів. У навчальній лабораторній роботі реальне вилучення металів із біомаси не проводиться, але оцінюється потенційна придатність рослин до такого процесу.

Рослини-фітоекстрактори повинні відповідати кільком основним критеріям:

- здатність проростати та виживати на забрудненому субстраті;
- достатня швидкість росту;
- формування значної надземної біомаси;
- толерантність до токсичної дії металів, засоленості, кислотності або дефіциту поживних речовин;
- здатність накопичувати цільові елементи;
- ефективне переміщення елементів із коренів у надземну частину;
- можливість безпечного збирання та утилізації біомаси;
- адаптованість до місцевих кліматичних умов;
- низький ризик інвазійності та небажаного поширення.

У лабораторних умовах доцільно порівнювати кілька груп рослин:

1. Швидкорослі тест-культури: крес-салат, гірчиця, редис, пшениця, ячмінь.
2. Рослини з високою біомасою: соняшник, кукурудза, сорго, амарант.
3. Потенційні фітоекстрактори металів: гірчиця сарептська, ріпак, люпин, конюшина, злакові культури.
4. Відомі гіперакумулятори: *Noccaea caerulescens*, *Alyssum* spp., *Berkheya coddii*, *Pteris vittata* та інші, якщо вони доступні для навчального або демонстраційного аналізу.

У реальних умовах вибір рослини залежить не лише від її здатності накопичувати метал, а й від здатності формувати достатню біомасу. Рослина з дуже високою концентрацією металу, але малою біомасою, може мати нижчий загальний потенціал вилучення, ніж менш активний акумулятор із великою надземною масою.

Для навчальних лабораторних і вегетаційних експериментів доцільно розділяти справжні гіперакумулятори та практичні фітоекстрактори з високою біомасою. Серед гіперакумуляторів особливо важливі представники родини Капустяні / Хрестоцвіті (*Brassicaceae*), зокрема *Noccaea*, *Arabidopsis*, *Alyssum* / *Odontarrhena*; водночас *Brassica juncea* і *Brassica napus* часто використовують у лабораторних дослідках завдяки швидкому росту, доступності насіння та достатній біомасі (табл. 1.1).

Для лабораторних досліджень найкраще обрати рослини: гірчицю сарептську (*Brassica juncea*), ріпак (*Brassica napus*), соняшник (*Helianthus annuus*), кукурудзу (*Zea mays*) та амарант (*Amaranthus caudatus*).

Таблиця 1.1 – Рослини-гіперакумулятори та фітоекстрактори

№	Рослина українською та латинською назвою	Типове значення для лабораторних дослідів	Основні елементи
1	Гірчиця сарептська / індійська гірчиця (<i>Brassica juncea</i>)	Дуже зручна модельна рослина-фітоекстрактор родини Хрестоцвітих	Cd, Pb, Zn, Ni, Cu, Cr
2	Ріпак / капуста ріпак (<i>Brassica napus</i>)	Практичний фітоекстрактор із високою біомасою; зручний для вегетаційних дослідів	Cd, Pb, Zn, Cu
3	Нокея синювата / талабан синюватий (<i>Nocca caerulescens</i> , syn. <i>Thlaspi caerulescens</i>)	Класичний гіперакумулятор родини Хрестоцвітих; модель для Zn/Cd/Ni	Zn, Cd, Ni
4	Різушка Галлера (<i>Arabidopsis halleri</i>)	Відомий модельний гіперакумулятор родини Хрестоцвітих	Zn, Cd
5	Бурачок муровий (<i>Alyssum murale</i> , syn. <i>Odontarrhena murale</i>)	Нікелевий гіперакумулятор родини Хрестоцвітих	Ni
6	Бурачок корсиканський (<i>Alyssum corsicum</i> , syn. <i>Odontarrhena corsica</i>)	Нікелевий гіперакумулятор; використовується у дослідженнях фітомайнінгу	Ni
7	Соняшник однорічний (<i>Helianthus annuus</i>)	Поширений лабораторний і вегетаційний фітоекстрактор із високою біомасою	Pb, Cd, Zn, Cu, Ni
8	Кукурудза звичайна (<i>Zea mays</i>)	Зручна високобіомасова культура для порівняльної фітоекстракції	Cd, Pb, Zn, Cu
9	Щириця хвостата / амарант (<i>Amaranthus caudatus</i>)	Швидкоросла рослина з високою біомасою для модельних дослідів	Cd, Pb, Zn, Cu
10	Седум Альфреда (<i>Sedum alfredii</i>)	Відомий гіперакумулятор, часто використовується у дослідженнях накопичення Zn і Cd	Zn, Cd, Pb

2. Матеріали, обладнання та реактиви.

Для виконання роботи необхідні:

- контрольний ґрунт або чистий піщано-ґрунтовий субстрат;
- досліджуваний забруднений ґрунт або техногенний субстрат;
- насіння обраних рослин: гірчиця, ріпак, крес-салат, пшениця, ячмінь, соняшник, люпин, сорго, амарант або інші види;
- пластикові контейнери, горщики або лабораторні лотки;
- фільтрувальний папір або марля;
- дистильована вода;
- лабораторні ваги;
- лінійка або штангенциркуль;
- рН-метр або індикаторний папір;
- кондуктометр;
- сушильна шафа, за наявності;
- ножиці або скальпель для відділення коренів і пагонів;
- паперові пакети або марковані контейнери для біомаси;
- засоби індивідуального захисту: халат, рукавички, захисні окуляри.

За наявності аналітичної бази додатково використовують результати хімічного аналізу вмісту металів у субстраті, коренях і надземній частині рослин. Якщо модельне забруднення створюється в навчальних цілях, усі розчини солей металів готує лише викладач або відповідальна лабораторна особа з дотриманням правил безпеки. Студенти не виконують самостійне приготування токсичних розчинів.

3. Вимоги безпеки.

Під час роботи із забрудненими субстратами та рослинною біомасою, яка може містити токсичні елементи, необхідно працювати в рукавичках, лабораторному халаті та захисних окулярах. Не дозволяється торкатися руками обличчя, вживати їжу або напої у лабораторії. Після завершення дослідів всі залишки субстратів, фільтрувальний папір, корені, пагони та інші матеріали збирають у спеціально позначені контейнери.

Забороняється виносити рослинну біомасу, вирощену на забруднених субстратах, за межі лабораторії або використовувати її як корм, компост чи органічне добриво. Утилізація здійснюється відповідно до інструкцій викладача та правил поводження з потенційно забрудненими матеріалами.

4. Очікувані результати навчання при виконанні роботи.

За результатами виконання лабораторної роботи здобувачі мають набути таких навичок та вмінь:

- (ПР21.3-С1) обирати потенційні рослини-фітоекстрактори для забруднених ґрунтів і техногенних субстратів, визначати біоіндикаційні показники, розраховувати коефіцієнти біоаккумуляції та транслокації, розрізняти рослини, придатні для фітоекстракції та фітомайнінгу, обґрунтовувати вибір рослин для практичного використання у фіторе mediaційних і біомайнінгових технологіях.

5. Хід виконання лабораторного експерименту.

Рекомендується використовувати не менше трьох видів рослин і два типи субстратів: контрольний субстрат та забруднений субстрат або техногенний матеріал. Приклад схеми дослідів наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Приклад схеми дослідів

Варіант	Субстрат	Рослина	Повторність
К1	Контрольний ґрунт	Гірчиця	1–3
К2	Контрольний ґрунт	Пшениця	1–3
К3	Контрольний ґрунт	Соняшник	1–3
Д1	Забруднений субстрат	Гірчиця	1–3
Д2	Забруднений субстрат	Пшениця	1–3
Д3	Забруднений субстрат	Соняшник	1–3

Для більш детального дослідження можна застосувати градієнт забрудненого субстрату:

- 100 % контрольного ґрунту;
- 25 % забрудненого субстрату + 75 % контрольного ґрунту;
- 50 % забрудненого субстрату + 50 % контрольного ґрунту;
- 75 % забрудненого субстрату + 25 % контрольного ґрунту;
- 100 % забрудненого субстрату.

Кожен варіант виконується щонайменше у трьох повторностях. У кожен контейнер висівають однакову кількість насінин. Для дрібнонасінних культур можна використовувати 20–30 насінин, для великих культур – 5–10 насінин на повторність.

6. Критерії попереднього підбору рослин-фітоекстракторів.

Перед закладанням дослідів студенти складають попередню характеристику кожного виду рослин за відомими критеріями фітоекстракції (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Оцінка фітоекстракційного потенціалу рослин

Критерій	Оцінка, балів
Швидкість проростання	0–5
Толерантність до забруднення	0–5
Потенціал формування біомаси	0–5
Розвиненість кореневої системи	0–5
Здатність до накопичення металів	0–5
Здатність до транслокації у надземну частину	0–5
Придатність до збирання біомаси	0–5
Екологічна безпечність використання	0–5

Попередній рейтинг рослини:

$$R_{\text{поп}} = \Sigma B, \quad (1.1)$$

де $R_{\text{поп}}$ – попередній рейтинг рослини, балів; ΣB – сума балів за всіма критеріями.

Максимальна оцінка становить 40 балів. Рослини з оцінкою понад 30 балів вважаються перспективними для лабораторного скринінгу; 20–30 балів — умовно перспективними; менше 20 балів – малоперспективними для фітоекстракції, але вони можуть бути використані для порівняння.

7. Методика виконання лабораторної роботи.

7.1. Підготовка субстрату.

Відібрати контрольний і дослідний субстрати. Видалити великі камені, рослинні рештки та сторонні домішки. За потреби просіяти субстрат через сито. Визначити вологість, рН та електропровідність водної витяжки. Розкласти субстрати у підписані контейнери однакового об'єму. Зволожити субстрат до однакового рівня вологості.

7.2. Висівання насіння.

Відібрати насіння однакового розміру без видимих пошкоджень. У кожен контейнер висіяти однакову кількість насінин. Насіння розміщувати рівномірно по поверхні субстрату. Злегка присипати насіння тонким шаром субстрату. Контейнери підписати: номер варіанта, назва рослини, тип субстрату, повторність. Поставити контейнери в однакові умови освітлення та температури.

7.3. Вирощування рослин.

Підтримувати однакову вологість у всіх варіантах. Не допускати пересихання або перезволоження субстрату. Щоденно фіксувати дату появи проростків. На 3–5 добу визначити енергію проростання. На 7–10 добу визначити лабораторну схожість. Через 14–21 добу визначити ростові показники. За можливості продовжити вегетаційний дослід до 30–45 діб для оцінки формування біомаси.

7.4. Визначення морфологічних ознак.

Для кожної рослини фіксують: нормальний розвиток, пригнічення росту, хлороз листків, некроз листків, потемніння або деформацію коренів, зменшення кількості бічних коренів, викривлення проростків, нерівномірний розвиток, повну загибель рослин.

Морфологічні ознаки є важливими для оцінювання толерантності рослин до субстрату. Рослина, яка накопичує метал, але різко пригнічується або гине, не може вважатися ефективним фітоекстрактором для практичних умов.

7.5. Відбір рослинної біомаси.

Наприкінці досліду обережно витягти рослини із субстрату. Відокремити корені від надземної частини. Очистити корені від частинок субстрату. Промити корені дистильованою водою. Промокнути фільтрувальним папером. Визначити сиру масу коренів і надземної частини. За наявності сушильної шафи висушити біомасу до сталої маси. Визначити суху масу коренів і надземної частини. Якщо передбачено хімічний аналіз, висушену біомасу маркують і передають для визначення концентрацій металів у коренях і пагонах.

7.6. Показники, що визначаються.

Під час лабораторної роботи визначають наступні показники:

- Кількість висіяних насінин, N;
- Кількість пророслих насінин, n;
- Схожість, G, %;
- Вживаність рослин, S, %;
- Середню висоту рослин, H, см;
- Середню довжину кореня, Lr, см;
- Сиру масу коренів, Br, г;
- Сиру масу надземної частини, Bs, г;
- Суху масу коренів, Bdr, г;
- Суху масу надземної частини, Bds, г;
- Частку морфологічно пошкоджених рослин, M, %;
- рН субстрату або водної витяжки;
- Електропровідність, ЕС, мСм/см;
- Концентрацію цільового елемента у субстраті, Csoil;
- Концентрацію цільового елемента у коренях, Croot;
- Концентрацію цільового елемента у надземній частині, Cshoot;
- Коефіцієнт біоконцентрації;
- Коефіцієнт транслокації;
- Потенціал вилучення металу рослиною;
- Інтегральний індекс фітоекстракційної придатності.

8. Розрахункова частина.

8.1. Схожість насіння розраховується за формулою:

$$G = n / N \times 100, \quad (1.2)$$

де G – схожість, %; n – кількість пророслих насінин; N – загальна кількість висіяних насінин.

8.2. Вживаність рослин розраховується за формулою:

$$S = N_s / n \times 100, \quad (1.3)$$

де S – вживаність рослин, %; N_s – кількість живих рослин наприкінці досліду; n – кількість пророслих насінин.

8.3. Індекс толерантності за біомасою розраховується за формулою:

$$TIB = B_d / B_k \times 100, \quad (1.4)$$

де TIB – індекс толерантності за біомасою, %; B_d – біомаса рослини у дослідному субстраті; B_k – біомаса тієї самої рослини у контролі.

8.4. Індекс толерантності за довжиною кореня розраховується за формулою:

$$TIR = L_{rd} / L_{rk} \times 100, \quad (1.5)$$

де TIR – індекс толерантності за довжиною кореня, %; L_{rd} – середня довжина кореня у досліді; L_{rk} – середня довжина кореня у контролі.

8.5. Коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині розраховується за формулою:

$$BAC = C_{shoot} / C_{soil}, \quad (1.6)$$

де BAC – коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині; C_{shoot} – концентрація металу або елемента у надземній частині рослини; C_{soil} – концентрація цього елемента у ґрунті або субстраті.

$BAC > 1$ свідчить про здатність рослини активно накопичувати елемент у надземній біомасі.

8.6. Коефіцієнт біоконцентрації у коренях розраховується за формулою:

$$BCF = C_{root} / C_{soil}, \quad (1.7)$$

де – коефіцієнт біоконцентрації у коренях; C_{root} – концентрація елемента у коренях; C_{soil} – концентрація елемента у субстраті.

$BCF > 1$ свідчить про здатність рослини накопичувати елемент у кореневій системі.

8.7. Коефіцієнт транслокації розраховується за формулою:

$$TF = C_{shoot} / C_{root}, \quad (1.8)$$

де TF – коефіцієнт транслокації; C_{shoot} – концентрація елемента у надземній частині; C_{root} – концентрація елемента у коренях.

$TF > 1$ свідчить про ефективне переміщення елемента з коренів у надземну частину, що є важливою ознакою фітоекстракції та фітомайнінгу.

$TF < 1$ свідчить про переважне накопичення елемента у коренях, що більше відповідає фітостабілізації.

8.8. Потенціал вилучення металу надземною біомасою розраховується за формулою:

$$U_{shoot} = C_{shoot} \times B_{ds}, \quad (1.9)$$

де U_{shoot} – кількість елемента, акумульованого у надземній біомасі; C_{shoot} – концентрація елемента у надземній частині; B_{ds} – суха маса надземної частини.

Цей показник є дуже важливим для фітомайнінгу, оскільки враховує не лише концентрацію металу в рослині, а й фактичну кількість сформованої біомаси.

8.9. Загальний потенціал акумуляції рослиною розраховується за формулою:

$$U_{total} = C_{shoot} \times B_{ds} + C_{root} \times B_{dr}, \quad (1.10)$$

де U_{total} – загальна кількість елемента, акумульованого рослиною; C_{shoot} – концентрація елемента у надземній частині; B_{ds} – суха маса надземної частини; C_{root} – концентрація елемента у коренях; B_{dr} – суха маса коренів.

8.10. Ефективність вилучення елемента із субстрату розраховується за формулою:

$$RE = U_{shoot} / M_{soil} \times C_{soil} \times 100, \quad (1.11)$$

де RE – ефективність вилучення елемента, %; U_{shoot} – кількість елемента в надземній біомасі; M_{soil} – маса субстрату у контейнері; C_{soil} – концентрація елемента у субстраті.

У лабораторних умовах цей показник часто має невисокі значення, але він дозволяє порівняти різні рослини між собою.

8.11. Інтегральний індекс фітоекстракційної придатності.

Для порівняльного ранжування рослин рекомендується використовувати інтегральний індекс фітоекстракційної придатності:

$$IPE = 0,25 \times TIB + 0,25 \times S + 0,20 \times BACn + 0,20 \times TFn + 0,10 \times Bn, \quad (1.12)$$

де IPE – інтегральний індекс фітоекстракційної придатності, %; TIB – індекс толерантності за біомасою, %; S – виживаність рослин, %; BACn – нормований показник біоаккумуляції, %; TFn – нормований показник транслокації, %; Bn – нормований показник біомаси, %.

Нормування показників здійснюється відносно найкращого значення серед усіх досліджуваних рослин:

$$Xn = Xi / X_{\max} \times 100, \quad (1.13)$$

де Xn – нормований показник, %; Xi – значення показника для конкретної рослини; X_{max} – максимальне значення цього показника серед усіх рослин у досліді.

8.12. Інтерпретація результатів.

Для оцінювання придатності рослин до різних напрямів фіторемедіації використовують такі критерії (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Критерії фіторемедіації

Показники	Інтерпретація
BAC > 1, TF > 1, висока біомаса	Рослина перспективна для фітоекстракції або фітомайнінгу
BAC > 1, TF < 1, висока коренева біомаса	Рослина перспективна для фітостабілізації
BAC < 1, TF < 1, добра виживаність	Рослина може бути придатною для рекультивації, але не для вилучення металів
Висока концентрація металу, але низька біомаса	Обмежена практична придатність для фітоекстракції
Висока біомаса, але низька акумуляція	Придатна для фітостабілізації або поліпшення субстрату
Низька виживаність і пригнічений ріст	Рослина непридатна для цього субстрату без попередньої меліорації

8.13. Шкала оцінювання фітоекстракційної придатності (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Шкала оцінювання фітоекстракційної придатності

ІРЕ, %	Рівень придатності	Екологічна інтерпретація
> 80	Дуже висока	Рослина є пріоритетним кандидатом для фітоекстракції або фітомайнінгу
60–80	Висока	Рослина перспективна, але потребує додаткової перевірки
40–60	Середня	Рослина може використовуватися у змішаних фіторемедіаційних системах
20–40	Низька	Рослина малопридатна для фітоекстракції, але може мати стабілізаційне значення
< 20	Дуже низька	Рослина непридатна для досліджуваного субстрату

9. Приклад розрахунку.

У досліді порівнювали три рослини: гірчицю, пшеницю та соняшник. Для спрощеного прикладу наведено результати для гірчиці.

Контрольна суха біомаса надземної частини гірчиці становила 1,20 г. Суха біомаса надземної частини у забрудненому субстраті становила 0,84 г. Кількість пророслих рослин – 20. Кількість живих рослин наприкінці досліду – 17. Концентрація металу у субстраті – 100 мг/кг. Концентрація металу у коренях – 180 мг/кг. Концентрація металу у надземній частині – 130 мг/кг.

9.1. *Виживаність*: $S = 17 / 20 \times 100 = 85 \%$.

9.2. *Індекс толерантності за біомасою*: $TIB = 0,84 / 1,20 \times 100 = 70 \%$.

9.3. *Коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині*: $BAC = 130 / 100 = 1,30$.

9.4. *Коефіцієнт біоконцентрації у коренях*: $BCF = 180 / 100 = 1,80$.

9.5. *Коефіцієнт транслокації*: $TF = 130 / 180 = 0,72$.

Висновок за прикладом: гірчиця здатна накопичувати метал як у коренях, так і в надземній частині, але коефіцієнт транслокації менший за 1. Це означає, що значна частина металу залишається у коренях. За таких умов рослина може бути перспективною для фітостабілізації або комбінованої фіторемедіації. Для фітоекстракції її доцільно використовувати лише за умови достатнього формування надземної біомаси та підтвердження стабільного накопичення металів у пагонах.

Форми таблиць для первинних експериментальних даних, результатів хімічного аналізу та розрахунків, рейтингової матриці підбору рослин-фітоекстракторів наведено нижче.

10. Форма таблиці для первинних експериментальних даних.

Варіант	Рослина	Повторність	N	n	G, %	Живих рослин	S, %	H, см	Lr, см	Сира маса, г	Суха маса, г
Контроль	Гірчиця	1									
Контроль	Гірчиця	2									
Контроль	Гірчиця	3									
Дослід	Гірчиця	1									
Дослід	Гірчиця	2									
Дослід	Гірчиця	3									
Дослід	Пшениця	1									
Дослід	Соняшник	1									

11. Форма таблиці для результатів хімічного аналізу та розрахунків

Рослина	Csoil	Croot	Cshoot	Bdr	Bds	BAC	BCF	TF	Ushoot	Utotal
Гірчиця										
Пшениця										
Соняшник										
Люпин										

12. Рейтингова матриця підбору рослин-фітоекстракторів

Рослина	Виживаність	Біомаса	BAC	TF	Толерантність	Технологічна придатність	ІРЕ, %	Ранг
Гірчиця								
Пшениця								
Соняшник								
Люпин								

13. Екологічна оцінка результатів лабораторного експерименту.

Після завершення розрахунків студент повинен надати екологічну оцінку кожної рослини:

1. Чи здатна рослина прорости на забрудненому субстраті?
2. Чи формує вона достатню біомасу?
3. Чи проявляє ознаки токсичного пригнічення?
4. Чи накопичує елемент у коренях?
5. Чи переносить елемент у надземну біомасу?
6. Чи може вона бути використана для фітоекстракції?
7. Чи доцільніше її використовувати для фітостабілізації?
8. Чи має рослина потенціал для фітомайнінгу?
9. Чи потрібна попередня меліорація субстрату?
10. Які екологічні ризики можуть виникнути при використанні цієї рослини?

14. Вимоги до оформлення звіту.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву лабораторної роботи.
2. Мету та завдання.

3. Коротке теоретичне обґрунтування фітоекстракції.
4. Характеристику досліджуваного субстрату.
5. Обґрунтування вибору рослин.
6. Схему експерименту.
7. Первинні експериментальні дані.
8. Результати визначення ростових показників.
9. Результати хімічного аналізу, якщо вони наявні.
10. Розрахунок ВАС, BCF, TF, Ushoot, Utotal та IPE.
11. Графіки або діаграми:
 - виживаність рослин;
 - суха біомаса;
 - коефіцієнт біоаккумуляції;
 - коефіцієнт транслокації;
 - інтегральний індекс фітоекстракційної придатності.
12. Рейтингову матрицю рослин.
13. Екологічну інтерпретацію результатів.
14. Висновки.
15. Відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Що таке фітоекстракція?
2. Чим фітоекстракція відрізняється від фітостабілізації?
3. Які властивості повинна мати рослина-фітоекстрактор?
4. Чому висока концентрація металу в рослині не завжди означає високу ефективність фітоекстракції?
5. Що показує коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині?
6. Що показує коефіцієнт біоконцентрації у коренях?
7. Яке значення має коефіцієнт транслокації?
8. Чому для фітомайнінгу важлива саме надземна біомаса?
9. Які рослини можна вважати перспективними для фітоекстракції?
10. Які рослини краще підходять для фітостабілізації?
11. Як рН субстрату впливає на біодоступність металів?
12. Як засоленість може впливати на результати фітоекстракції?
13. Чому необхідно враховувати екологічну безпечність рослин?
14. Які ризики пов'язані з утилізацією забрудненої рослинної біомаси?
15. Як результати лабораторного скринінгу можна використати для польового фіторемедіаційного проєкту?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

БІОТЕСТУВАННЯ ТА БІОІНДИКАЦІЯ ФІТОТОКСИЧНОСТІ ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ І ТЕХНОГЕННИХ СУБСТРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЧУТЛИВИХ РОСЛИН

Мета роботи: Сформувані у здобувачів практичні навички проведення біотестування та біоіндикаційної оцінки фітотоксичності забруднених ґрунтів, техногенних субстратів, відходів збагачення, зольних матеріалів, породних відвалів або модельних субстратів з використанням чутливих тест-рослин: крес-салату (*Lepidium sativum* L.), цибулі ріпчастої (*Allium cepa* L.), редису (*Raphanus sativus* L.), пшениці (*Triticum aestivum* L.) або інших швидкопроростаючих видів.

Лабораторна робота спрямована на оцінювання токсичного впливу забруднених субстратів на проростання насіння, ріст кореневої системи, формування надземної біомаси, морфологічний стан проростків та можливість подальшого використання досліджуваного субстрату для фіторе mediaції, фітостабілізації, фітоекстракції або фітомайнінгу.

Завдання лабораторної роботи:

1. Підготувати контрольний і дослідні зразки ґрунту або субстрату.
2. Провести біотестування методом пророщування насіння або методом водної витяжки із субстрату.
3. Визначити основні фітоіндикаційні показники: енергію проростання, схожість, довжину кореня, довжину пагона, біомасу проростків, наявність морфологічних порушень.
4. Розрахувати індекси фітотоксичності, індекс проростання, індекс толерантності та інтегральний біоіндикаційний індекс.
5. Надати екологічну оцінку токсичності досліджуваного субстрату.
6. Зробити висновок щодо придатності субстрату для подальших фіторе mediaційних або біомайнінгових досліджень.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження: забруднений ґрунт, техногенний субстрат, відвальна порода, хвости збагачення, зола, шлам, компостований матеріал або модельний субстрат.

Предмет дослідження: фітотоксичний вплив досліджуваного субстрату на проростання насіння, розвиток кореневої системи, формування надземної біомаси та морфологічний стан тест-рослин.

1. Теоретичні відомості.

Біотестування – це метод оцінювання якості об'єктів довкілля за реакцією живих організмів на дію забруднювачів. У випадку ґрунтів і техногенних субстратів біотестування дозволяє визначити не лише наявність токсичних речовин, а й їх біологічно доступну дію на рослинний організм.

Біоіндикація – це оцінювання стану середовища за змінами фізіологічних, морфологічних або ростових показників організмів-індикаторів. У фітоіндикаційних дослідженнях використовують рослини, які швидко реагують

на забруднення змінами проростання, росту коренів, формування біомаси, забарвленням тканин, пригніченням або деформацією проростків.

Для біотестування ґрунтів часто застосовують крес-салат, цибулю, редис, пшеницю, ячмінь, гірчицю, овес. Крес-салат є чутливим до широкого спектра забруднювачів і швидко проростає. Цибуля ріпчаста використовується для оцінювання токсичного впливу субстратів і водних витяжок на ріст кореневої системи. Пшениця або ячмінь можуть бути використані як більш стійкі тест-культури для порівняння реакцій різних видів.

У контексті дисципліни «Біомайнінг» така лабораторна робота має прикладне значення, оскільки дає змогу попередньо оцінити:

- токсичність субстратів, що можуть містити важкі метали, сульфіді, солі або залишкові продукти техногенного походження;
- придатність субстрату для первинної колонізації рослинами;
- можливість використання рослин для фіторе mediaції, фітостабілізації або фітоекстракції;
- необхідність попередньої меліорації субстрату перед висаджуванням фіторе mediaнтів;
- потенційні екологічні ризики використання техногенних субстратів у біомайнінгових або рекультиваційних технологіях.

2. Матеріали, обладнання та реактиви.

Для виконання роботи необхідні:

- зразки досліджуваного ґрунту або субстрату;
- контрольний субстрат: чистий кварцовий пісок, незабруднений ґрунт або фільтрувальний папір;
- насіння крес-салату, редису, пшениці або інших тест-рослин;
- цибулини *Allium cepa* L. приблизно однакового розміру;
- чашки Петрі, пластикові контейнери або лабораторні лотки;
- фільтрувальний папір або марля;
- мірні циліндри, піпетки, склянки;
- дистильована вода;
- лабораторні ваги;
- лінійка або штангенциркуль;
- термометр;
- рН-метр або індикаторний папір;
- кондуктометр для визначення електропровідності водної витяжки;
- маркери для підписування зразків;
- рукавички, халат, захисні окуляри.

За наявності можна додатково використовувати сушильну шафу, мікроскоп, фотофіксацію проростків, програмне забезпечення для обробки результатів у таблицях.

3. Вимоги безпеки.

Під час роботи із забрудненими ґрунтами та техногенними субстратами необхідно використовувати рукавички, лабораторний халат і захисні окуляри.

Не дозволяється торкатися руками обличчя, вживати їжу або напої в лабораторії. Зразки невідомого походження слід розглядати як потенційно забруднені. Після завершення роботи всі використані рослинні матеріали, фільтрувальний папір і залишки субстратів збирають у спеціально позначені контейнери для подальшої утилізації відповідно до інструкцій викладача.

Не допускається використання ґрунтів із радіоактивним, медичним, біологічно небезпечним або невідомим високотоксичним забрудненням без спеціального дозволу та лабораторних умов.

4. Очікувані результати навчання при виконанні роботи.

За результатами виконання лабораторної роботи здобувачі мають набути таких навичок та вмінь:

- (ПР21.3-С1) Обирати потенційні рослини-фітоекстрактори для забруднених ґрунтів і техногенних субстратів, визначати біоіндикаційні показники, розраховувати коефіцієнти біоаккумуляції та транслокації, розрізняти рослини, придатні для фітоекстракції та фітомайнінгу, обґрунтовувати вибір рослин для практичного використання у фіторе mediaційних і біомайнінгових технологіях;
- (ПР21.4-С1) Комплексно оцінювати техногенні субстрати як потенційні джерела цінних компонентів, обирати рослини для фітоекстракції та фітомайнінгу, розраховувати фітоекстракційні коефіцієнти, оцінювати рослинну біомасу як біоруду, моделювати біовилуговування цінних компонентів, складати баланс мас процесів біомайнінгу.

5. Хід виконання лабораторного експерименту.

5.1. Загальний підхід.

Рекомендується використовувати не менше трьох варіантів досліду:

1. Контроль – незабруднений ґрунт, чистий пісок або дистильована вода.
2. Дослідний зразок 1 – ґрунт або субстрат із потенційним забрудненням.
3. Дослідний зразок 2 – інший забруднений субстрат або розведення основного зразка.

Для встановлення залежності «доза – ефект» можна застосовувати серію розведень:

- 100 % досліджуваного субстрату;
- 75 % досліджуваного субстрату + 25 % чистого піску;
- 50 % досліджуваного субстрату + 50 % чистого піску;
- 25 % досліджуваного субстрату + 75 % чистого піску;
- контроль – 100 % чистого піску або незабрудненого ґрунту.

Кожен варіант досліду виконується щонайменше у трьох повторностях. У кожену повторність висівають 20 насінин крес-салату або редису. Для тесту з цибулею використовують не менше 3–5 цибулин на один варіант.

5.2. Методика підготовки ґрунтової водної витяжки.

Для оцінювання токсичності водорозчинної фракції забруднювачів можна використовувати метод водної витяжки.

1. Відібрати 10 г повітряно-сухого ґрунту або субстрату.
2. Помістити зразок у лабораторну склянку.

3. Додати 50 мл дистильованої води, тобто дотримати співвідношення ґрунт : вода = 1 : 5.
4. Перемішувати суспензію 30 хвилин.
5. Дати суміші відстоятися протягом 30–60 хвилин.
6. Відфільтрувати або обережно відібрати надосадову рідину.
7. Виміряти рН та електропровідність витяжки.
8. Використати витяжку для пророщування насіння або тесту з цибулею.

Водна витяжка дозволяє оцінити дію легкорозчинних солей, рухомих форм металів, кислих або лужних компонентів субстрату, які можуть швидко впливати на проростання рослин.

5.3. Методика біотестування з використанням крес-салату.

1. Підписати чашки Петрі або контейнери відповідно до варіантів досліду.
2. На дно кожної чашки покласти фільтрувальний папір або тонкий шар підготовленого субстрату.
3. У кожну чашку рівномірно розмістити 20 насінин крес-салату.
4. Для варіанта з водною витяжкою змочити фільтрувальний папір 5 мл відповідної витяжки.
5. Для контролю використати дистильовану воду.
6. Чашки закрити кришками або накрити плівкою для запобігання висиханню.
7. Інкубувати при температурі 20–25 °С протягом 72–120 годин.
8. Щоденно контролювати вологість і, за потреби, додавати однакову кількість води або витяжки.
9. Через 3–5 діб визначити кількість пророслих насінин.
10. Виміряти довжину кореня і пагона не менше ніж у 10 проростків з кожної повторності.
11. Зафіксувати морфологічні ознаки пригнічення: вкорочення кореня, потемніння кореневих кінчиків, викривлення коренів, хлороз, некроз, нерівномірне проростання, пліснявіння.

5.4. Методика біотестування з використанням цибулі ріпчастої.

1. Відібрати цибулини приблизно однакового розміру, без видимих механічних пошкоджень і ознак гниття.
2. Обережно очистити сухі зовнішні луски, не пошкоджуючи донце.
3. Помістити цибулини на склянки або пробірки так, щоб донце контактувало з водною витяжкою або дистильованою водою.
4. Для контролю використати дистильовану воду.
5. Витримувати цибулини протягом 72–96 годин при температурі 20–25 °С.
6. Щоденно перевіряти рівень рідини.
7. Після завершення експерименту визначити:
 - кількість коренів на цибулині;
 - середню довжину коренів;
 - довжину 5 найдовших коренів;
 - наявність морфологічних порушень: потемніння, потовщення, викривлення, зупинка росту, відмирання кінчиків коренів.

Тест з цибулею є зручним для оцінювання токсичного впливу

водорозчинних компонентів субстрату саме на кореневу систему, яка першою контактує із забрудненим середовищем.

5.5. Показники, що визначаються.

Під час виконання лабораторної роботи визначають такі показники:

- Загальна кількість висіяних насінин, N;
- Кількість пророслих насінин, n;
- Схожість насіння, G, %;
- Середня довжина кореня, Lr, мм;
- Середня довжина пагона, Ls, мм;
- Сира біомаса проростків, B, г;
- Суха біомаса проростків, за наявності сушильної шафи, Bd, г;
- Кількість морфологічно пошкоджених проростків, M, %;
- рН водної витяжки;
- Електропровідність водної витяжки, ЕС, мСм/см;
- Індекс проростання, GI, %;
- Індекс пригнічення росту кореня, IR, %;
- Індекс толерантності, TI, %;
- Інтегральний біоіндикаційний індекс, IBI, %.

6. Розрахункова частина.

6.1. Схожість насіння.

Схожість насіння розраховується за формулою:

$$G = n / N \times 100, \quad (2.1)$$

де G – схожість, %; n – кількість пророслих насінин; N – загальна кількість висіяних насінин.

6.2. Відносна схожість щодо контролю розраховується за формулою:

$$RG = G_d / G_k \times 100, \quad (2.2)$$

де RG – відносна схожість, %; G_д – схожість у дослідному варіанті, %; G_к – схожість у контролі, %.

6.3. Відносна довжина кореня розраховується за формулою:

$$RRL = L_{rd} / L_{rk} \times 100, \quad (2.3)$$

де RRL – відносна довжина кореня, %; L_{рд} – середня довжина кореня у дослідному варіанті, мм; L_{рк} – середня довжина кореня у контролі, мм.

6.4. Відносна біомаса проростків розраховується за формулою:

$$RB = B_d / B_k \times 100, \quad (2.4)$$

де RB – відносна біомаса проростків, %; B_д – біомаса проростків у дослідному варіанті; B_к – біомаса проростків у контролі.

6.5. Індекс пригнічення росту кореня розраховується за формулою:

$$IR = (L_{rk} - L_{rd}) / L_{rk} \times 100, \quad (2.5)$$

де IR – пригнічення росту кореня, %; L_{рк} – середня довжина кореня в контролі, мм; L_{рд} – середня довжина кореня в дослідному варіанті, мм.

Якщо IR має додатне значення, це свідчить про пригнічення росту кореня.

Якщо IR має від'ємне значення, це може вказувати на стимуляцію росту, що іноді спостерігається при низьких концентраціях деяких речовин або підвищеній забезпеченості субстрату поживними елементами.

6.6. Індекс проростання розраховується за формулою:

$$GI = (G_d / G_k) \times (L_{rd} / L_{rk}) \times 100, \quad (2.6)$$

де GI – індекс проростання, %; G_d – схожість у дослідному варіанті, %; G_k – схожість у контролі, %; L_{rd} – середня довжина кореня у дослідному варіанті, мм; L_{rk} – середня довжина кореня у контролі, мм.

Індекс проростання є одним із найбільш інформативних показників, оскільки враховує одночасно і схожість насіння, і розвиток кореневої системи.

6.7. Індекс толерантності розраховується за формулою:

$$TI = L_{rd} / L_{rk} \times 100. \quad (2.7)$$

Індекс толерантності показує, наскільки тест-рослина здатна зберігати ріст коренів у досліджуваному субстраті порівняно з контролем.

6.8. Інтегральний біоіндикаційний індекс. Для комплексної оцінки фітотоксичності субстрату рекомендується використовувати інтегральний біоіндикаційний індекс:

$$IBI = 0,4 \times RG + 0,4 \times RRL + 0,2 \times RB, \quad (2.8)$$

де IBI – інтегральний біоіндикаційний індекс, %; RG – відносна схожість, %; RRL – відносна довжина кореня, %; RB – відносна біомаса проростків, %.

У цій формулі найбільшу вагу мають схожість і довжина кореня, оскільки саме ці показники є найбільш чутливими до токсичного впливу забруднених субстратів.

6.9. Морфологічний індекс пошкодження розраховується за формулою:

$$M = m / n \times 100, \quad (2.9)$$

де M – частка морфологічно пошкоджених проростків, %; m – кількість проростків із видимими морфологічними порушеннями; n – загальна кількість пророслих насінин.

До морфологічних порушень відносять потемніння коренів, деформацію, некроз, хлороз, сильне вкорочення кореневої системи, відсутність бічних коренів, викривлення проростків.

7. Екологічна шкала оцінювання фітотоксичності.

Для екологічної інтерпретації результатів можна використовувати спеціальну шкалу (табл. 2.1).

Для індексу пригнічення росту кореня IR можна застосовувати таку шкалу (табл. 2.2).

Таблиця 2.1 – Екологічна шкала оцінювання фітотоксичності

Значення GI або IBI, %	Рівень фітотоксичності	Екологічна інтерпретація
> 90	Відсутня або дуже слабка	Субстрат не проявляє значного пригнічувального ефекту
70–90	Слабка	Можливий незначний стрес для рослин
50–70	Помірна	Субстрат потребує обережного використання; потрібна додаткова оцінка
30–50	Висока	Субстрат суттєво пригнічує ріст; потрібна меліорація або фітостабілізація
< 30	Дуже висока	Субстрат є сильно фітотоксичним; пряме використання для рослин небажане

Таблиця 2.2 – Індекс пригнічення росту кореня IR

IR, %	Оцінка токсичного ефекту
< 10	Токсичний ефект практично відсутній
10–25	Слабке пригнічення
25–50	Помірне пригнічення
50–75	Сильне пригнічення
> 75	Дуже сильне пригнічення або гостра фітотоксичність

8. Додаткова оцінка придатності субстрату для фіторе mediaції та фітомайнінгу.

За результатами біотестування необхідно надати попередній висновок щодо екологічної придатності субстрату:

1. Якщо GI або IBI > 70 %, субстрат може бути придатним для подальших досліджень фіторе mediaції без суттєвої попередньої підготовки.
2. Якщо GI або IBI становить 50–70 %, субстрат проявляє помірну фітотоксичність; доцільно розглянути внесення органічних меліорантів, біогумусу, компосту, біовугілля або змішування з чистим ґрунтом.
3. Якщо GI або IBI становить 30–50 %, субстрат є суттєво токсичним; першочерговою стратегією може бути фітостабілізація з використанням стійких рослин, а не фітоекстракція.
4. Якщо GI або IBI < 30 %, субстрат є сильно фітотоксичним; перед використанням рослин необхідна попередня нейтралізація кислотності, зниження засоленості, іммобілізація металів або інші заходи екологічної стабілізації.

Якщо за результатами хімічного аналізу відомі концентрації металів у ґрунті та рослинній біомасі, можна додатково визначити коефіцієнти, важливі для фітомайнінгу.

Коефіцієнт біоконцентрації:

$$BCF = C_{\text{рослини}} / C_{\text{ґрунту}}, \quad (2.10)$$

де Срослини – концентрація металу у біомасі рослини;
Сґрунту – концентрація того ж металу у ґрунті або субстраті.
Коефіцієнт транслокації:

$$TF = \text{Спагонів} / \text{Скоренів}, \quad (2.11)$$

де Спагонів – концентрація металу у надземній частині рослини;
Скоренів – концентрація металу у коренях.

Інтерпретація:

- $BCF > 1$ свідчить про здатність рослини накопичувати метал із субстрату.
- $TF > 1$ свідчить про ефективне переміщення металу з коренів у надземну біомасу.
- $BCF > 1$ і $TF > 1$ можуть вказувати на перспективність рослини для фітоекстракції або фітомайнінгу.
- $BCF > 1$ і $TF < 1$ можуть свідчити про накопичення металу переважно у коренях, що більш характерно для фітостабілізації.

9. Приклад розрахунку.

У контрольному варіанті було висіяно 20 насінин крес-салату, проросло 19 насінин. Середня довжина кореня становила 32 мм, біомаса проростків – 0,48 г.

У дослідному варіанті було висіяно 20 насінин, проросло 15 насінин. Середня довжина кореня становила 14 мм, біомаса проростків – 0,29 г.

1. Схожість у контролі: $G_k = 19 / 20 \times 100 = 95 \%$.
2. Схожість у досліді: $G_d = 15 / 20 \times 100 = 75 \%$.
3. Відносна схожість: $RG = 75 / 95 \times 100 = 78,9 \%$.
4. Відносна довжина кореня: $RRL = 14 / 32 \times 100 = 43,8 \%$.
5. Відносна біомаса: $RB = 0,29 / 0,48 \times 100 = 60,4 \%$.
7. Індекс пригнічення росту кореня: $IR = (32 - 14) / 32 \times 100 = 56,3 \%$.
8. Індекс проростання: $GI = (75 / 95) \times (14 / 32) \times 100 = 34,5 \%$.
9. Інтегральний біоіндикаційний індекс: $IBI = 0,4 \times 78,9 + 0,4 \times 43,8 + 0,2 \times 60,4 = 61,2 \%$.

Висновок: за індексом проростання субстрат проявляє високу фітотоксичність, оскільки GI становить 34,5 %. За інтегральним біоіндикаційним індексом токсичність оцінюється як помірна, однак сильне пригнічення росту кореня свідчить про наявність стресового впливу на рослини. Такий субстрат потребує додаткового аналізу рН, електропровідності та вмісту важких металів. Для прямої фітоекстракції він може бути малопридатним без попередньої меліорації, але може розглядатися як об'єкт для дослідження фітостабілізації або підбору стійких рослин-фіторемедіантів.

Форми таблиць для первинних експериментальних даних, розрахункових показників наведено в табл. 2.3-2.4.

Таблиця 2.3 – Форма таблиці для внесення експериментальних даних

Варіант	Повторність	Кількість насінин, N	Проросло, n	G, %	Lr, мм	Лs, мм	Біомаса, г	pH	ЕС, мСм/см
Контроль	1	20							
Контроль	2	20							
Контроль	3	20							
Зразок 1	1	20							
Зразок 1	2	20							
Зразок 1	3	20							
Зразок 2	1	20							
Зразок 2	2	20							
Зразок 2	3	20							

Таблиця 2.4 – Форма таблиці для розрахункових показників

Варіант	RG, %	RRL, %	RB, %	IR, %	GI, %	TI, %	IBI, %	Рівень фітотоксичності	Екологічний висновок
Контроль	100	100	100	0	100	100	100	Відсутня	Нормальний розвиток
Зразок 1									
Зразок 2									

10. Вимоги до оформлення звіту.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву лабораторної роботи.
2. Мету та завдання.
3. Коротке теоретичне обґрунтування методу біотестування.
4. Опис досліджуваного субстрату.
5. Схему експерименту.
6. Таблицю первинних даних.
7. Розрахунки основних показників.
8. Графіки або діаграми:
 - схожість насіння за варіантами;
 - середня довжина кореня;
 - індекс проростання;
 - інтегральний біоіндикаційний індекс.
9. Фотофіксацію результатів, за наявності.
10. Екологічну інтерпретацію отриманих даних.
11. Висновки щодо рівня фітотоксичності та можливого напрямку фіторемедіації.
12. Відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Що таке біотестування і чим воно відрізняється від хімічного аналізу ґрунту?
2. Чому крес-салат і цибуля можуть використовуватися як тест-рослини?
3. Які показники рослин є найбільш чутливими до забруднення ґрунту?
4. Чому довжина кореня часто є більш інформативним показником, ніж загальна схожість?
5. Що показує індекс проростання?
6. Як інтерпретувати високий індекс пригнічення росту кореня?
7. Чому один і той самий субстрат може стимулювати схожість, але пригнічувати ріст коренів?
8. Яке значення мають рН та електропровідність водної витяжки?
9. Як результати біотестування можуть бути використані для вибору напряму фіторе mediaції?
10. У чому полягає відмінність між фітоекстракцією, фітостабілізацією і фітомайнінгом?
11. Що означає коефіцієнт біоконцентрації?
12. Що означає коефіцієнт транслокації?
13. Які обмеження має метод біотестування з використанням тест-рослин?
14. Чому для достовірності результатів необхідні повторності?
15. Як можна підвищити надійність екологічної оцінки забрудненого субстрату?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВЕГЕТАЦІЙНА ОЦІНКА ФІТОЕКСТРАКЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РОСЛИН ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ І КРИТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ ТА ТЕХНОГЕННИХ СУБСТРАТІВ

Мета роботи: Сформувати у здобувачів практичні навички проведення вегетаційного дослідження для оцінювання фітоекстракційного потенціалу рослин, здатних вилучати важкі метали, критичні елементи та інші потенційно токсичні компоненти із забруднених ґрунтів, гірничопромислових відходів і техногенних субстратів.

Лабораторна робота спрямована на визначення здатності рослин не лише виживати на забрудненому субстраті, а й формувати достатню біомасу, накопичувати цільові елементи у коренях і надземній частині, транспортувати їх у фітомасу, придатну для збирання, та створювати передумови для подальшої фіторе mediaції або фітомайнінгу.

Завдання лабораторної роботи:

1. Закласти вегетаційний дослід із вирощування обраних рослин-фітоекстракторів на контрольному та забрудненому субстратах.

2. Визначити показники проростання, виживаності, висоти рослин, довжини коренів, сирої та сухої біомаси.
3. Провести морфологічну оцінку стану рослин у контрольному та дослідному варіантах.
4. За наявності результатів хімічного аналізу визначити концентрації цільових елементів у субстраті, коренях і надземній біомасі.
5. Розрахувати коефіцієнти біоаккумуляції, біоконцентрації, транслокації, індекси толерантності та потенціал вилучення елементів.
6. Оцінити ефективність фітоекстракції та зробити висновок щодо придатності рослин для фіторе mediaції, фітостабілізації або фітомайнінгу.
7. Скласти порівняльну рейтингову таблицю рослин за їх фітоекстракційним потенціалом.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження: забруднений ґрунт, техногенний субстрат, відвальна порода, хвости збагачення, зола, шлам або інший матеріал, який містить важкі метали чи критичні елементи.

Предмет дослідження: фітоекстракційний потенціал обраних рослин, що оцінюється за показниками росту, виживаності, біомаси, накопичення елементів, транслокації та загального вилучення забруднювачів із субстрату.

1. Теоретичні відомості.

Фітоекстракція – це технологічний напрям фіторе mediaції, що базується на здатності рослин поглинати хімічні елементи із ґрунту або субстрату, транспортувати їх у надземну біомасу та накопичувати у тканинах. Після завершення вегетаційного періоду надземна біомаса зрізається й вилучається з ділянки, що поступово зменшує загальний запас забруднювача у ґрунті.

У контексті біомайнінгу фітоекстракція розглядається не лише як природоохоронна технологія, а і як потенційний спосіб отримання біоруди — рослинної біомаси, збагаченої певними металами або критичними елементами. Такий підхід може бути перспективним для субстратів із низькими або розсіяними концентраціями елементів, де традиційне вилучення є економічно або екологічно недоцільним.

Веgetаційний дослід дозволяє оцінити реальну реакцію рослин на забруднений субстрат у більш наближених до природних умовах порівняно з короткотривалим біотестуванням. На відміну від лабораторного тесту проростання, вегетаційний дослід дає змогу врахувати повний комплекс показників: ріст, адаптацію, формування біомаси, розвиток кореневої системи, накопичення металів і здатність до транслокації.

Для фітоекстракції найбільш перспективними є рослини, які мають такі властивості:

- високу толерантність до забруднення;
- здатність формувати значну надземну біомасу;
- розвинену кореневу систему;
- здатність поглинати цільові елементи із субстрату;
- здатність транспортувати елементи з коренів у надземну частину;

- достатню швидкість росту;
- можливість багаторазового вирощування або скошування;
- екологічну безпечність і контрольованість використання.

Важливо розрізняти рослини-фітоекстрактори та рослини-фітостабілізатори. Фітоекстрактори повинні накопичувати елементи переважно у надземній біомасі, яку можна зібрати. Фітостабілізатори, навпаки, можуть накопичувати елементи переважно у коренях або зменшувати їх рухомість у ґрунті, запобігаючи міграції забруднювачів.

2. Матеріали, обладнання та реактиви.

Для виконання лабораторної роботи необхідні:

- контрольний ґрунт або чистий піщано-ґрунтовий субстрат;
- досліджуваний забруднений ґрунт або техногенний субстрат;
- насіння або проростки обраних рослин-фітоекстракторів;
- пластикові вегетаційні контейнери або горщики;
- піддони для контейнерів;
- дистильована або відстояна вода;
- лабораторні ваги;
- лінійка або штангенциркуль;
- рН-метр або індикаторний папір;
- кондуктометр;
- сушильна шафа, за наявності;
- ножиці, скальпель або секатор;
- фільтрувальний папір;
- паперові пакети або марковані контейнери для біомаси;
- засоби індивідуального захисту: халат, рукавички, захисні окуляри.

За наявності аналітичного забезпечення використовують результати визначення концентрацій металів у субстраті, коренях і надземній біомасі. Такі дані можуть бути отримані методом атомно-абсорбційної спектроскопії, ICP-OES, ICP-MS, рентгенофлуоресцентного аналізу або надані викладачем як модельний набір даних.

Якщо навчальна лабораторія не має можливості виконувати хімічний аналіз, робота може проводитися у двох частинах:

1. Реальний вегетаційний дослід із визначенням ростових показників.
2. Розрахункова частина з використанням наданих викладачем концентрацій елементів у субстраті та біомасі.

3. Вимоги безпеки.

Під час роботи із забрудненими ґрунтами, техногенними субстратами та рослинною біомасою необхідно використовувати рукавички, лабораторний халат і захисні окуляри. Усі досліджувані матеріали слід розглядати як потенційно забруднені.

Забороняється виносити з лабораторії субстрати, рослинну біомасу або інші матеріали, що контактували із забрудненим середовищем. Рослинна біомаса після дослідів не може використовуватися як корм, компост, добриво або декоративний матеріал. Вона збирається окремо та утилізується згідно з

інструкціями викладача.

Якщо у роботі використовуються субстрати, що містять підвищені концентрації важких металів або критичних елементів, усі операції з їх пересипанням, зважуванням і відбором проб виконуються обережно, без утворення пилу.

4. Очікувані результати навчання при виконанні роботи.

За результатами виконання лабораторної роботи здобувачі мають набути таких навичок та вмінь:

- (ПР21.3-С1) Обирати потенційні рослини-фітоекстрактори для забруднених ґрунтів і техногенних субстратів, визначати біоіндикаційні показники, розраховувати коефіцієнти біоаккумуляції та транслокації, розрізняти рослини, придатні для фітоекстракції та фітомайнінгу, обґрунтовувати вибір рослин для практичного використання у фіторе mediaційних і біомайнінгових технологіях;
- (ПР22.1-С1) Обґрунтовувати напрями використання інноваційних технологій фіторе mediaції забруднених і деградованих промислових територій з використанням рослин, відновлення техногенних ландшафтів для контролю та моніторингу забруднення важкими металами та органічними сполуками з урахуванням біологічного різноманіття природно-техногенних ландшафтів.

5. Хід виконання лабораторного експерименту.

5.1. Етапи виконання досліду.

Вегетаційний дослід виконується після попереднього підбору рослин-фітоекстракторів та біотестування субстрату (табл. 3.1). Його основна мета – перевірити, чи здатні відібрані рослини реально функціонувати на забрудненому субстраті та накопичувати цільові елементи.

Таблиця 3.1. Рекомендована послідовність досліджень

Етап	Зміст
1	Вибір рослин за результатами лабораторної роботи № 1
2	Оцінка фітотоксичності субстрату за результатами лабораторної роботи № 2
3	Закладання вегетаційного дослід
4	Визначення ростових і морфологічних показників
5	Відбір біомаси коренів і надземної частини
6	Аналіз або використання модельних даних щодо вмісту металів
7	Розрахунок фітоекстракційних індексів
8	Екологічна інтерпретація та вибір оптимальної рослини

5.2. Схема дослід.

Рекомендується використовувати не менше двох рослин і два типи субстратів (табл. 3.2):

1. Контрольний субстрат.
2. Забруднений субстрат.

Таблиця 3.2 – Приклад базової схеми досліду

Варіант	Субстрат	Рослина	Повторність
К1	Контрольний ґрунт	Гірчиця	1–3
К2	Контрольний ґрунт	Пшениця	1–3
К3	Контрольний ґрунт	Соняшник	1–3
Д1	Забруднений субстрат	Гірчиця	1–3
Д2	Забруднений субстрат	Пшениця	1–3
Д3	Забруднений субстрат	Соняшник	1–3

Для поглибленого дослідження можна використовувати градієнт частки забрудненого субстрату (табл. 3.3):

Таблиця 3.3 – Варіанти складів субстрату

Варіант	Склад субстрату
К	100 % контрольний ґрунт
Д25	25 % забрудненого субстрату + 75 % контрольного ґрунту
Д50	50 % забрудненого субстрату + 50 % контрольного ґрунту
Д75	75 % забрудненого субстрату + 25 % контрольного ґрунту
Д100	100 % забруднений субстрат

Кожен варіант досліду виконується не менше ніж у трьох повторностях. Для дрібнонасінних культур у кожен контейнер висівають 20–30 насінин. Для великонасінних культур – 5–10 насінин. Після проростання за потреби залишають однакову кількість рослин у кожному контейнері.

5.3. Рекомендовані рослини для досліду.

Для навчального вегетаційного досліду можуть бути використані різні рослини (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Рекомендовані рослини для досліду

Рослина	Потенційне значення
Гірчиця біла або сарептська	Швидкий ріст, потенціал до накопичення Zn, Cu, Pb, Cd
Ріпак	Значна біомаса, придатність до фітоекстракційних дослідів
Соняшник	Висока біомаса, можливість накопичення Pb, Zn, Cu, Cd
Пшениця	Тест-культура для оцінки толерантності
Ячмінь	Порівняльна культура для різних субстратів
Люпин	Розвинена коренева система, вплив на ризосферу
Сорго	Висока біомаса, посухостійкість
Амарант	Висока продуктивність біомаси, перспективність для фіторе mediaції

Для навчальної роботи доцільно обрати 2–4 види, які контрастують за властивостями: наприклад, гірчиця як швидкоросла культура, соняшник як високобіомасова культура, пшениця як порівняльна тест-культура.

5.4. Методика виконання роботи.

5.4.1. Підготовка субстратів:

1. Підготувати контрольний і забруднений субстрати.
2. Видалити рослинні рештки, камені та великі домішки.
3. За потреби просіяти субстрат через сито.
4. Визначити рН і електропровідність водної витяжки.
5. Зважити однакову кількість субстрату для кожного контейнера.
6. Заповнити контейнери субстратом і підписати їх.
7. Зволожити всі контейнери до однакового рівня вологості.

5.4.2. Висівання насіння або висаджування проростків:

1. Відібрати насіння однакового розміру без видимих пошкоджень.
2. Висіяти однакову кількість насінин у кожен контейнер.
3. Рівномірно розмістити насіння по поверхні субстрату.
4. Присипати тонким шаром субстрату.
5. Підписати кожен контейнер: рослина, субстрат, повторність, дата висівання.
6. Розмістити контейнери в однакових умовах освітлення, температури та вологості.

5.4.3. Догляд за рослинами.

1. Підтримувати однакову вологість у всіх варіантах.
2. Не допускати пересихання або надмірного перезволоження субстрату.
3. Щоденно або через день фіксувати стан рослин.
4. На 3–5 добу визначити енергію проростання.
5. На 7–10 добу визначити загальну схожість.
6. Через 14 діб визначити проміжні ростові показники.
7. Через 21–45 діб завершити дослід, залежно від тривалості лабораторного циклу.

Для навчального курсу оптимальною є тривалість 21–30 діб. Якщо дисципліна передбачає довший модуль, дослід можна продовжити до 45–60 діб для формування більшої біомаси.

5.4.4. Морфологічна оцінка рослин.

Під час досліду фіксують такі ознаки:

- затримка проростання;
- нерівномірність сходів;
- пригнічення росту;
- хлороз листків;
- некроз країв листків;
- деформація листків;
- потемніння або вкорочення коренів;
- слабкий розвиток бічних коренів;

- вилягання або загибель рослин.
- Морфологічні ознаки оцінюють за шкалою (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Рекомендовані рослини для дослідів

Бал	Стан рослин
0	Ознаки пошкодження відсутні
1	Слабке пригнічення росту
2	Помірний хлороз або деформація
3	Сильне пригнічення росту, частковий некроз
4	Масове пошкодження рослин
5	Загибель більшості рослин

5.5. Відбір і підготовка рослинної біомаси.

Після завершення вегетаційного дослідів виконують відбір біомаси.

1. Обережно витягти рослини із субстрату.
2. Відокремити надземну частину від коренів.
3. Корені обережно очистити від частинок субстрату.
4. Промити корені дистильованою водою.
5. Промокнути біомасу фільтрувальним папером.
6. Визначити сирі масу коренів і надземної частини.
7. Висушити біомасу до сталої маси за наявності сушильної шафи.
8. Визначити суху масу коренів і надземної частини.
9. Підготувати окремі марковані зразки коренів і надземної біомаси для хімічного аналізу або подальших розрахунків.

Для фітоекстракції особливо важливо визначити саме суху масу надземної частини, оскільки вона є потенційно вилучуваною біомасою.

5.6. Показники, що визначаються.

Під час лабораторної роботи визначають такі показники:

1. Кількість висіяних насінин, N;
2. Кількість пророслих насінин, n;
3. Схожість, G, %;
4. Кількість живих рослин наприкінці дослідів, Ns;
5. Виживаність, S, %;
6. Середня висота рослин, H, см;
7. Середня довжина кореня, Lr, см;
8. Сира маса коренів, Br, г;
9. Сира маса надземної частини, Bs, г;
10. Суха маса коренів, Bdr, г;
11. Суха маса надземної частини, Bds, г;
12. Морфологічний індекс пошкодження, M;
13. pH субстрату;
14. Електропровідність водної витяжки, EC;
15. Концентрація цільового елемента у субстраті, Csoil;
16. Концентрація цільового елемента у коренях, Croot;

17. Концентрація цільового елемента у надземній частині, Cshoot;
18. Коефіцієнт біоконцентрації у коренях, BCF;
19. Коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині, BAC;
20. Коефіцієнт транслокації, TF;
21. Потенціал вилучення елемента надземною біомасою, Ushoot;
22. Ефективність фітоекстракції, PE;
23. Інтегральний індекс фітоекстракційного потенціалу, IPER.

6. Розрахункова частина.

6.1. Схожість насіння. Розраховується за формулою:

$$G = n / N \times 100, \quad (3.1)$$

де G – схожість насіння, %; n – кількість пророслих насінин; N – загальна кількість висіяних насінин.

6.2. Виживаність рослин. Розраховується за формулою:

$$S = N_s / n \times 100, \quad (3.2)$$

де S – виживаність, %; N_s – кількість живих рослин наприкінці досліду; n – кількість пророслих насінин.

6.3. Індекс толерантності за висотою рослин. Розраховується за формулою:

$$T_{IH} = H_d / H_k \times 100, \quad (3.3)$$

де T_{IH} – індекс толерантності за висотою, %; H_d – середня висота рослин у дослідному варіанті; H_k – середня висота рослин у контролі.

6.4. Індекс толерантності за коренем. Розраховується за формулою:

$$T_{IR} = L_{rd} / L_{rk} \times 100, \quad (3.4)$$

де T_{IR} – індекс толерантності за довжиною кореня, %; L_{rd} – середня довжина кореня у дослідному варіанті; L_{rk} – середня довжина кореня у контролі.

6.5. Індекс толерантності за біомасою. Розраховується за формулою:

$$T_{IB} = B_{dsd} / B_{dsk} \times 100, \quad (3.5)$$

де T_{IB} – індекс толерантності за сухою надземною біомасою, %; B_{dsd} – суха маса надземної частини у дослідному варіанті; B_{dsk} – суха маса надземної частини у контролі.

6.6. Морфологічний індекс пошкодження. Розраховується за формулою:

$$M = \Sigma b / N_{oc}, \quad (3.6)$$

де M – середній морфологічний індекс пошкодження, балів; Σb – сума балів пошкодження всіх оцінених рослин; N_{oc} – кількість оцінених рослин.

Чим вище значення M , тим сильніше виражений токсичний вплив субстрату.

6.7. Коефіцієнт біоконцентрації у коренях. Розраховується за формулою:

$$BCF = C_{root} / C_{soil}, \quad (3.7)$$

де BCF – коефіцієнт біоконцентрації у коренях; C_{root} – концентрація

елемента у коренях, мг/кг сухої маси; C_{soil} – концентрація елемента у субстраті, мг/кг сухої маси.

$BCF > 1$ свідчить про здатність рослини концентрувати елемент у кореневій системі.

6.8. Коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині. Розраховується за формулою:

$$BAC = C_{shoot} / C_{soil}, \quad (3.8)$$

де BAC – коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині; C_{shoot} – концентрація елемента у надземній біомасі, мг/кг сухої маси; C_{soil} – концентрація елемента у субстраті, мг/кг сухої маси.

$BAC > 1$ свідчить про активне накопичення елемента в надземній біомасі. Це важлива ознака придатності рослини до фітоекстракції.

6.9. Коефіцієнт транслокації. Розраховується за формулою:

$$TF = C_{shoot} / C_{root}, \quad (3.9)$$

де TF – коефіцієнт транслокації; C_{shoot} – концентрація елемента у надземній частині; C_{root} – концентрація елемента у коренях.

$TF > 1$ свідчить про ефективне переміщення елемента з коренів у надземну біомасу. Це є важливою умовою фітоекстракції та фітомайнінгу.

$TF < 1$ свідчить про переважне накопичення елемента у коренях, що більше відповідає стратегії фітостабілізації.

6.10. Потенціал вилучення елемента надземною біомасою. Розраховується за формулою:

$$U_{shoot} = C_{shoot} \times B_{ds}, \quad (3.10)$$

де U_{shoot} – кількість елемента, вилучена надземною біомасою, мг; C_{shoot} – концентрація елемента у надземній частині, мг/кг; B_{ds} – суха маса надземної частини, кг.

Якщо суха маса вказана у грамах, її потрібно перевести у кілограми:

$$B_{ds}, \text{ кг} = B_{ds}, \text{ г} / 1000.$$

6.11. Загальна кількість елемента у субстраті контейнера. Розраховується за формулою:

$$U_{soil} = C_{soil} \times M_{soil}, \quad (3.11)$$

де U_{soil} – загальна кількість елемента у субстраті контейнера, мг; C_{soil} – концентрація елемента у субстраті, мг/кг; M_{soil} – маса сухого субстрату в контейнері, кг.

6.12. Ефективність фітоекстракції. Розраховується за формулою:

$$PE = U_{shoot} / U_{soil} \times 100, \quad (3.12)$$

де PE – ефективність фітоекстракції, %; U_{shoot} – кількість елемента, вилучена надземною біомасою; U_{soil} – загальна кількість елемента у субстраті контейнера.

У короткотривалих лабораторних дослідах значення PE зазвичай є невисоким, але цей показник корисний для порівняння різних рослин між собою.

6.13. *Інтегральний індекс фітоекстракційного потенціалу.* Цей індекс для комплексної оцінки рослин розраховується за формулою:

$$IPEP = 0,20 \times S + 0,20 \times TIB + 0,20 \times BACn + 0,20 \times TFn + 0,20 \times Un, \quad (3.13)$$

де IPEP – інтегральний індекс фітоекстракційного потенціалу, %; S – виживаність рослин, %; TIB – індекс толерантності за біомасою, %; BACn – нормований коефіцієнт біоаккумуляції, %; TFn – нормований коефіцієнт транслокації, %; Un – нормований потенціал вилучення елемента, %.

Нормування показників здійснюється за формулою:

$$Xn = Xi / Xmax \times 100, \quad (3.14)$$

де Xn – нормоване значення показника, %; Xi – значення показника для конкретної рослини; Xmax – максимальне значення цього показника серед усіх досліджуваних рослин.

7. Екологічна інтерпретація показників (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Екологічна інтерпретація розрахункових показників

Показник	Високе значення означає	Екологічна інтерпретація
S	Високу виживаність	Рослина толерантна до субстрату
TIB	Збереження біомаси	Рослина не зазнає сильного пригнічення
BAC	Накопичення у надземній частині	Ознака фітоекстракційної здатності
BCF	Накопичення у коренях	Ознака фітостабілізації або кореневої акумуляції
TF	Переміщення у пагони	Важлива умова фітоекстракції
Ushoot	Фактичне вилучення елемента	Практичний потенціал для фітомайнінгу
PE	Частка вилучення із субстрату	Загальна ефективність процесу

8. Критерії оцінки фітоекстракційної придатності (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Критерії оцінки фітоекстракційної придатності

Комбінація показників	Рекомендована інтерпретація
$S > 70 \%, TIB > 60 \%, BAC > 1, TF > 1$	Рослина перспективна для фітоекстракції
$S > 70 \%, BCF > 1, TF < 1$	Рослина перспективна для фітостабілізації
Висока біомаса, $BAC < 1, TF < 1$	Рослина придатна для рекультиваційного озеленення, але не для вилучення металів
Висока концентрація металу, але низька біомаса	Обмежена практична ефективність
Низька виживаність і низька біомаса	Рослина непридатна для цього субстрату
Високий Ushoot і достатня біомаса	Рослина перспективна для фітомайнінгу

9. Шкала інтегральної оцінки (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Критерії оцінки фітоекстракційної придатності

ІРЕР, %	Рівень фітоекстракційного потенціалу	Екологічна оцінка
> 80	Дуже високий	Пріоритетна рослина для подальших досліджень
60–80	Високий	Перспективна рослина
40–60	Середній	Може використовуватися у комбінованих технологіях
20–40	Низький	Обмежена придатність
< 20	Дуже низький	Непридатна для фітоекстракції

10. Приклад розрахунку.

У вегетаційному досліді вирощували соняшник на забрудненому субстраті. Отримано такі дані:

- маса сухого субстрату в контейнері – 2,0 кг;
- концентрація Zn у субстраті – 250 мг/кг;
- концентрація Zn у коренях – 420 мг/кг;
- концентрація Zn у надземній частині – 310 мг/кг;
- суха маса надземної частини – 3,5 г;
- суха маса надземної частини у контролі – 5,0 г;
- кількість пророслих рослин – 10;
- кількість живих рослин наприкінці досліді – 8.

1. Виживаність рослин: $S = 8 / 10 \times 100 = 80 \%$.
2. Індекс толерантності за біомасою: $TIB = 3,5 / 5,0 \times 100 = 70 \%$.
3. Коефіцієнт біоконцентрації у коренях: $BCF = 420 / 250 = 1,68$.
4. Коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині: $BAC = 310 / 250 = 1,24$.
5. Коефіцієнт транслокації: $TF = 310 / 420 = 0,74$.
6. Суха маса надземної частини у кілограмах: $Bds = 3,5 / 1000 = 0,0035$ кг.
7. Потенціал вилучення Zn надземною біомасою: $Ushoot = 310 \times 0,0035 = 1,085$ мг.
8. Загальна кількість Zn у субстраті: $Usoil = 250 \times 2,0 = 500$ мг.
9. Ефективність фітоекстракції: $PE = 1,085 / 500 \times 100 = 0,217 \%$.

Висновок за прикладом: соняшник має добру виживаність і достатній індекс толерантності за біомасою. $BAC > 1$ свідчить про накопичення Zn у надземній частині, однак $TF < 1$ показує, що більша частина елемента залишається у коренях. Фактична ефективність вилучення за один короткий вегетаційний цикл є невисокою. Рослина може бути перспективною для комбінованої технології фітостабілізації та фітоекстракції, але для фітомайнінгу потрібна оцінка за довший період і за більшої продуктивності біомаси.

11. Форма таблиці для первинних даних.

Варіант	Рослина	Повторність	N	n	G, %	Ns	S, %	H, см	Lr, см	Морфологічний бал
Контроль		1								
Контроль		2								
Контроль		3								
Дослід		1								
Дослід		2								
Дослід		3								

12. Форма таблиці для біомаси.

Варіант	Рослина	Сира маса коренів, г	Сира маса пагонів, г	Суха маса коренів, г	Суха маса пагонів, г	ТІВ, %
Контроль						
Дослід						
Контроль						
Дослід						

13. Форма таблиці для хімічного аналізу та розрахунків.

Рослина	Csoil, мг/кг	Croot, мг/кг	Cshoot, мг/кг	BCF	BAC	TF	Ushoot, мг	PE, %
Гірчиця								
Соняшник								
Пшениця								
Люпин								

14. Рейтингова таблиця фітоекстракційного потенціалу.

Рослина	S, %	ТІВ, %	BACn, %	TFn, %	Un, %	IPEP, %	Ранг	Рекомендований напрям
Гірчиця								
Соняшник								
Пшениця								
Люпин								

У графі «Рекомендований напрям» зазначають один із варіантів:

- фітоекстракція;
- фітостабілізація;
- комбінована фіторемедіація;
- рекультиваційне озеленення;
- фітомайнінг;
- непридатна для досліджуваного субстрату.

15. Екологічна оцінка результатів.

За результатами лабораторної роботи студент повинен надати екологічну оцінку:

1. Яка рослина найкраще витримала умови забрудненого субстрату?
2. Яка рослина сформувала найбільшу надземну біомасу?
3. Яка рослина мала найвищий ВАС?
4. Яка рослина мала найвищий ТГ?
5. Яка рослина фактично вилучила найбільшу кількість елемента?
6. Чи збігається висока концентрація металу в тканинах із високою ефективністю вилучення?
7. Який вид рослин краще підходить для фітоекстракції?
8. Який вид рослин краще підходить для фітостабілізації?
9. Чи можна розглядати отриману біомасу як потенційну біоруду?
10. Які додаткові дослідження потрібні перед польовим застосуванням?

16. Вимоги до оформлення звіту.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву лабораторної роботи.
2. Мету та завдання.
3. Коротке теоретичне обґрунтування фітоекстракції.
4. Характеристику досліджуваного субстрату.
5. Обґрунтування вибору рослин.
6. Схему вегетаційного дослідження.
7. Таблицю первинних даних.
8. Таблицю біомаси.
9. Таблицю концентрацій елементів і розрахункових коефіцієнтів.
10. Розрахунки G, S, TIB, BCF, VAS, TF, Ushoot, PE, IPER.
11. Графіки або діаграми:
 - виживаність рослин;
 - суха надземна біомаса;
 - коефіцієнт біоаккумуляції;
 - коефіцієнт транслокації;
 - потенціал вилучення елемента;
 - інтегральний індекс фітоекстракційного потенціалу.
12. Рейтингову таблицю рослин.
13. Екологічну інтерпретацію.
14. Висновки.
15. Відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Що таке фітоекстракція?
2. Які властивості повинна мати ефективна рослина-фітоекстрактор?
3. Чому висока біомаса є важливою для фітоекстракції?
4. Що показує коефіцієнт біоконцентрації?
5. Що показує коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині?

6. Що показує коефіцієнт транслокації?
7. Чому $TF > 1$ є важливою ознакою фітоекстракції?
8. Чому рослина з високим BCF і низьким TF може бути кращою для фітостабілізації?
9. Що таке потенціал вилучення елемента надземною біомасою?
10. Чому ефективність фітоекстракції у короткотривалому лабораторному досліді може бути низькою?
11. Як рН субстрату впливає на біодоступність металів?
12. Як електропровідність субстрату може впливати на ріст рослин?
13. Чому потрібно розділяти кореневу та надземну біомасу під час аналізу?
14. Які екологічні ризики пов'язані зі збиранням і утилізацією забрудненої біомаси?
15. За яких умов рослинна біомаса може розглядатися як потенційна біоруда?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ОЦІНКА ФІТОМАЙНІНГОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ ЯК БІОРУДИ

Мета роботи: Сформувати у здобувачів практичні навички оцінювання фітомайнінгового потенціалу рослинної біомаси, отриманої під час фітоекстракції важких металів і критичних елементів із забруднених ґрунтів та техногенних субстратів.

Лабораторна робота спрямована на визначення зольності рослинної біомаси, умовної концентрації цільових елементів у золі, ступеня збагачення біомаси після озолення, потенційної кількості елементів, що можуть бути вилучені з біоруди, а також на екологічну та технологічну оцінку доцільності подальшого використання рослинної біомаси у фітомайнінгових технологіях.

Завдання лабораторної роботи:

1. Оцінити рослинну біомасу, отриману в результаті вегетаційного досліді, як потенційну біоруду.
2. Визначити або використати надані викладачем дані щодо сухої маси біомаси та маси золи.
3. Розрахувати зольність рослинної біомаси.
4. Визначити умовну концентрацію цільового елемента у золі.
5. Розрахувати коефіцієнт збагачення елемента при переході від сухої біомаси до золи.
6. Оцінити потенційну кількість металу або критичного елемента, що може бути вилучена з рослинної біомаси.
7. Порівняти фітомайнінговий потенціал різних рослин або різних субстратів.
8. Зробити висновок щодо доцільності розглядати рослинну біомасу як біоруду для подальшого вилучення цінних компонентів.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження: суха рослинна біомаса, отримана після вирощування рослин-фітоекстракторів на забруднених ґрунтах або техногенних субстратах.

Предмет дослідження: зольність біомаси, концентрація цільових елементів у сухій біомасі та золі, ступінь збагачення елементів, потенційний вихід металу або критичного елемента з біоруди.

1. Теоретичні відомості.

Фітомайнінг – це спеціалізований напрям фітоекстракції, у якому рослини використовуються для вилучення металів або критичних елементів із ґрунтів, техногенних субстратів, відходів гірничої промисловості, хвостів збагачення, золошлаків або інших матеріалів із низьким вмістом цінних компонентів.

На відміну від класичної фіторемедіації, де головною метою є зменшення екологічного ризику, фітомайнінг має подвійне значення:

- екологічне – зменшення рухомих або біодоступних форм забруднювачів у субстраті;
- ресурсне – отримання рослинної біомаси, збагаченої металами або критичними елементами.

Рослинна біомаса, яка накопичила підвищені концентрації цільових елементів, може розглядатися як біоруда. *Біоруда* – це біологічний матеріал, у якому цінний елемент сконцентрований до рівня, що потенційно дозволяє його подальше вилучення фізико-хімічними, біотехнологічними або комбінованими методами.

У фітомайнінговому процесі умовно можна виділити такі етапи:

1. Вибір забрудненого або техногенного субстрату.
2. Підбір рослин-фітоекстракторів.
3. Вирощування рослин на субстраті.
4. Накопичення цільових елементів у біомасі.
5. Збирання надземної біомаси.
6. Сушіння біомаси.
7. Перетворення біомаси на золу або інший концентрований продукт.
8. Оцінка концентрації елементів у золі.
9. Вибір можливого напрямку подальшого вилучення цінних компонентів.

У межах цієї лабораторної роботи основна увага приділяється не практичному вилученню металів, а розрахунковій та екологічній оцінці потенціалу біомаси як біоруди. Операції термічного озолення або хімічного вилучення металів виконуються лише викладачем, спеціалізованою лабораторією або замінюються модельними даними.

Основні поняття, які потрібно засвоїти в ході виконання роботи, наведені нижче.

Суха біомаса – рослинний матеріал після видалення основної кількості вологи.

Зола біомаси – мінеральний залишок після термічного руйнування органічної частини рослинного матеріалу.

Зольність – частка золи у сухій масі біомаси.

Біоруда – рослинна біомаса або її зольний залишок, який містить

підвищену концентрацію цінного елемента та може бути розглянутий як потенційна сировина для подальшого вилучення.

Коефіцієнт збагачення – показник, який характеризує, у скільки разів концентрація цільового елемента у золі перевищує його концентрацію у вихідній сухій біомасі або субстраті.

Фітомайнінговий потенціал – інтегральна характеристика, яка враховує біомасу рослини, концентрацію елемента у біомасі, зольність, концентрацію елемента в золі та можливість подальшого вилучення.

2. Матеріали, обладнання та вихідні дані.

Для виконання лабораторної роботи необхідні:

- зразки висушеної рослинної біомаси, які були отримані у лабораторній роботі № 3;
- дані щодо маси сухої біомаси;
- дані щодо маси золи після озолення, надані викладачем або отримані в спеціалізованій лабораторії;
- результати аналізу концентрацій цільових елементів у сухій біомасі;
- результати аналізу концентрацій цільових елементів у золі, якщо вони наявні;
- лабораторні ваги;
- марковані контейнери або пакети для зразків;
- таблиці для внесення даних;
- калькулятор або програмне забезпечення для обробки даних;
- засоби індивідуального захисту.

3. Вимоги безпеки.

Рослинна біомаса, отримана на забруднених ґрунтах або техногенних субстратах, може містити підвищені концентрації важких металів, металоїдів або критичних елементів. Тому під час роботи з нею необхідно використовувати рукавички, лабораторний халат і захисні окуляри.

Студенти не виконують самостійне спалювання біомаси, термічне озолення, кислотне розкладання зразків або хімічне вилуговування металів. Такі операції належать до потенційно небезпечних і можуть виконуватися лише підготовленим персоналом у відповідно обладнаній лабораторії.

У навчальній роботі студенти працюють із безпечно підготовленими зразками, закритими контейнерами або розрахунковими даними. Зола та залишки біомаси не можуть використовуватися як добриво, компост, корм або побутовий матеріал.

4. Очікувані результати навчання при виконанні роботи.

За результатами виконання лабораторної роботи здобувачі мають набути таких навичок та вмінь:

- (ПР21.4-С1) Комплексно оцінювати техногенні субстрати як потенційні джерела цінних компонентів, обирати рослини для фітоекстракції та фітомайнінгу, розраховувати фітоекстракційні коефіцієнти, оцінювати рослинну біомасу як біоруду, моделювати біовилуговування цінних компонентів, скласти баланс мас процесів біомайнінгу.

- (ПР22.2-С1) Обирати та обґрунтовувати напрями фіторе mediaції та біомайнінгу гірничопромислових земель з урахуванням властивостей рослин до фітоекстракції та фітоаккумуляції важких металів з подальшою утилізацією.

5. Хід виконання лабораторного експерименту.

5.1. Логіка лабораторної роботи.

Лабораторна робота № 4 є продовженням лабораторної роботи № 3. Якщо у лабораторній роботі № 3 оцінювалася здатність рослин накопичувати елементи у біомасі, то у цій роботі оцінюється подальший ресурсний потенціал цієї біомаси.

Методичну логіку наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Логіка експерименту

Етап	Зміст
1	Рослини вирощені на забрудненому субстраті
2	Біомаса зібрана та висušена
3	Визначено вміст цільового елемента у сухій біомасі
4	Визначено або задано масу золи
5	Розраховано зольність біомаси
6	Розраховано концентрацію елемента у золі
7	Оцінено ступінь збагачення
8	Визначено потенційну кількість елемента для вилучення
9	Зроблено висновок щодо біорудного потенціалу

5.2. Схема досліду. Для оцінки фітомайнінгового потенціалу можна порівнювати: 1) Різні види рослин; 2) Один вид рослини на різних субстратах; 3) Різні частини рослини: корені, стебла, листки, надземна біомаса загалом; 4) Різні цільові елементи: Ni, Co, Cu, Zn, Mn, REE, Li, Sr, V або інші елементи, визначені у досліді (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Схема досліду

Варіант	Рослина	Субстрат	Аналізована частина	Цільовий елемент
1	Гірчиця	Забруднений ґрунт	Надземна біомаса	Zn
2	Соняшник	Забруднений ґрунт	Надземна біомаса	Zn
3	Люпин	Техногенний субстрат	Надземна біомаса	Cu
4	Амарант	Техногенний субстрат	Надземна біомаса	Ni

6. Методика виконання роботи.

6.1. Підготовка вихідних даних.

Для кожного варіанта досліду студент отримує або визначає такі дані:

1. Назва рослини.
2. Тип субстрату.
3. Цільовий елемент.
4. Маса сирої біомаси.
5. Маса сухої біомаси.
6. Маса золи.
7. Концентрація цільового елемента у сухій біомасі.
8. Концентрація цільового елемента у золі, якщо вона визначена лабораторно.
9. Концентрація цільового елемента у вихідному субстраті.
10. Орієнтовний коефіцієнт збереження елемента під час озолення, якщо використовується розрахункова модель.

6.2. Визначення сухої маси біомаси.

Суха маса біомаси може бути отримана у лабораторній роботі № 3. Якщо використовуються готові зразки, студент вносить у таблицю вже надану суху масу.

Для фітомайнінгу важливо використовувати саме суху масу, оскільки концентрації металів зазвичай виражають у мг/кг сухої речовини.

6.3. Визначення маси золи.

Маса золи визначається після спеціальної лабораторної підготовки зразка. У межах навчальної роботи студенти використовують масу золи, надану викладачем або отриману з попередньо підготовлених безпечних зразків.

Студенти не виконують самостійне озолення біомаси. У звіті зазначається лише розрахункова або надана маса золи.

6.4. Оцінка концентрації елементів у сухій біомасі.

Концентрація цільового елемента у сухій біомасі може бути:

- визначена інструментальним методом у спеціалізованій лабораторії;
- надана викладачем;
- взята з модельного набору даних;
- використана для розрахункової оцінки на основі результатів лабораторної роботи № 3.

6.5. Оцінка умовної концентрації елемента у золі.

Якщо фактичний аналіз золи не проводився, умовну концентрацію елемента у золі можна розрахувати за балансовим підходом.

Логіка розрахунку полягає в тому, що під час перетворення сухої біомаси на золу органічна частина маси зменшується, а мінеральні елементи концентруються у залишку.

6.6. Показники, що визначаються.

Під час виконання лабораторної роботи визначають такі показники:

1. Маса сирої біомаси, M_{fresh} .
2. Маса сухої біомаси, M_{dry} .
3. Маса золи, M_{ash} .
4. Вологість біомаси, W .

5. Зольність біомаси, A.
6. Концентрація цільового елемента у сухій біомасі, Cbio.
7. Концентрація цільового елемента у золі, Cash.
8. Умовна концентрація цільового елемента у золі, Cash_cond.
9. Коефіцієнт збагачення від біомаси до золи, EFbio-ash.
10. Коефіцієнт збагачення від субстрату до золи, EFsoil-ash.
11. Маса елемента у сухій біомасі, Ubio.
12. Маса елемента у золі, Uash.
13. Потенційна маса елемента на одиницю площі, Uha.
14. Умовна маса вилученого елемента з урахуванням технологічного вилучення, Urec.
15. Інтегральний індекс фітомайнінгового потенціалу, IPP.

7. Розрахункова частина.

7.1. Вологість біомаси. Розраховується за формулою:

$$W = (M_{\text{fresh}} - M_{\text{dry}}) / M_{\text{fresh}} \times 100, \quad (4.1)$$

де W – вологість біомаси, %; M_{fresh} – маса сирої біомаси, г; M_{dry} – маса сухої біомаси, г.

7.2. Вихід сухої речовини. Розраховується за формулою:

$$DM = M_{\text{dry}} / M_{\text{fresh}} \times 100, \quad (4.2)$$

де DM – вихід сухої речовини, %; M_{dry} – маса сухої біомаси, г; M_{fresh} – маса сирої біомаси, г.

7.3. Зольність біомаси. Розраховується за формулою:

$$A = M_{\text{ash}} / M_{\text{dry}} \times 100, \quad (4.3)$$

де A – зольність біомаси, %; M_{ash} – маса золи, г; M_{dry} – маса сухої біомаси, г.

Зольність показує, яка частина сухої біомаси залишається у вигляді мінерального залишку. Низька або помірна зольність може сприяти значному концентруванню металів у золі, однак надто мала кількість золи може ускладнювати подальшу технологічну переробку.

7.4. Маса елемента у сухій біомасі. Розраховується за формулою:

$$U_{\text{bio}} = C_{\text{bio}} \times M_{\text{dry_kg}}, \quad (4.4)$$

де U_{bio} – маса елемента у сухій біомасі, мг; C_{bio} – концентрація елемента у сухій біомасі, мг/кг; M_{dry_kg} – маса сухої біомаси, кг.

Якщо суха маса вказана у грамах:

$$M_{\text{dry_kg}} = M_{\text{dry}} / 1000.$$

7.5. Умовна концентрація елемента у золі без урахування втрат. Розраховується за формулою:

$$Cash_cond = C_{\text{bio}} \times 100 / A, \quad (4.5)$$

де Cash_cond – умовна концентрація елемента у золі, мг/кг; C_{bio} – концентрація елемента у сухій біомасі, мг/кг; A – зольність біомаси, %.

Ця формула використовується за припущення, що весь елемент, який

містився у сухій біомасі, зберігся у золі.

7.6. Умовна концентрація елемента у золі з урахуванням коефіцієнта збереження. Розраховується за формулою:

$$\text{Cash_real} = \text{Cbio} \times R \times 100 / A, \quad (4.6)$$

де Cash_real – розрахункова концентрація елемента у золі з урахуванням можливих втрат, мг/кг; Cbio – концентрація елемента у сухій біомасі, мг/кг; R – коефіцієнт збереження елемента під час перетворення біомаси на золу; A – зольність біомаси, %.

Коефіцієнт R змінюється від 0 до 1. Якщо R = 1, втрати елемента не враховуються. Якщо R = 0,8, це означає, що умовно зберігається 80 % елемента.

Для навчальних розрахунків значення R задається викладачем. Для летких або термічно нестабільних елементів використання простого балансового підходу потребує особливої обережності.

7.7. Коефіцієнт збагачення від біомаси до золи. Розраховується за формулою:

$$\text{EFbio-ash} = \text{Cash} / \text{Cbio}, \quad (4.7)$$

де EFbio-ash – коефіцієнт збагачення елемента у золі порівняно із сухою біомасою; Cash – концентрація елемента у золі, мг/кг; Cbio – концентрація елемента у сухій біомасі, мг/кг.

Чим більший цей коефіцієнт, тим сильніше елемент концентрується у зольному залишку.

7.8. Коефіцієнт збагачення від субстрату до золи. Розраховується за формулою:

$$\text{EFsoil-ash} = \text{Cash} / \text{Csoil}, \quad (4.8)$$

де EFsoil-ash – коефіцієнт збагачення елемента у золі порівняно із субстратом; Cash – концентрація елемента у золі, мг/кг; Csoil – концентрація елемента у ґрунті або техногенному субстраті, мг/кг.

Якщо EFsoil-ash значно перевищує 1, це свідчить про концентрування елемента в рослинному зольному продукті відносно вихідного субстрату.

7.9. Маса елемента у золі. Розраховується за формулою:

$$\text{Uash} = \text{Cash} \times \text{Mash_kg}, \quad (4.9)$$

де Uash – маса елемента у золі, мг; Cash – концентрація елемента у золі, мг/кг; Mash_kg – маса золи, кг.

Якщо зола вказана у грамах:

$$\text{Mash_kg} = \text{Mash} / 1000.$$

7.10. Потенційне вилучення елемента з біомаси на одиницю площі. Розраховується за формулою:

$$\text{Uha} = \text{Cbio} \times \text{Ydry} / 1\,000\,000, \quad (4.10)$$

де Uha – потенційна кількість елемента, накопичена у сухій біомасі, кг/га; Cbio – концентрація елемента у сухій біомасі, мг/кг; Ydry – урожайність сухої

біомаси, кг/га.

Цей показник дозволяє перейти від лабораторного дослідження до попередньої польової оцінки.

7.11. *Маса золи на одиницю площі.* Розраховується за формулою:

$$Y_{ash} = Y_{dry} \times A / 100, \quad (4.11)$$

де Y_{ash} – маса золи, кг/га; Y_{dry} – урожайність сухої біомаси, кг/га; A – зольність, %.

7.12. *Потенційно вилучувана маса елемента з урахуванням збереження та технологічного вилучення.* Розраховується за формулою:

$$U_{rec} = U_{ha} \times R \times E_{tech}, \quad (4.12)$$

де U_{rec} – потенційно вилучувана маса елемента, кг/га; U_{ha} – кількість елемента, накопичена у сухій біомасі, кг/га; R – коефіцієнт збереження елемента у зольному продукті; E_{tech} – умовна ефективність подальшого технологічного вилучення елемента.

Значення E_{tech} задається викладачем як модельний параметр. Наприклад, $E_{tech} = 0,6$ означає, що з біоруди умовно може бути вилучено 60 % елемента.

8. Інтегральний індекс фітомайнінгового потенціалу.

Для порівняння кількох рослин або варіантів дослідження можна використовувати інтегральний індекс фітомайнінгового потенціалу:

$$IPP = 0,30 \times Cash_n + 0,30 \times U_{ha_n} + 0,20 \times Y_{dry_n} + 0,10 \times EF_n + 0,10 \times S_{safe}, \quad (4.13)$$

де IPP – інтегральний індекс фітомайнінгового потенціалу, %; $Cash_n$ – нормована концентрація елемента у золі, %; U_{ha_n} – нормований потенціал накопичення елемента на одиницю площі, %; Y_{dry_n} – нормована урожайність сухої біомаси, %; EF_n – нормований коефіцієнт збагачення, %; S_{safe} – експертна оцінка екологічної та технологічної безпечності поводження з біомасою, %.

Нормування показників здійснюється за формулою:

$$X_n = X_i / X_{max} \times 100, \quad (4.15)$$

де X_n – нормоване значення показника, %; X_i – значення показника для конкретного варіанта; X_{max} – максимальне значення цього показника серед усіх варіантів. Експертна оцінка S_{safe} встановлюється за шкалою (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Експертна оцінка S_{safe}

S_{safe} , %	Характеристика
100	Біомаса відносно безпечна для лабораторного поводження
75	Потрібні стандартні заходи безпеки
50	Потрібне спеціальне поводження із забрудненою біомасою
25	Високий ризик через токсичність або пиловиділення
0	Біомаса непридатна для навчального використання

9. Інтерпретація результатів.

Для оцінювання фітомайнінгового потенціалу слід враховувати не один, а

кілька показників одночасно.

Таблиця 4.4 – Інтерпретація результатів оцінювання фітомайнінгу

Показник	Високе значення означає	Практичне значення
C _{bio}	Рослина активно накопичує елемент	Добра фітоаккумуляційна здатність
A	Значна частка мінерального залишку	Більша маса золи, але можливе розбавлення елемента
C _{ash}	Висока концентрація у золі	Потенційна біоруда кращої якості
EF _{bio-ash}	Сильне концентрування після озолення	Перспективність зольного продукту
U _{ha}	Велика кількість елемента на гектар	Практичний ресурсний потенціал
Y _{dry}	Висока продуктивність біомаси	Більший сумарний вихід елемента
U _{rec}	Потенційно вилучувана маса елемента	Оцінка технологічної доцільності
IPP	Комплексна оцінка	Порівняння рослин і субстратів

Висока концентрація елемента у золі не завжди означає високий фітомайнінговий потенціал. Якщо рослина формує дуже малу біомасу, загальна кількість вилученого елемента може бути низькою. Навпаки, рослина з помірною концентрацією елемента, але великою біомасою може мати вищий практичний потенціал.

10. Шкала оцінювання фітомайнінгового потенціалу (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Інтерпретація результатів оцінювання фітомайнінгу

IPP, %	Рівень фітомайнінгового потенціалу	Інтерпретація
> 80	Дуже високий	Біомаса є перспективною біорудою для подальших досліджень
60–80	Високий	Варіант доцільно розглядати для поглибленого аналізу
40–60	Середній	Можливе використання у комбінованих фіторемедіаційних технологіях
20–40	Низький	Біорудний потенціал обмежений
< 20	Дуже низький	Біомаса малопридатна для фітомайнінгу

11. Критерії прийняття рішення.

Після розрахунків студент повинен визначити один із можливих висновків:

1. Біомаса має високий фітомайнінговий потенціал і може розглядатися як біоруда.
2. Біомаса має помірний потенціал і потребує додаткового вивчення.
3. Біомаса придатна переважно для екологічного вилучення забруднювачів, але не для ресурсного використання.
4. Біомаса має кращу перспективу для фітостабілізації, а не для фітомайнінгу.
5. Біомаса не має практичного фітомайнінгового значення через низьку концентрацію елемента або малу продуктивність.
6. Використання біомаси потребує спеціальних умов поводження через токсичність або інші ризики.

12. Приклад розрахунку.

У досліді досліджували надземну біомасу гірчиці, вирощеної на техногенному субстраті. Отримано такі дані:

- маса сирої біомаси – 42,0 г;
- маса сухої біомаси – 8,0 г;
- маса золи – 0,72 г;
- концентрація Ni у сухій біомасі – 900 мг/кг;
- концентрація Ni у субстраті – 150 мг/кг;
- коефіцієнт збереження Ni у золі – 0,90;
- умовна урожайність сухої біомаси – 5000 кг/га;
- умовна ефективність подальшого вилучення Ni із зольного продукту – 0,70.

12.1. Вологість біомаси: $W = (42,0 - 8,0) / 42,0 \times 100 = 80,95 \%$.

12.2. Вихід сухої речовини: $DM = 8,0 / 42,0 \times 100 = 19,05 \%$.

12.3. Зольність: $A = 0,72 / 8,0 \times 100 = 9,0 \%$.

12.4. Маса Ni у сухій біомасі: $M_{dry_kg} = 8,0 / 1000 = 0,008$ кг.

$U_{bio} = 900 \times 0,008 = 7,2$ мг.

12.5. Умовна концентрація Ni у золі без урахування втрат:

$Cash_cond = 900 \times 100 / 9,0 = 10\,000$ мг/кг.

12.6. Умовна концентрація Ni у золі з урахуванням коефіцієнта збереження:

$Cash_real = 900 \times 0,90 \times 100 / 9,0 = 9000$ мг/кг.

12.7. Коефіцієнт збагачення від біомаси до золи:

$EF_{bio-ash} = 9000 / 900 = 10,0$.

Отже, у золі концентрація Ni приблизно у 10 разів вища, ніж у сухій біомасі.

12.8. Коефіцієнт збагачення від субстрату до золи:

$EF_{soil-ash} = 9000 / 150 = 60,0$.

Отже, концентрація Ni у золі у 60 разів вища, ніж у вихідному субстраті.

12.9. Маса Ni у золі: $M_{ash_kg} = 0,72 / 1000 = 0,00072$ кг.

$U_{ash} = 9000 \times 0,00072 = 6,48$ мг.

Це відповідає 90 % від маси Ni, що була у сухій біомасі.

12.10. Потенційне накопичення Ni на гектар:

$$U_{ha} = 900 \times 5000 / 1\,000\,000 = 4,5 \text{ кг/га.}$$

$$12.11. \text{ Маса золи на гектар: } Y_{ash} = 5000 \times 9,0 / 100 = 450 \text{ кг/га.}$$

$$12.12. \text{ Потенційно вилучувана маса Ni:}$$

$$U_{rec} = 4,5 \times 0,90 \times 0,70 = 2,835 \text{ кг/га.}$$

$$12.13. \text{ Екологічний висновок за прикладом.}$$

Гірчиця сформувала біомасу з підвищеним вмістом Ni. Після перетворення сухої біомаси на зольний продукт концентрація Ni умовно зростає до 9000 мг/кг золи. Коефіцієнт збагачення порівняно із субстратом становить 60, що свідчить про виражений фітомайнінговий потенціал. Водночас потенційно вилучувана маса Ni на гектар залишається помірною, тому практична доцільність технології потребує додаткової оцінки урожайності, кількості вегетаційних циклів, вартості збирання біомаси та безпечної переробки зольного продукту.

13. Форма таблиці для первинних даних.

Варіант	Рослина	Субстрат	Цільовий елемент	Mfresh, г	Mdry, г	Mash, г	Cbio, мг/кг	Csoil, мг/кг
1								
2								
3								
4								

14. Форма таблиці для розрахунку зольності та концентрації елемента у золі

Рослина	W, %	DM, %	A, %	R	Cash_co nd, мг/кг	Cash_rea l, мг/кг	EFbio-as h	EFsoil-as h

15. Форма таблиці для оцінки потенційного вилучення.

Рослина	Cbio, мг/кг	Ydry, кг/га	A, %	Yash, кг/га	Uha, кг/га	Etech	Urec, кг/га	Висновок

16. Рейтингова таблиця фітомайнінгового потенціалу.

Рослина	Cash_n, %	Uha_n, %	Ydry_n, %	EF_n, %	Ssafe, %	IPP, %	Ранг	Рекомендований напрям

У графі «Рекомендований напрям» можна зазначити:

- перспективна біоруда;
- умовно перспективна біоруда;
- біомаса для фіторемедіації без ресурсного використання;

- біомаса для фітостабілізації;
- потребує додаткового аналізу;
- непридатна для фітомайнінгу.

17. Екологічна оцінка результатів.

Під час екологічної інтерпретації необхідно відповісти на такі питання:

1. Чи має рослинна біомаса підвищену концентрацію цільового елемента?
2. Чи достатня суха біомаса для практичного вилучення елемента?
3. Яка зольність біомаси?
4. Чи забезпечує озолення суттєве концентрування елемента?
5. Чи є концентрація елемента у золі значно вищою, ніж у субстраті?
6. Яка потенційна кількість елемента може бути отримана з одиниці площі?
7. Яка рослина має найвищий фітомайнінговий потенціал?
8. Чи можна розглядати отриману золу як біоруду?
9. Які екологічні ризики пов'язані з накопиченням токсичних елементів у біомасі?
10. Які додаткові дослідження потрібні перед практичним застосуванням технології?

18. Вимоги до оформлення звіту.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву лабораторної роботи.
2. Мету та завдання.
3. Коротке теоретичне обґрунтування фітомайнінгу та поняття біоруди.
4. Характеристику рослинної біомаси.
5. Опис вихідних даних.
6. Таблицю первинних даних.
7. Розрахунок вологості, сухої речовини та зольності.
8. Розрахунок умовної концентрації елемента у золі.
9. Розрахунок коефіцієнтів збагачення.
10. Розрахунок потенційної кількості елемента у біомасі та золі.
11. Розрахунок потенційного вилучення на одиницю площі.
12. Рейтингову таблицю фітомайнінгового потенціалу.
13. Графіки або діаграми:
 - зольність біомаси;
 - концентрація елемента у сухій біомасі;
 - умовна концентрація елемента у золі;
 - коефіцієнт збагачення;
 - потенційне вилучення елемента на гектар;
 - інтегральний індекс фітомайнінгового потенціалу.
14. Екологічну інтерпретацію результатів.
15. Висновки.
16. Відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Що таке фітомайнінг?
2. Чим фітомайнінг відрізняється від фіторемедіації?
3. Що таке біоруда?
4. Чому рослинна біомаса може розглядатися як потенційна сировина для вилучення металів?
5. Що показує зольність біомаси?
6. Чому після озолення концентрація металів у залишку зростає?
7. Як розрахувати умовну концентрацію елемента у золі?
8. Що показує коефіцієнт збагачення від біомаси до золи?
9. Що показує коефіцієнт збагачення від субстрату до золи?
10. Чому висока концентрація елемента у золі не завжди означає високу практичну ефективність фітомайнінгу?
11. Чому урожайність сухої біомаси є важливою для оцінки фітомайнінгового потенціалу?
12. Які рослини можуть бути перспективними для отримання біоруди?
13. Які екологічні ризики пов'язані з накопиченням металів у рослинній біомасі?
14. Чому забруднену біомасу не можна використовувати як компост або корм?
15. Які додаткові технологічні етапи потрібні для реального вилучення металу із золи?
16. Які фактори можуть зменшувати ефективність фітомайнінгу?
17. Чому для летких елементів потрібна обережна інтерпретація результатів?
18. Як можна підвищити фітомайнінговий потенціал рослинної системи?
19. Які показники слід враховувати при виборі рослини для фітомайнінгу?
20. Чому фітомайнінг доцільно розглядати як елемент циркулярної економіки?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА БІОВИЛУГОВУВАННЯ ЦІННИХ КОМПОНЕНТІВ ІЗ РОСЛИННОЇ ЗОЛИ ТА ТЕХНОГЕННИХ СУБСТРАТІВ

Мета роботи: Сформувати у здобувачів практичні навички розрахункової оцінки потенціалу біовилуговування цінних компонентів із рослинної золи, отриманої після фітомайнінгу, а також із техногенних субстратів, гірничопромислових відходів, хвостів збагачення, золошлаків, шламів або інших вторинних мінеральних ресурсів.

Лабораторна робота спрямована на моделювання ефективності біовилуговування, складання балансу мас, вибір можливої мікробіологічної стратегії, оцінку концентрації металів у розчині після вилуговування та попереднє визначення екологічної й технологічної доцільності подальшого

вилучення критичних і цінних елементів.

Робота виконується у розрахунковому форматі без практичного проведення вилуговування, без приготування кислотних розчинів, без культивування мікроорганізмів і без контакту студентів із небезпечними реагентами.

Завдання лабораторної роботи:

1. Ознайомитися з принципами біовилуговування цінних компонентів із рослинної золи та техногенних субстратів.
2. Проаналізувати вихідні дані щодо маси зразка, вмісту цільових елементів і можливих сценаріїв вилуговування.
3. Визначити загальну масу цільового елемента у вихідному матеріалі.
4. Розрахувати масу елемента, що теоретично переходить у розчин за різної ефективності біовилуговування.
5. Розрахувати залишковий вміст елемента у твердому залишку після вилуговування.
6. Оцінити концентрацію цільового елемента у продуктивному розчині.
7. Побудувати баланс мас системи «вихідний матеріал — розчин — твердий залишок».
8. Обрати доцільну мікробіологічну стратегію для різних типів матеріалів.
9. Оцінити екологічні ризики та обмеження біовилуговування.
10. Зробити висновок щодо перспективності досліджуваного матеріалу для біогідрометалургійного вилучення цінних компонентів.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження: рослинна зола після фітомайнінгу, техногенний субстрат, хвости збагачення, зола, шлам, відвальна порода або інший матеріал, що містить цінні компоненти.

Предмет дослідження: розрахункова ефективність біовилуговування цільових елементів, баланс мас, концентрація елементів у продуктивному розчині, залишкова концентрація у твердому залишку та доцільність вибору певної мікробіологічної стратегії.

1. Теоретичні відомості.

Біовилуговування – це біотехнологічний процес вилучення металів або інших цінних компонентів із твердих матеріалів за участі мікроорганізмів, продуктів їх метаболізму або біогенно утворених реагентів. У гірничих біотехнологіях біовилуговування розглядається як альтернатива або доповнення до традиційних хімічних і гідрометалургійних методів переробки низькосортних руд, хвостів збагачення, техногенних відходів і вторинної сировини.

У контексті фітомайнінгу біовилуговування може бути використане як наступний етап після отримання рослинної біомаси або золи. Якщо рослини накопичили певні метали або критичні елементи, а після озолення концентрація цих елементів у мінеральному залишку зросла, така зола може розглядатися як біоруда. Подальше вилучення цінних компонентів із цієї біоруди може теоретично здійснюватися біогідрометалургійними методами.

У межах навчальної лабораторної роботи не проводиться практичне вилуговування, оскільки воно може потребувати роботи з кислотами

середовищами, потенційно токсичними металами, спеціальними мікроорганізмами, контрольованими умовами аерації, температури, рН та окисно-відновного потенціалу. Натомість студенти виконують розрахункове моделювання процесу за заданими сценаріями.

Біовилуговування може бути умовно пов'язане з такими мікробіологічними стратегіями:

1. Кислотне біовилуговування – пов'язане з утворенням кислот і зниженням рН середовища.
2. Окиснювальне біовилуговування – пов'язане з біологічним окисненням сульфідів, Fe^{2+} або сірковмісних сполук.
3. Комплексоутворювальне біовилуговування – пов'язане з утворенням органічних кислот, сидерофорів або інших біогенних лігандів.
4. Гетеротрофне біовилуговування – може бути релевантним для оксидних, карбонатних, зольних або складних вторинних матеріалів.
5. Біосорбційно-біодесорбційна стратегія – може застосовуватися для розчинів із низькими концентраціями металів.

Для рослинної золи після фітомайнінгу найбільш логічним є розгляд м'яких біогідрометалургійних або комплексоутворювальних підходів, тоді як для сульфідних техногенних субстратів більш релевантною може бути окиснювальна стратегія.

2. Матеріали, обладнання та вихідні дані.

Для виконання лабораторної роботи використовуються лише безпечні вихідні дані, таблиці та розрахункові сценарії.

Необхідні матеріали:

- індивідуальне завдання з вихідними даними;
- таблиці концентрацій цільових елементів;
- калькулятор або програмне забезпечення для табличних розрахунків;
- графічні шаблони для побудови балансу мас;
- довідкова таблиця можливих мікробіологічних стратегій;
- результати лабораторної роботи № 4 щодо зольності та концентрації елементів у золі, якщо вони використовуються.

Типові вихідні дані:

- маса вихідного матеріалу, M_0 ;
- концентрація цільового елемента у матеріалі, C_0 ;
- об'єм модельного розчину, V ;
- сценарна ефективність біовилуговування, E ;
- частка втрат або неврахованих залишків, L ;
- цільовий елемент: Ni, Co, Cu, Zn, Mn, Li, REE, V, Sr або інший;
- тип матеріалу: рослинна зола, сульфідний субстрат, оксидний субстрат, шлам, хвости збагачення.

3. Вимоги безпеки.

Лабораторна робота виконується виключно у розрахунково-модельному форматі. Студенти не працюють із кислотами, лугами, токсичними металами, живими культурами мікроорганізмів або реальними продуктивними розчинами.

Не допускається самостійне практичне проведення біовилуговування, приготування поживних середовищ, кислотних розчинів, вилуговувальних систем або дослідів із невідомими техногенними матеріалами без спеціально обладнаної лабораторії, дозволу викладача та затверджених інструкцій з охорони праці.

У межах цієї роботи студенти виконують лише моделювання, аналіз даних, побудову балансів і вибір стратегії на основі безпечних навчальних сценаріїв.

4. Очікувані результати навчання при виконанні роботи.

За результатами виконання лабораторної роботи здобувачі мають набути таких навичок та вмінь:

- (ПР21.1-С1) Обґрунтовувати напрями переробки промислових відходів та вторинних мінеральних ресурсів біотехнологічними методами;
- (ПР21.5-С1) Моделювати біосорбцію та осадження металів із продуктивних розчинів, оцінювати екологічні ризики на кожному етапі технологічного біомайнінгового ланцюга, формувати обґрунтований висновок щодо перспективності біомайнінгової технології.

5. Хід виконання лабораторної роботи.

5.1. Логіка лабораторної роботи (табл. 5.1).

Лабораторна робота № 5 є продовженням лабораторної роботи № 4.

Таблиця 5.1 – Етапи і зміст роботи

Етап	Зміст
1	Визначення маси вихідного матеріалу
2	Визначення концентрації цільового елемента
3	Розрахунок загальної маси елемента у матеріалі
4	Вибір сценарію ефективності біовилуговування
5	Розрахунок маси елемента, що переходить у розчин
6	Розрахунок концентрації елемента у розчині
7	Розрахунок залишку елемента у твердій фазі
8	Побудова балансу мас
9	Вибір мікробіологічної стратегії
10	Екологічна та технологічна інтерпретація

Якщо у попередній роботі оцінювалася рослинна зола як потенційна біоруда, то в цій роботі аналізується, яка частина цінного елемента може бути умовно переведена у розчин за допомогою біовилуговування.

5.2. Типи модельних матеріалів.

Для розрахункової роботи можна використовувати різні типи матеріалів (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Типи модельних матеріалів

Тип матеріалу	Приклад	Потенційна стратегія
Рослинна зола після фітомайнінгу	Зола гірчиці, соняшнику, амаранту	Комплексоутворювальне або м'яке кислотне біовилуговування
Сульфідний техногенний субстрат	Піритвмісні хвости, сульфідні відходи	Окиснювальне біовилуговування
Оксидний субстрат	Оксиди Mn, Fe, Ni, Co	Гетеротрофне або комплексоутворювальне вилуговування
Золошлаковий матеріал	Зола ТЕС, шлак, пил	Органоокислотне або комбіноване вилуговування
Електронні або батарейні відходи як модельний сценарій	Чорна маса батарей, подрібнені фракції	Біокислотне або комплексоутворювальне вилуговування в спеціалізованих умовах
Забруднений ґрунт	Металовмісний технозем	Біомобілізація або біостабілізація залежно від мети

У навчальній роботі такі матеріали розглядаються лише як модельні об'єкти для розрахунку.

5.3 Вибір мікробіологічної стратегії. Для вибору стратегії біовилуговування використовується логічна матриця (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Вибір мікробіологічної стратегії біовилуговування

Характеристика матеріалу	Переважає стратегія	Пояснення
Є сульфід Fe, Cu, Zn, Ni	Окиснювальне біовилуговування	Доцільне моделювання участі залізо- та сіркоокиснювальних мікроорганізмів
Матеріал має оксидну або зольну природу	Органоокислотне або комплексоутворювальне вилуговування	Доцільне моделювання дії біогенних органічних кислот
Матеріал має високий рН	Кислотоутворювальна стратегія	Потрібне зниження рН для мобілізації частини елементів
Матеріал містить REE або критичні елементи у розсіяній формі	Комплексоутворювальна стратегія	Важлива роль органічних лігандів і комплексоутворення
Є ризик надмірної мобілізації токсичних металів	Обмежене або контрольоване вилуговування	Потрібна оцінка екологічної безпеки
Мета – не вилучення, а зниження рухомості	Біостабілізація	Вилуговування недоцільне

У звіті студент повинен обґрунтувати, чому саме така стратегія є найбільш логічною для заданого матеріалу.

5.4. Сценарії ефективності біовилуговування.

Оскільки практичне вилуговування не виконується, студентам задаються сценарії ефективності (табл. 5.4).

Для навчального моделювання рекомендується розрахувати щонайменше три сценарії:

- $E = 20 \%$;
- $E = 50 \%$;
- $E = 80 \%$.

Таблиця 5.4 – Сценарії ефективності біовилуговування

Сценарій	Ефективність переходу елемента у розчин, E
Низька ефективність	10–20 %
Помірна ефективність	30–50 %
Висока ефективність	60–80 %
Дуже висока ефективність	80–95 %

Це дозволяє оцінити, як зміна ефективності біовилуговування впливає на концентрацію металу в розчині та залишковий вміст у твердій фазі.

5.5. Основні показники, що визначаються.

Під час виконання лабораторної роботи визначають такі показники:

1. Маса вихідного матеріалу, M_0 .
2. Концентрація цільового елемента у вихідному матеріалі, C_0 .
3. Загальна маса елемента у вихідному матеріалі, U_0 .
4. Ефективність біовилуговування, E .
5. Маса елемента, що перейшла у розчин, U_{sol} .
6. Маса елемента, що залишилася у твердому залишку, U_{res} .
7. Концентрація елемента у продуктивному розчині, C_{sol} .
8. Залишкова концентрація елемента у твердій фазі, C_{res} .
9. Коефіцієнт вилучення, K_{ex} .
10. Коефіцієнт залишкового забруднення, K_{res} .
11. Балансова похибка, ΔB .
12. Інтегральний індекс перспективності біовилуговування, IBL .

6. Розрахункова частина.

6.1. Загальна маса елемента у вихідному матеріалі:

$$U_0 = C_0 \times M_0, \quad (5.1)$$

де U_0 – загальна маса цільового елемента у вихідному матеріалі, мг; C_0 – концентрація елемента у матеріалі, мг/кг; M_0 – маса матеріалу, кг.

Якщо маса матеріалу задана у грамах:

$$M_0, \text{ кг} = M_0, \text{ г} / 1000.$$

6.2. Маса елемента, що переходить у розчин:

$$U_{sol} = U_0 \times E / 100, \quad (5.2)$$

де U_{sol} – маса елемента, що перейшла у розчин, мг; U_0 – загальна маса елемента у вихідному матеріалі, мг; E – ефективність біовилуговування, %.

6.3. Маса елемента у твердому залишку:

$$U_{res} = U_0 - U_{sol}, \quad (5.3)$$

де U_{res} – маса елемента, що залишилася у твердому залишку, мг.

Якщо враховуються умовні втрати або невизначеність балансу, формула може бути розширена:

$$U_{res} = U_0 - U_{sol} - U_{loss}, \quad (5.4)$$

де U_{loss} – умовні втрати або неврахована частина елемента, мг.

У навчальній роботі рекомендується спочатку виконувати розрахунок без втрат, а потім додатково розглянути сценарій із балансовою похибкою 3–5 %.

6.4. Концентрація елемента у продуктивному розчині:

$$C_{sol} = U_{sol} / V, \quad (5.5)$$

де C_{sol} – концентрація елемента у продуктивному розчині, мг/л; U_{sol} – маса елемента, що перейшла у розчин, мг; V – об'єм розчину, л.

Цей показник дозволяє оцінити, чи є розчин достатньо концентрованим для подальшого вилучення елемента методами сорбції, осадження, мембранного концентрування або іншими технологіями.

6.5. Залишкова концентрація елемента у твердій фазі:

$$C_{res} = U_{res} / M_{res}, \quad (5.6)$$

де C_{res} – залишкова концентрація елемента у твердому залишку, мг/кг; U_{res} – маса елемента у твердому залишку, мг; M_{res} – маса твердого залишку після вилуговування, кг.

Якщо маса твердого залишку умовно дорівнює масі вихідного матеріалу, можна прийняти:

$$M_{res} = M_0.$$

Якщо задано втрату маси твердої фази, M_{res} розраховують окремо.

6.6. Коефіцієнт вилучення:

$$K_{ex} = U_{sol} / U_0, \quad (5.7)$$

де K_{ex} – коефіцієнт вилучення елемента.

Якщо K_{ex} множиться на 100, отримують ефективність вилучення у відсотках.

6.7. Коефіцієнт залишкового забруднення:

$$K_{res} = C_{res} / C_0, \quad (5.8)$$

де K_{res} – коефіцієнт залишкового забруднення; C_{res} – залишкова концентрація елемента у твердій фазі; C_0 – вихідна концентрація елемента.

$K_{res} < 1$ свідчить про зниження вмісту елемента у твердому залишку після моделювання біовилуговування.

6.8. Балансова перевірка.

Для перевірки балансу мас використовують рівняння:

$$U_0 = U_{sol} + U_{res} + U_{loss}. \quad (5.9)$$

Якщо втрати не враховуються:

$$U_0 = U_{sol} + U_{res}. \quad (5.10)$$

Балансова похибка визначається за формулою:

$$\Delta B = |U_0 - (U_{sol} + U_{res} + U_{loss})| / U_0 \times 100, \quad (5.11)$$

де ΔB – балансова похибка, %.

У коректному розрахунковому балансі ΔB повинна бути близькою до 0.

6.9. Маса елемента, потенційно доступна для подальшого вилучення з розчину:

$$U_{rec} = U_{sol} \times E_{rec} / 100, \quad (5.12)$$

де U_{rec} – маса елемента, яка може бути додатково вилучена з продуктивного розчину, мг; U_{sol} – маса елемента у продуктивному розчині, мг; E_{rec} – умовна ефективність подальшого вилучення з розчину, %.

E_{rec} задається викладачем. Наприклад, $E_{rec} = 70\%$ означає, що 70 % елемента з продуктивного розчину може бути умовно вилучено наступною технологічною стадією.

6.10. Інтегральний індекс перспективності біовилуговування.

Для порівняння різних матеріалів або стратегій можна використовувати інтегральний індекс перспективності біовилуговування:

$$IBL = 0,30 \times E_n + 0,25 \times C_{sol_n} + 0,20 \times U_{rec_n} + 0,15 \times Select_n + 0,10 \times Eco_n, \quad (5.13)$$

де IBL – інтегральний індекс перспективності біовилуговування, %; E_n – нормована ефективність вилуговування, %; C_{sol_n} – нормована концентрація елемента у розчині, %; U_{rec_n} – нормована потенційно вилучувана маса елемента, %; $Select_n$ – експертна оцінка селективності процесу, %; Eco_n – експертна оцінка екологічної прийнятності стратегії, %.

Нормування здійснюється за формулою:

$$X_n = X_i / X_{max} \times 100, \quad (5.14)$$

де X_n – нормоване значення показника, %; X_i – значення показника для конкретного варіанта; X_{max} – максимальне значення цього показника серед усіх порівнюваних варіантів.

7. Експертна оцінка селективності та екологічної прийнятності.

Оскільки у навчальній роботі не проводиться реальний хімічний аналіз супутніх елементів, селективність і екологічна прийнятність оцінюються експертно (табл. 5.5-5.6).

8. Приклад розрахунку.

Для розрахунку задано рослинну золу після фітомайнінгу. Цільовий елемент – Ni .

Вихідні дані:

- маса золи, $M_0 = 20$ г;
- концентрація Ni у золі, $C_0 = 9000$ мг/кг;
- об'єм модельного продуктивного розчину, $V = 0,5$ л;

- сценарії ефективності біовилуговування: 20 %, 50 %, 80 %;
- ефективність подальшого вилучення Ni з розчину, $E_{res} = 70 \%$;
- маса твердого залишку приймається рівною масі вихідної золи.

Таблиця 5.5 – Шкала селективності

Select n, %	Характеристика
100	Очікується переважне вилучення цільового елемента
75	Цільовий елемент вилучається разом із помірною кількістю домішок
50	Процес малоселективний, можливе вилучення значної кількості супутніх металів
25	Високий ризик переходу токсичних домішок у розчин
0	Процес непридатний через низьку селективність

Таблиця 5.6 – Шкала екологічної прийнятності

Eco n, %	Характеристика
100	Стратегія має низький екологічний ризик у модельних умовах
75	Ризик помірний і контрольований
50	Потрібні додаткові заходи очищення продуктивного розчину
25	Високий ризик утворення токсичного розчину або залишку
0	Стратегія екологічно неприйнятна для заданого матеріалу

8.1. Переведення маси золи у кілограми:

$$M_0 = 20 / 1000 = 0,020 \text{ кг.}$$

8.2. Загальна маса Ni у золі:

$$U_0 = C_0 \times M_0 = 9000 \times 0,020 = 180 \text{ мг.}$$

8.3. Сценарій 1: ефективність біовилуговування 20 %:

$$U_{sol} = 180 \times 20 / 100 = 36 \text{ мг.}$$

$$U_{res} = 180 - 36 = 144 \text{ мг.}$$

$$C_{sol} = 36 / 0,5 = 72 \text{ мг/л.}$$

$$C_{res} = 144 / 0,020 = 7200 \text{ мг/кг.}$$

$$U_{rec} = 36 \times 70 / 100 = 25,2 \text{ мг.}$$

8.4. Сценарій 2: ефективність біовилуговування 50 %:

$$U_{sol} = 180 \times 50 / 100 = 90 \text{ мг.}$$

$$U_{res} = 180 - 90 = 90 \text{ мг.}$$

$$C_{sol} = 90 / 0,5 = 180 \text{ мг/л.}$$

$$C_{res} = 90 / 0,020 = 4500 \text{ мг/кг.}$$

$$U_{rec} = 90 \times 70 / 100 = 63 \text{ мг.}$$

8.5. Сценарій 3: ефективність біовилуговування 80 %:

$$U_{sol} = 180 \times 80 / 100 = 144 \text{ мг.}$$

$$U_{res} = 180 - 144 = 36 \text{ мг.}$$

$$C_{sol} = 144 / 0,5 = 288 \text{ мг/л.}$$

$$C_{res} = 36 / 0,020 = 1800 \text{ мг/кг.}$$

$$U_{rec} = 144 \times 70 / 100 = 100,8 \text{ мг.}$$

8.6. Порівняння сценаріїв (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Шкала екологічної прийнятності

Сценарій	E, %	U _{sol} , мг	C _{sol} , мг/л	U _{res} , мг	C _{res} , мг/кг	U _{rec} , мг
Низька ефективність	20	36	72	144	7200	25,2
Помірна ефективність	50	90	180	90	4500	63,0
Висока ефективність	80	144	288	36	1800	100,8

8.7. Висновок за прикладом. За високоефективного сценарію 80 % у розчин переходить 144 мг Ni, а концентрація Ni у продуктивному розчині становить 288 мг/л. Це свідчить про потенційно перспективний розрахунковий сценарій біовилуговування. Водночас для практичного застосування необхідно врахувати селективність процесу, можливий перехід супутніх токсичних елементів у розчин, потребу в очищенні продуктивного розчину, утилізацію твердого залишку та технологічну доцільність подальшого вилучення Ni.

9. Форма таблиці для вихідних даних.

Варіант	Матеріал	Цільовий елемент	M ₀ , г	C ₀ , мг/кг	V, л	Стратегія	E, %	E _{rec} , %
1	Рослинна зола							
2	Техногенний субстрат							
3	Хвости збагачення							
4	Золошлак							

10. Форма таблиці для балансу мас.

Варіант	U ₀ , мг	U _{sol} , мг	U _{res} , мг	U _{loss} , мг	ΔB, %	C _{sol} , мг/л	C _{res} , мг/кг
1							
2							
3							

11. Форма таблиці для порівняння сценаріїв ефективності.

Матеріал	Елемент	E, %	U _{sol} , мг	C _{sol} , мг/л	U _{rec} , мг	K _{res}	Екологічна оцінка
		20					
		50					
		80					

12. Рейтингова таблиця перспективності біовилуговування.

Матеріал	Стратегія	En, %	Csol_n, %	Urec_n, %	Select_n, %	Eco_n, %	IBL, %	Ранг
Рослинна зола								
Хвости збагачення								
Золошлак								
Шлам								

13. Екологічна оцінка результатів.

Під час екологічної інтерпретації необхідно відповісти на такі питання:

1. Яка частина цільового елемента переходить у розчин?
2. Чи є концентрація елемента у продуктивному розчині достатньою для подальшого вилучення?
3. Який залишковий вміст елемента у твердій фазі?
4. Чи зменшується екологічний ризик твердого залишку після вилуговування?
5. Чи може продуктивний розчин створювати вторинний екологічний ризик?
6. Чи є обрана мікробіологічна стратегія логічною для цього типу матеріалу?
7. Чи можливе небажане вилучення супутніх токсичних елементів?
8. Які стадії очищення або концентрування розчину потрібні після біовилуговування?
9. Чи є матеріал перспективним як вторинна сировина?
10. Чи доцільне подальше експериментальне дослідження такого матеріалу в спеціалізованій лабораторії?

14. Критерії прийняття рішення.

За результатами розрахунків студент повинен сформулювати один із висновків:

1. Матеріал має високий потенціал для біовилуговування.
2. Матеріал має помірний потенціал і потребує додаткового аналізу.
3. Матеріал є перспективним лише за високої ефективності процесу.
4. Матеріал має низький потенціал через малу концентрацію цільового елемента.
5. Біовилуговування недоцільне через низьку селективність.
6. Біовилуговування може створювати вторинний екологічний ризик.
7. Доцільніше застосувати не вилучення, а стабілізацію забруднювачів.
8. Потрібне комбінування біовилуговування з сорбцією, осадженням або мембранним концентруванням.

15. Вимоги до оформлення звіту.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву лабораторної роботи.
2. Мету та завдання.
3. Коротке теоретичне обґрунтування біовилуговування.
4. Характеристику вихідного матеріалу.
5. Обґрунтування вибору цільового елемента.

6. Обґрунтування вибору мікробіологічної стратегії.
7. Таблицю вихідних даних.
8. Розрахунок загальної маси елемента у матеріалі.
9. Розрахунок сценаріїв вилуговування.
10. Баланс мас для кожного сценарію.
11. Розрахунок концентрації елемента у продуктивному розчині.
12. Розрахунок залишкової концентрації у твердій фазі.
13. Розрахунок потенційного подальшого вилучення з розчину.
14. Рейтингову таблицю перспективності.
15. Графіки або діаграми:
 - ефективність вилуговування;
 - маса елемента у розчині;
 - концентрація елемента у продуктивному розчині;
 - залишкова концентрація у твердому залишку;
 - потенційно вилучувана маса елемента;
 - інтегральний індекс перспективності.
16. Екологічну інтерпретацію.
17. Висновки.
18. Відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Що таке біовилуговування?
2. Чим біовилуговування відрізняється від хімічного вилуговування?
3. Які матеріали можуть бути об'єктами біовилуговування?
4. Чому рослинна зола після фітомайнінгу може бути перспективною для біовилуговування?
5. Які основні мікробіологічні стратегії можуть використовуватися у біовилуговуванні?
6. Для яких матеріалів доцільна окиснювальна стратегія?
7. Для яких матеріалів доцільна комплексоутворювальна стратегія?
8. Що показує ефективність біовилуговування?
9. Як розрахувати масу елемента, що переходить у розчин?
10. Як розрахувати концентрацію елемента у продуктивному розчині?
11. Чому потрібно складати баланс мас?
12. Що таке балансова похибка?
13. Чому продуктивний розчин може бути екологічно небезпечним?
14. Чому висока ефективність вилуговування не завжди означає екологічну доцільність процесу?
15. Що таке селективність біовилуговування?
16. Які фактори можуть обмежувати біовилуговування критичних елементів?
17. Чому для реального процесу потрібний контроль рН, Eh, температури та складу розчину?
18. Чому ця лабораторна робота виконується у розрахунковому форматі?
19. Які технології можуть застосовуватися після біовилуговування для

- вилучення металу з розчину?
20. Як біовилуговування пов'язане з циркулярною економікою та переробкою вторинної сировини?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

МОДЕЛЮВАННЯ БІОСОРБЦІЇ ТА ОСАДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ІЗ ПРОДУКТИВНИХ РОЗЧИНІВ ПІСЛЯ БІОВИЛУГОВУВАННЯ

Мета роботи: Сформувати у здобувачів практичні навички розрахункового моделювання процесу очищення та концентрування продуктивних розчинів після біовилуговування рослинної золи, біоруди або техногенних субстратів із використанням процесів біосорбції, біоосадження та комбінованого вилучення металів.

Лабораторна робота спрямована на оцінювання ефективності вилучення металів із розчинів, розрахунок сорбційної ємності біосорбентів, залишкових концентрацій металів, балансу мас у системі «продуктивний розчин – біосорбент – очищений розчин – осад», а також на вибір оптимальної екологічно безпечної стратегії поводження з продуктивними розчинами.

Робота виконується у розрахунково-модельному форматі без практичного додавання хімічних реагентів, без культивування мікроорганізмів, без отримання токсичних осадів і без контакту студентів із реальними металовмісними розчинами.

Завдання лабораторної роботи:

1. Ознайомитися з принципами біосорбції та осадження металів із продуктивних розчинів після біовилуговування.
2. Проаналізувати вихідні дані щодо концентрації металів у розчині, об'єму розчину та маси доступного біосорбенту.
3. Розрахувати загальну масу металу у продуктивному розчині.
4. Визначити ефективність біосорбційного вилучення металу за різних сценаріїв.
5. Розрахувати сорбційну ємність біосорбенту.
6. Оцінити залишкову концентрацію металу після біосорбції.
7. Змоделювати додаткову стадію осадження залишкового металу.
8. Скласти повний баланс мас для комбінованої схеми «біосорбція + осадження».
9. Порівняти різні варіанти біосорбентів і технологічних стратегій.
10. Зробити висновок щодо екологічної та технологічної доцільності очищення продуктивного розчину.

Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження: модельний продуктивний розчин після біовилуговування рослинної золи, біоруди або техногенного субстрату.

Предмет дослідження: ефективність вилучення металів із розчину шляхом біосорбції, умовного біоосадження або комбінованої схеми очищення.

1. Теоретичні відомості.

Після біовилуговування рослинної золи, біоруди або техногенних субстратів цінні компоненти переходять у продуктивний розчин. Такий розчин може містити цільові метали або критичні елементи, але водночас може бути екологічно небезпечним через присутність токсичних домішок, низький або високий рН, підвищену мінералізацію та багатокомпонентний склад.

Тому після біовилуговування необхідним етапом є очищення, концентрування або селективне вилучення металів із розчину. Одним із екологічно орієнтованих підходів є біосорбція.

Біосорбція – це процес зв'язування іонів металів поверхнею біологічного матеріалу або біоматеріалів. Як біосорбенти можуть розглядатися інактивована біомаса водоростей, бактерій, грибів, дріжджів, рослинні залишки, біовугілля, компостовані матеріали, біогумус, матеріали на основі клітинних стінок, полісахаридів або позаклітинних полімерних речовин.

Основні механізми біосорбції:

- іонний обмін;
- комплексоутворення;
- електростатичне притягання;
- хелатування;
- фізична адсорбція;
- зв'язування функціональними групами біомаси;
- поверхнєве осадження.

Осадження металів – це переведення розчинених іонів у малорозчинну тверду фазу. У біотехнологічних системах воно може бути пов'язане з біогенним утворенням карбонатів, фосфатів, гідроксидів, сульфідів або інших малорозчинних сполук. У межах цієї лабораторної роботи осадження розглядається лише як розрахунковий етап, без практичного застосування реагентів або мікробних культур.

У технологічному ланцюгу біомайнінгу ця лабораторна робота завершує послідовність:

1. Вибір рослин-фітоекстракторів.
2. Біотестування субстратів.
3. Вегетаційна оцінка фітоекстракції.
4. Оцінка біомаси як біоруди.
5. Розрахункова оцінка біовилуговування.
6. Моделювання очищення та концентрування продуктивного розчину.

2. Матеріали, обладнання та вихідні дані.

Лабораторна робота виконується з використанням модельних вихідних даних.

Необхідні матеріали:

- індивідуальне завдання з параметрами продуктивного розчину;
- концентрація цільового металу у розчині, C_0 ;
- об'єм продуктивного розчину, V ;
- маса біосорбенту, m ;

- задана ефективність біосорбції, Es;
- задана ефективність осадження, Ep;
- довідкова таблиця біосорбентів;
- калькулятор або електронна таблиця;
- шаблони таблиць для балансу мас;
- графічний шаблон технологічної схеми.

Типові цільові елементи для модельного розрахунку: Ni, Cu, Zn, Co, Mn, Pb, Cd, Cr, REE, Li, Sr, V.

Типові біосорбенти для моделювання наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Типові біосорбенти

Біосорбент	Потенційне застосування
Інактивована біомаса водоростей	Зв'язування Cu, Zn, Ni, Pb
Біомаса грибів	Зв'язування Cu, Cd, Pb, Cr
Біомаса бактерій або EPS-матеріали	Комплексоутворення з іонами металів
Біовугілля	Сорбція металів і органічних домішок
Біогумус або компостований матеріал	Зв'язування металів гуміновими речовинами
Рослинні залишки	Низьковартісний сорбент для попереднього очищення
Біокрустові матеріали	Потенційне зв'язування металів полісахаридами та клітинними поверхнями

3. Вимоги безпеки.

Робота виконується тільки у розрахунковому форматі. Студенти не працюють із реальними продуктивними розчинами, кислотами, лугами, сульфідними реагентами, токсичними солями металів або живими культурами мікроорганізмів.

Не допускається самостійне проведення осадження металів, зміна рН реальних розчинів, отримання металовмісних осадів або робота з леткими чи токсичними сполуками. Усі розрахунки виконуються на основі безпечних модельних даних, наданих викладачем.

Особливо слід зазначити, що практичні процеси осадження деяких металів можуть супроводжуватися утворенням небезпечних сполук або вторинних відходів. Тому у межах цієї лабораторної роботи такі процеси лише моделюються.

4. Очікувані результати навчання при виконанні роботи.

За результатами виконання лабораторної роботи здобувачі мають набути таких навичок та вмінь:

- ПР21.5-С1 Моделювати біосорбцію та осадження металів із продуктивних розчинів, оцінювати екологічні ризики на кожному етапі технологічного біомайнінгового ланцюга, формувати обґрунтований висновок щодо

перспективності біомайнінгової технології.

- ПР22.2-С1 Обирати та обґрунтовувати напрями фіторемедіації та біомайнінгу гірничопромислових земель з урахуванням властивостей рослин до фітоекстракції та фітоаккумуляції важких металів з подальшою утилізацією.

5. Хід виконання лабораторної роботи.

5.1. Логіка лабораторної роботи.

Лабораторна робота № 6 є завершальним етапом моделювання біомайнінгового технологічного ланцюга (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Етапи біомайнінгового технологічного ланцюга

Етап	Зміст
1	Отримано продуктивний розчин після біовилуговування
2	Визначено концентрацію цільового металу у розчині
3	Розраховано загальну масу металу у розчині
4	Обрано біосорбент
5	Змодельовано вилучення металу біосорбцією
6	Розраховано залишкову концентрацію металу
7	Змодельовано додаткове осадження залишкового металу
8	Побудовано баланс мас
9	Оцінено якість очищеного розчину
10	Обрано оптимальну технологічну стратегію

5.2. Варіанти технологічних схем.

У межах лабораторної роботи можна розглядати три модельні схеми.

Схема 1 – лише біосорбція:

Продуктивний розчин → біосорбент → очищений розчин + насичений біосорбент. Ця схема є доцільною, якщо концентрація металу помірна, а біосорбент має достатню сорбційну ємність.

Схема 2 – лише осадження:

Продуктивний розчин → модельне осадження → очищений розчин + осад.

Ця схема розглядається як варіант для розчинів із високою концентрацією металу, але потребує контролю екологічних ризиків, складу осаду та подальшого поводження з ним.

Схема 3 – комбінована схема:

Продуктивний розчин → біосорбція → частково очищений розчин → осадження залишкових металів → очищений розчин + насичений біосорбент + осад. Комбінована схема є найбільш логічною для навчального моделювання, оскільки дозволяє оцінити послідовне зниження концентрації металу та порівняти внесок кожної стадії.

5.3. Вибір біосорбенту.

Вибір біосорбенту здійснюється за такими критеріями (табл. 6.3):

1. Тип цільового металу.
2. Початкова концентрація металу у розчині.
3. Очікувана сорбційна ємність.

4. Селективність щодо цільового елемента.
5. Доступність матеріалу.
6. Екологічна безпечність.
7. Можливість подальшої регенерації або утилізації.
8. Ризик вторинного забруднення.
9. Стабільність біосорбенту у заданому середовищі.
10. Придатність до інтеграції у технологічний ланцюг біомайнінгу.

Попередній рейтинг біосорбенту можна встановити за 5-бальною шкалою.

Таблиця 6.3 – Рейтинг біосорбенту

Критерій	Бал, 0–5
Очікувана сорбційна ємність	
Селективність	
Доступність	
Екологічна безпечність	
Можливість регенерації	
Низький ризик вторинного забруднення	
Технологічна простота	
Загальна оцінка	

5.4. Основні показники, що визначаються.

Під час виконання лабораторної роботи визначають такі показники:

1. Початкова концентрація металу у розчині, C_0 .
2. Об'єм продуктивного розчину, V .
3. Початкова маса металу у розчині, U_0 .
4. Маса біосорбенту, m .
5. Ефективність біосорбції, E_s .
6. Маса металу, вилучена біосорбентом, U_s .
7. Рівноважна або залишкова концентрація після біосорбції, C_s .
8. Сорбційна ємність біосорбенту, q .
9. Ефективність додаткового осадження, E_p .
10. Маса металу, вилучена осадженням, U_p .
11. Кінцева концентрація металу після очищення, C_{final} .
12. Загальна ефективність очищення, E_{total} .
13. Маса металу у насиченому біосорбенті.
14. Маса металу в осаді.
15. Балансова похибка, ΔB .
16. Інтегральний індекс технологічної придатності схеми, ITS .

6. Розрахункова частина.

6.1. Початкова маса металу у продуктивному розчині:

$$U_0 = C_0 \times V, \quad (6.1)$$

де U_0 – початкова маса металу у розчині, мг; C_0 – початкова концентрація металу, мг/л; V – об'єм продуктивного розчину, л.

6.2. Маса металу, вилучена біосорбцією:

$$U_s = U_0 \times E_s / 100, \quad (6.2)$$

де U_s – маса металу, вилучена біосорбентом, мг; E_s – ефективність біосорбції, %.

6.3. Маса металу, що залишилася після біосорбції:

$$U_{after_s} = U_0 - U_s, \quad (6.3)$$

де U_{after_s} – маса металу, що залишилася у розчині після біосорбції, мг.

6.4. Концентрація металу після біосорбції:

$$C_s = U_{after_s} / V, \quad (6.4)$$

де C_s – концентрація металу після біосорбції, мг/л.

6.5. Сорбційна ємність біосорбенту:

$$q = U_s / m, \quad (6.5)$$

де q – сорбційна ємність, мг/г; U_s – маса металу, вилучена біосорбентом, мг; m – маса біосорбенту, г.

Сорбційна ємність показує, скільки міліграмів металу зв'язується одним грамом біосорбенту.

6.6. Перевірка достатності біосорбенту.

Якщо відома максимальна сорбційна ємність біосорбенту q_{max} , можна перевірити, чи достатньо заданої маси біосорбенту:

$$U_{max} = q_{max} \times m, \quad (6.6)$$

де U_{max} – максимально можлива маса металу, яку може зв'язати біосорбент, мг; q_{max} – максимальна сорбційна ємність, мг/г; m – маса біосорбенту, г.

Якщо $U_{max} \geq U_s$, заданої маси біосорбенту достатньо для обраного сценарію. Якщо $U_{max} < U_s$, біосорбенту недостатньо, і необхідно збільшити його масу або змінити технологічну схему.

6.7. Моделювання осадження залишкового металу.

Маса металу, вилучена осадженням після біосорбції:

$$U_p = U_{after_s} \times E_p / 100, \quad (6.7)$$

де U_p – маса металу, вилучена осадженням, мг; U_{after_s} – маса металу, що залишилася після біосорбції; E_p – ефективність осадження, %.

6.8. Маса металу після комбінованого очищення:

$$U_{final} = U_{after_s} - U_p, \quad (6.8)$$

де U_{final} – маса металу, що залишилася у кінцевому очищеному розчині, мг.

6.9. Кінцева концентрація металу у розчині:

$$C_{final} = U_{final} / V, \quad (6.9)$$

де C_{final} – кінцева концентрація металу у розчині, мг/л.

6.10. Загальна ефективність очищення:

$$E_{total} = (U_s + U_p) / U_0 \times 100, \quad (6.10)$$

де E_{total} – загальна ефективність очищення, %; U_s – маса металу, вилучена біосорбцією; U_p – маса металу, вилучена осадженням; U_0 – початкова маса металу у продуктивному розчині.

6.11. Коефіцієнт концентрування металу на біосорбенті:

$$K_{bio} = q / C_0, \quad (6.11)$$

де K_{bio} – умовний коефіцієнт концентрування на біосорбенті; q – сорбційна ємність, мг/г; C_0 – початкова концентрація металу у розчині, мг/л.

Цей показник використовується лише для порівняння варіантів у межах навчальної роботи.

6.12. Баланс мас.

Для комбінованої схеми баланс мас має вигляд:

$$U_0 = U_s + U_p + U_{final} + U_{loss}, \quad (6.12)$$

де U_0 – початкова маса металу у розчині; U_s – маса металу на біосорбенті; U_p – маса металу в осаді; U_{final} – маса металу в очищеному розчині; U_{loss} – умовні втрати або неврахована частина.

Якщо втрати не враховуються:

$$U_0 = U_s + U_p + U_{final}. \quad (6.13)$$

Балансова похибка:

$$\Delta B = |U_0 - (U_s + U_p + U_{final} + U_{loss})| / U_0 \times 100. \quad (6.14)$$

У коректному розрахунку без втрат ΔB повинна дорівнювати або наближатися до 0 %.

7. Моделювання ізотерм біосорбції.

Для поглибленого аналізу можна використати спрощену модель ізотерми Ленгмюра або Фрейндліха. У навчальній роботі ці моделі застосовуються лише для інтерпретації наданих даних.

7.1. Модель Ленгмюра:

$$q = q_{max} \times K_L \times C_e / (1 + K_L \times C_e), \quad (6.15)$$

де q – сорбційна ємність, мг/г; q_{max} – максимальна сорбційна ємність, мг/г; K_L – умовна константа Ленгмюра; C_e – рівноважна концентрація металу в розчині, мг/л.

Модель Ленгмюра припускає наявність обмеженої кількості сорбційних центрів на поверхні біосорбенту.

7.2. Модель Фрейндліха:

$$q = K_F \times C_e^{(1/n)}, \quad (6.16)$$

де q – сорбційна ємність, мг/г; K_F – умовна константа Фрейндліха; n – параметр інтенсивності сорбції; C_e – рівноважна концентрація металу в розчині, мг/л.

Модель Фрейндліха використовується для опису сорбції на неоднорідній поверхні.

У стандартному варіанті лабораторної роботи достатньо розрахувати q , E_s ,

Cs, Up, Cfinal і Etotal. Моделі Ленгмюра та Фрейндліха можна використовувати як додаткове індивідуальне завдання.

8. Інтегральний індекс технологічної придатності схеми.

Для порівняння різних варіантів очищення можна використати інтегральний індекс технологічної придатності:

$$ITS = 0,30 \times E_{total_n} + 0,20 \times q_n + 0,20 \times C_{safe_n} + 0,15 \times Select_n + 0,15 \times Eco_n, \quad (6.17)$$

де ITS – інтегральний індекс технологічної придатності, %; E_{total_n} – нормована загальна ефективність очищення, %; q_n – нормована сорбційна ємність, %; C_{safe_n} – нормована оцінка досягнення безпечної залишкової концентрації, %; $Select_n$ – експертна оцінка селективності, %; Eco_n – експертна оцінка екологічної прийнятності, %.

Нормування здійснюється за формулою:

$$X_n = X_i / X_{max} \times 100, \quad (6.18)$$

де X_n – нормоване значення показника, %; X_i – значення показника для конкретного варіанта; X_{max} – максимальне значення цього показника серед усіх порівнюваних варіантів.

Показник C_{safe_n} можна визначити так:

$$C_{safe_n} = C_{target} / C_{final} \times 100, \quad (6.19)$$

де C_{target} – задана цільова концентрація металу після очищення; C_{final} – кінцева концентрація металу після моделювання.

Якщо $C_{final} \leq C_{target}$, тоді C_{safe_n} приймається рівним 100 %.

9. Експертна оцінка селективності та екологічної прийнятності.

Шкала селективності та Шкала екологічної прийнятності наведені в табл. 6.4 та 6.5.

Таблиця 6.4 – Шкала селективності

Select_n, %	Характеристика
100	Процес переважно вилучає цільовий метал
75	Цільовий метал вилучається разом із помірною кількістю домішок
50	Процес малоселективний
25	Високий ризик вилучення небажаних супутніх компонентів
0	Селективність неприйнятна для заданої мети

Таблиця 6.5 – Шкала екологічної прийнятності.

Eco_n, %	Характеристика
100	Низький екологічний ризик у модельних умовах
75	Ризик помірний і контрольований
50	Потрібне додаткове очищення або стабілізація відходів
25	Високий ризик вторинного забруднення
0	Схема екологічно неприйнятна

10. Приклад розрахунку.

Задано модельний продуктивний розчин після біовилуговування рослинної золи.

Вихідні дані:

- цільовий метал – Ni;
- початкова концентрація Ni у продуктивному розчині, $C_0 = 180$ мг/л;
- об'єм розчину, $V = 1,0$ л;
- маса біосорбенту, $m = 5,0$ г;
- ефективність біосорбції, $E_s = 65$ %;
- максимальна сорбційна ємність біосорбенту, $q_{\max} = 30$ мг/г;
- ефективність додаткового осадження залишкового Ni, $E_p = 80$ %;
- цільова кінцева концентрація, $C_{\text{target}} = 10$ мг/л.

10.1. Початкова маса Ni у розчині:

$$U_0 = C_0 \times V = 180 \times 1,0 = 180 \text{ мг.}$$

10.2. Маса Ni, вилучена біосорбцією:

$$U_s = U_0 \times E_s / 100 = 180 \times 65 / 100 = 117 \text{ мг.}$$

10.3. Маса Ni після біосорбції:

$$U_{\text{after}_s} = 180 - 117 = 63 \text{ мг.}$$

10.4. Концентрація Ni після біосорбції:

$$C_s = 63 / 1,0 = 63 \text{ мг/л.}$$

10.5. Сорбційна ємність біосорбенту:

$$q = 117 / 5,0 = 23,4 \text{ мг/г.}$$

10.6. Перевірка достатності біосорбенту:

$$U_{\max} = q_{\max} \times m = 30 \times 5,0 = 150 \text{ мг.}$$

Оскільки $U_{\max} = 150$ мг, а $U_s = 117$ мг, заданої маси біосорбенту достатньо.

10.7. Маса Ni, вилучена осадженням після біосорбції:

$$U_p = 63 \times 80 / 100 = 50,4 \text{ мг.}$$

10.8. Маса Ni у кінцевому розчині:

$$U_{\text{final}} = 63 - 50,4 = 12,6 \text{ мг.}$$

10.9. Кінцева концентрація Ni:

$$C_{\text{final}} = 12,6 / 1,0 = 12,6 \text{ мг/л.}$$

10.10. Загальна ефективність очищення:

$$E_{\text{total}} = (117 + 50,4) / 180 \times 100 = 93,0 \text{ \%}.$$

10.11. Баланс мас:

$$U_0 = U_s + U_p + U_{\text{final}}.$$

$$180 = 117 + 50,4 + 12,6 = 180 \text{ мг.}$$

Балансова похибка: $\Delta B = 0$ %.

10.12. Висновок за прикладом. Комбінована схема біосорбції та додаткового осадження забезпечила зниження концентрації Ni з 180 мг/л до 12,6 мг/л. Загальна ефективність очищення становить 93 %. Біосорбент має достатню сорбційну ємність, оскільки розрахункове навантаження $q = 23,4$ мг/г не перевищує заданого $q_{\max} = 30$ мг/г. Водночас кінцева концентрація Ni трохи перевищує цільове значення 10 мг/л, тому для досягнення заданої якості

очищення можна розглянути збільшення маси біосорбенту, повторну сорбційну стадію або додаткове полірувальне очищення.

11. Форма таблиці для вихідних даних.

Варіант	Метал	C0, мг/л	V, л	U0, мг	Біосор бент	m, г	Es, %	qmax, мг/г	Ep, %
1	Ni								
2	Cu								

12. Форма таблиці для розрахунку біосорбції.

Варіант	Метал	U0, мг	Us, мг	Uafter_s, мг	Cs, мг/л	q, мг/г	Umax, мг
1							
2							
3							

13. Форма таблиці для комбінованого очищення.

Варіант	Метал	Cs, мг/л	Up, мг	Ufinal, мг	Cfinal, мг/л	Ettotal, %	ΔB, %
1							
2							
3							

14. Рейтингова таблиця технологічної придатності

Варіант	Біосо рбент	Метал	Ettotal _n, %	q_n, %	Csafe_ n, %	Select _n, %	Eco_n, %	ITS, %	Ранг
1									
2									
3									

15. Екологічна оцінка результатів.

Під час екологічної інтерпретації необхідно відповісти на такі питання:

1. Наскільки ефективно біосорбція зменшує концентрацію металу?
2. Чи достатня маса біосорбенту для заданого навантаження?
3. Яка частина металу переходить на біосорбент?
4. Яка частина металу залишається у розчині після біосорбції?
5. Чи потрібна додаткова стадія осадження?
6. Чи досягається цільова кінцева концентрація металу?
7. Який внесок біосорбції та осадження у загальне очищення?
8. Який вторинний відхід утворюється: насичений біосорбент, осад або обидва?
9. Який із цих відходів потенційно може бути ресурсом для подальшого вилучення металу?
10. Які екологічні ризики можуть виникати при поводженні з насиченим біосорбентом або осадом?

16. Критерії прийняття рішення.

За результатами розрахунків студент повинен сформулювати один із висновків:

1. Біосорбція є достатньою для очищення продуктивного розчину.
2. Біосорбція потребує додаткової стадії осадження.
3. Комбінована схема забезпечує високу ефективність очищення.
4. Біосорбент має недостатню сорбційну ємність.
5. Потрібне збільшення маси біосорбенту або повторна сорбційна стадія.
6. Осадження є необхідним для досягнення цільової концентрації.
7. Схема ефективна, але створює вторинний відхід, який потребує спеціального поводження.
8. Продуктивний розчин доцільно направити на іншу технологію концентрування.
9. Вилучений металовмісний біосорбент або осад може розглядатися як вторинний концентрат.
10. Схема потребує додаткової оцінки селективності та екологічної безпеки.

17. Вимоги до оформлення звіту.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Назву лабораторної роботи.
2. Мету та завдання.
3. Коротке теоретичне обґрунтування біосорбції та осадження металів.
4. Характеристику продуктивного розчину.
5. Обґрунтування вибору біосорбенту.
6. Обґрунтування вибору технологічної схеми.
7. Таблицю вихідних даних.
8. Розрахунок початкової маси металу у розчині.
9. Розрахунок маси металу, вилученої біосорбцією.
10. Розрахунок сорбційної ємності біосорбенту.
11. Перевірку достатності біосорбенту.
12. Розрахунок залишкової концентрації після біосорбції.
13. Розрахунок додаткового осадження.
14. Розрахунок кінцевої концентрації металу.
15. Баланс мас для комбінованої схеми.
16. Розрахунок загальної ефективності очищення.
17. Рейтингову таблицю технологічної придатності.
18. Графіки або діаграми:
 - початкова та кінцева концентрація металу;
 - маса металу на біосорбенті;
 - маса металу в осаді;
 - залишкова маса металу в розчині;
 - загальна ефективність очищення;
 - інтегральний індекс технологічної придатності.
19. Екологічну інтерпретацію.
20. Висновки.
21. Відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Що таке біосорбція?
2. Чим біосорбція відрізняється від біоаккумуляції?
3. Які біоматеріали можуть використовуватися як біосорбенти?
4. Які функціональні групи біомаси можуть брати участь у зв'язуванні металів?
5. Що таке сорбційна ємність?
6. Як розрахувати масу металу у продуктивному розчині?
7. Як розрахувати масу металу, вилучену біосорбентом?
8. Що показує залишкова концентрація після біосорбції?
9. Чому потрібно перевіряти достатність маси біосорбенту?
10. Що таке максимальна сорбційна ємність?
11. У яких випадках потрібна додаткова стадія осадження?
12. Чому осадження металів може створювати вторинний екологічний ризик?
13. Що таке баланс мас у системі очищення розчину?
14. Як визначити загальну ефективність очищення?
15. Чому висока ефективність очищення не завжди означає повну екологічну безпечність?
16. Що таке насичений біосорбент?
17. Як можна розглядати насичений біосорбент: як відхід чи як вторинний концентрат?
18. Які фактори впливають на селективність біосорбції?
19. Чому у навчальній роботі процес виконується у модельному форматі?
20. Як біосорбція та осадження завершують технологічний ланцюг біомайнінгу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПОВНОГО БІОМАЙНІНГОВОГО ЛАНЦЮГА: ФІТОЕКСТРАКЦІЯ → БІОРУДА → БІОВИЛУГОВУВАННЯ → БІОСОРБЦІЯ ТА ОСАДЖЕННЯ МЕТАЛІВ

Мета підсумкової комплексної розрахункової роботи: Інтегрувати знання і практичні навички, отримані під час виконання лабораторних робіт з дисципліни «Біомайнінг», у єдину розрахунково-аналітичну модель повного біомайнінгового технологічного ланцюга.

Робота спрямована на формування здатності комплексно оцінювати забруднений ґрунт або техногенний субстрат як потенційне джерело цінних компонентів, обирати рослини-фітоекстрактори, оцінювати фітотоксичність субстрату, моделювати накопичення металів у біомасі, визначати біорудний потенціал рослинної золи, оцінювати біовилуговування цінних компонентів і завершальне очищення продуктивного розчину методами біосорбції та осадження.

Завдання лабораторної роботи:

1. Проаналізувати вихідні дані щодо забрудненого ґрунту або техногенного субстрату.
2. Вибрати потенційні рослини-фітоекстрактори для заданого субстрату.
3. Оцінити фітотоксичність субстрату за показниками біотестування.
4. Розрахувати фітоекстракційний потенціал обраних рослин.
5. Визначити масу елемента, акумульованого у надземній біомасі.
6. Оцінити рослинну біомасу як потенційну біоруду.
7. Розрахувати зольність, концентрацію елемента у золі та коефіцієнт збагачення.
8. Змодельовати біовилуговування цільового елемента із золи або техногенного субстрату.
9. Побудувати баланс мас для процесу біовилуговування.
10. Змодельовати біосорбційне очищення продуктивного розчину.
11. Розрахувати додаткове осадження залишкового металу.
12. Побудувати загальний баланс мас усього біомайнінгового ланцюга.
13. Оцінити екологічні ризики та технологічну доцільність запропонованої схеми.
14. Сформулювати висновок щодо перспективності досліджуваного субстрату для біомайнінгу.

1. Очікувані результати навчання при виконанні роботи.

За результатами виконання лабораторної роботи здобувачі мають набути таких навичок та вмінь:

- (ПР21.4-С1) комплексно оцінювати техногенні субстрати як потенційні джерела цінних компонентів, обирати рослини для фітоекстракції та фітомайнінгу, розраховувати фітоекстракційні коефіцієнти, оцінювати рослинну біомасу як біоруду, моделювати біовилуговування цінних компонентів, складати баланс мас процесів біомайнінгу;
- (ПР21.5-С1) моделювати біосорбцію та осадження металів із продуктивних розчинів, оцінювати екологічні ризики на кожному етапі технологічного біомайнінгового ланцюга, формувати обґрунтований висновок щодо перспективності біомайнінгової технології.
- (ПР22.2-С1) Обирати та обґрунтовувати напрями фіторе mediaції та біомайнінгу гірничопромислових земель з урахуванням властивостей рослин до фітоекстракції та фітоаккумуляції важких металів з подальшою утилізацією.

2. Хід виконання лабораторної роботи.

2.1. Логіка комплексної роботи.

Підсумкова робота об'єднує шість попередніх лабораторних робіт у єдину послідовність (табл. 7.1).

Таблиця 7.1 – Логіка етапів комплексної роботи

Етап	Зміст	Відповідна лабораторна робота
1	Підбір рослин-фітоекстракторів	Лабораторна робота № 1
2	Біотестування та біоіндикація фітотоксичності	Лабораторна робота № 2
3	Вегетаційна оцінка фітоекстракції	Лабораторна робота № 3
4	Оцінка біомаси як біоруди	Лабораторна робота № 4
5	Розрахунок біовилуговування	Лабораторна робота № 5
6	Моделювання біосорбції та осадження	Лабораторна робота № 6

Загальна технологічна схема:

Забруднений субстрат → підбір рослин → біотестування → вегетаційний дослід → забруднена біомаса → рослинна зола → біовилуговування → продуктивний розчин → біосорбція → осадження → очищений розчин + вторинний концентрат.

2.2. Вихідний наскрізний кейс.

Для виконання роботи студент отримує модельний техногенний субстрат, який містить підвищені концентрації важких металів або критичних елементів. Субстрат може бути умовно пов'язаний із хвостами збагачення, золошлаковими матеріалами, породними відвалами, шламами, забрудненими ґрунтами або зольними залишками (табл. 7.2).

За рішенням викладача цільовий елемент може бути змінений на Cu, Zn, Co, Mn, Li, Sr, V або суму рідкісноземельних елементів.

Таблиця 7.2 – Загальна характеристика субстрату

Показник	Значення
Тип субстрату	Техногенний субстрат / забруднений ґрунт
Маса субстрату в одному контейнері	2,0 кг
pH водної витяжки	6,2
Електропровідність	1,8 мСм/см
Цільовий елемент	Ni
Концентрація Ni у субстраті	250 мг/кг
Додаткові елементи	Zn, Cu, Mn
Рекомендовані рослини	гірчиця, соняшник, пшениця

3. Етап 1. Підбір рослин-фітоекстракторів.

3.1. Вихідні дані.

На першому етапі необхідно оцінити потенційну придатність трьох рослин для фітоекстракції (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Вихідні дані для попередньої оцінки

Критерій	Гірчиця	Соняшник	Пшениця
Швидкість проростання, 0–5	5	3	4
Потенціал біомаси, 0–5	3	5	3
Толерантність до забруднення, 0–5	4	4	3
Здатність до накопичення металів, 0–5	4	4	2
Здатність до транслокації, 0–5	4	3	2
Технологічна придатність до збирання, 0–5	4	5	3
Екологічна безпечність, 0–5	4	4	5

3.2. Розрахунок попереднього рейтингу:

$$R_{\text{поп}} = \Sigma B, \quad (7.1)$$

де $R_{\text{поп}}$ – попередній рейтинг рослини; ΣB – сума балів за всіма критеріями.

3.3. Завдання.

1. Розрахувати попередній рейтинг для кожної рослини.
2. Визначити рослину з найвищим потенціалом.
3. Пояснити, чи завжди рослина з найвищим рейтингом буде найкращою для практичного фітомайнінгу.
4. Обрати дві рослини для подальшого розрахунку.

4. Етап 2. Біотестування та оцінка фітотоксичності субстрату.

4.1. Вихідні дані біотестування.

На другому етапі оцінюється, наскільки досліджуваний субстрат пригнічує проростання та ріст чутливої тест-рослини.

Таблиця 7.4 – Вихідні дані для біотестування

Показник	Контроль	Дослідний субстрат
Кількість висіяних насінин	20	20
Кількість пророслих насінин	19	15
Схожість, %	95	75
Середня довжина кореня, мм	32	16
Середня біомаса проростків, г	0,48	0,30

4.2. Розрахункові формули.

Відносна схожість: $RG = G_d / G_k \times 100$.

Відносна довжина кореня: $RRL = L_{rd} / L_{rk} \times 100$.

Відносна біомаса: $RB = B_d / B_k \times 100$.

Індекс проростання: $GI = (G_d / G_k) \times (L_{rd} / L_{rk}) \times 100$.

Інтегральний біоіндикаційний індекс: $IBI = 0,4 \times RG + 0,4 \times RRL + 0,2 \times RB$.

4.3. Завдання.

1. Розрахувати RG , RRL , RB , GI та IBI .

2. Визначити рівень фітотоксичності субстрату.
3. Зробити висновок, чи придатний субстрат для вегетаційного дослід.
4. Запропонувати, чи потрібна попередня меліорація субстрату.

5. Етап 3. Вегетаційна оцінка фітоекстракційного потенціалу.

5.1. Вихідні дані вегетаційного дослід (табл. 7.5).

На третьому етапі оцінюється здатність рослин накопичувати Ni у біомасі.

Таблиця 7.5 – Вихідні дані вегетаційного дослід

Показник	Гірчиця	Соняшник	Пшениця
Кількість пророслих рослин	20	10	20
Кількість живих рослин наприкінці дослід	17	8	16
Суха маса надземної частини у контролі, г	1,20	5,00	1,80
Суха маса надземної частини у досліді, г	0,84	3,50	1,10
Суха маса коренів у досліді, г	0,30	1,20	0,65
Концентрація Ni у субстраті, мг/кг	250	250	250
Концентрація Ni у коренях, мг/кг	390	420	280
Концентрація Ni у надземній частині, мг/кг	360	310	120

5.2. Розрахункові формули.

Вживаність: $S = N_s / n \times 100$.

Індекс толерантності за біомасою: $TIB = B_{dsd} / B_{dsk} \times 100$.

Коефіцієнт біоконцентрації у коренях: $BCF = C_{root} / C_{soil}$.

Коефіцієнт біоаккумуляції у надземній частині: $BAC = C_{shoot} / C_{soil}$.

Коефіцієнт транслокації: $TF = C_{shoot} / C_{root}$.

Потенціал вилучення Ni надземною біомасою: $U_{shoot} = C_{shoot} \times B_{ds}$, де B_{ds} потрібно перевести у кг.

5.3. Завдання.

1. Розрахувати S, TIB, BCF, BAC, TF та U_{shoot} для кожної рослини.
2. Визначити, яка рослина найкраще підходить для фітоекстракції.
3. Визначити, яка рослина більше відповідає фітостабілізації.
4. Пояснити, чому велика біомаса може компенсувати нижчу концентрацію металу.
5. Обрати одну рослину для етапу оцінки біоруди.

6. Етап 4. Оцінка рослинної біомаси як біоруди.

На четвертому етапі аналізується надземна біомаса обраної рослини як потенційна біоруда.

6.1. Вихідні дані.

Для подальшого розрахунку використовується біомаса гірчиці (табл. 7.6).

6.2. Розрахункові формули.

Вологість біомаси: $W = (M_{fresh} - M_{dry}) / M_{fresh} \times 100$.

Зольність: $A = M_{ash} / M_{dry} \times 100$.

Маса Ni у сухій біомасі: $U_{bio} = C_{bio} \times M_{dry_kg}$.

Умовна концентрація Ni у золі: $C_{ash} = C_{bio} \times R \times 100 / A$.

Коефіцієнт збагачення від біомаси до золи: $EF_{bio-ash} = C_{ash} / C_{bio}$.

Коефіцієнт збагачення від субстрату до золи: $EF_{\text{soil-ash}} = C_{\text{ash}} / C_{\text{soil}}$.
 Потенційне накопичення Ni на гектар: $U_{\text{ha}} = C_{\text{bio}} \times Y_{\text{dry}} / 1\,000\,000$.
 Потенційно вилучувана маса Ni: $U_{\text{rec}} = U_{\text{ha}} \times R \times E_{\text{tech}}$.

Таблиця 7.6 – Вихідні дані вегетаційного досліджу

Показник	Значення
Маса сирої біомаси	42,0 г
Маса сухої біомаси	8,0 г
Маса золи	0,72 г
Концентрація Ni у сухій біомасі	900 мг/кг
Концентрація Ni у субстраті	150 мг/кг
Коефіцієнт збереження Ni під час озолення	0,90
Умовна урожайність сухої біомаси	5000 кг/га
Умовна ефективність технологічного вилучення Ni із золи	0,70

6.3. Завдання.

1. Розрахувати вологість і зольність біомаси.
2. Розрахувати масу Ni у сухій біомасі.
3. Визначити умовну концентрацію Ni у золі.
4. Розрахувати коефіцієнти збагачення.
5. Розрахувати потенційне накопичення Ni на гектар.
6. Розрахувати потенційно вилучувану масу Ni.
7. Зробити висновок, чи можна розглядати золу як біоруду.

7. Етап 5. Розрахункова оцінка біовилуговування.

На п'ятому етапі моделюється перехід Ni із рослинної золи у продуктивний розчин (табл. 7.7).

7.1. Вихідні дані.

Таблиця 7.7 – Вихідні дані для моделювання біовилуговування

Показник	Значення
Маса золи	20 г
Концентрація Ni у золі	9000 мг/кг
Об'єм продуктивного розчину	0,5 л
Сценарій 1 – низька ефективність біовилуговування	20 %
Сценарій 2 – помірна ефективність біовилуговування	50 %
Сценарій 3 – висока ефективність біовилуговування	80 %
Ефективність подальшого вилучення Ni з розчину	70 %

7.2. Розрахункові формули.

Загальна маса Ni у золі: $U_0 = C_0 \times M_0$.

Маса Ni, що перейшла у розчин: $U_{\text{sol}} = U_0 \times E / 100$.

Маса Ni у твердому залишку: $U_{\text{res}} = U_0 - U_{\text{sol}}$.

Концентрація Ni у продуктивному розчині: $C_{\text{sol}} = U_{\text{sol}} / V$.

Залишкова концентрація Ni у твердій фазі: $C_{\text{res}} = U_{\text{res}} / M_{\text{res}}$.

Маса Ni, потенційно доступна для подальшого вилучення: $U_{rec} = U_{sol} \times E_{rec} / 100$.

7.3. Завдання.

1. Розрахувати U_0 .
2. Розрахувати U_{sol} , U_{res} , C_{sol} , C_{res} і U_{rec} для трьох сценаріїв.
3. Побудувати таблицю порівняння сценаріїв.
4. Визначити, який сценарій є найперспективнішим.
5. Пояснити, чому висока ефективність вилуговування може одночасно підвищувати ресурсний потенціал і екологічний ризик.

8. Етап 6. Моделювання біосорбції та осадження металів.

8.1. Вихідні дані.

На шостому етапі моделюється очищення продуктивного розчину після біовилуговування. Для подальшого розрахунку використовується сценарій із ефективністю біовилуговування 50 % (табл. 7.8).

Таблиця 7.8 – Вихідні дані для моделювання біовилуговування

Показник	Значення
Початкова концентрація Ni у продуктивному розчині	180 мг/л
Об'єм продуктивного розчину	1,0 л
Маса біосорбенту	5,0 г
Ефективність біосорбції	65 %
Максимальна сорбційна ємність біосорбенту	30 мг/г
Ефективність додаткового осадження	80 %
Цільова кінцева концентрація Ni	10 мг/л

8.2. Розрахункові формули.

Початкова маса Ni у розчині: $U_0 = C_0 \times V$.

Маса Ni, вилучена біосорбцією: $U_s = U_0 \times E_s / 100$.

Маса Ni після біосорбції: $U_{after_s} = U_0 - U_s$.

Концентрація Ni після біосорбції: $C_s = U_{after_s} / V$.

Сорбційна ємність: $q = U_s / m$.

Максимально можлива маса вилучення біосорбентом: $U_{max} = q_{max} \times m$.

Маса Ni, вилучена осадженням: $U_p = U_{after_s} \times E_p / 100$.

Кінцева маса Ni у розчині: $U_{final} = U_{after_s} - U_p$.

Кінцева концентрація Ni: $C_{final} = U_{final} / V$.

Загальна ефективність очищення: $E_{total} = (U_s + U_p) / U_0 \times 100$.

8.3. Завдання.

1. Розрахувати початкову масу Ni у продуктивному розчині.
2. Розрахувати масу Ni, вилучену біосорбцією.
3. Визначити залишкову концентрацію після біосорбції.
4. Розрахувати сорбційну ємність біосорбенту.
5. Перевірити, чи достатньо заданої маси біосорбенту.
6. Розрахувати масу Ni, вилучену додатковим осадженням.
7. Визначити кінцеву концентрацію Ni у розчині.

8. Розрахувати загальну ефективність очищення.
9. Побудувати баланс мас.
- 10.Зробити висновок, чи досягається цільова концентрація.

9. Загальний баланс біомайнінгового ланцюга.

Після виконання всіх розрахунків студент повинен скласти узагальнений баланс за основними етапами (табл. 7.9).

Таблиця 7.9 – Вихідні дані для моделювання біовилуговування

Етап	Основний показник	Значення
Субстрат	Концентрація Ni у субстраті, мг/кг	
Фітоекстракція	Ni у надземній біомасі, мг	
Біоруда	Концентрація Ni у золі, мг/кг	
Біовилуговування	Ni у продуктивному розчині, мг	
Біосорбція	Ni на біосорбенті, мг	
Осадження	Ni в осаді, мг	
Кінцевий розчин	Залишкова концентрація Ni, мг/л	

10. Узагальнена екологічна оцінка.

У підсумковій частині студент повинен відповісти на такі питання:

1. Чи був вихідний субстрат придатним для біологічного використання?
2. Яка рослина мала найвищий фітоекстракційний потенціал?
3. Чи сформована біомаса може розглядатися як біоруда?
4. Чи забезпечує озолення суттєве збагачення цільового елемента?
5. Який сценарій біовилуговування є найраціональнішим?
6. Чи є продуктивний розчин достатньо концентрованим для подальшого вилучення металу?
7. Чи достатньо ефективною є біосорбція?
8. Чи потрібне додаткове осадження?
9. Які вторинні відходи утворюються у запропонованому ланцюгу?
- 10.Який етап створює найбільший екологічний ризик?
- 11.Який етап має найбільше ресурсне значення?
- 12.Чи можна запропоновану схему розглядати як елемент циркулярної економіки?

11. Підсумкова технологічна схема.

У звіті студент повинен подати схему запропонованого процесу у вигляді блок-схеми:

1. Техногенний субстрат.
2. Біотестування.
3. Вибір рослини.
4. Вегетаційне вирощування.
5. Збирання надземної біомаси.
6. Сушіння біомаси.
7. Отримання золи.
8. Біовилуговування.

9. Продуктивний розчин.
10. Біосорбція.
11. Осадження.
12. Очищений розчин.
13. Насичений біосорбент або металовмісний осад.
14. Подальша утилізація або ресурсне використання.

12. Підсумковий висновок.

У висновку необхідно зазначити:

1. Чи є досліджуваний субстрат перспективним для біомайнінгу.
2. Яка рослина є найбільш доцільною для фітоекстракції.
3. Чи має біомаса достатній біорудний потенціал.
4. Яка частина металу може бути переведена у продуктивний розчин.
5. Наскільки ефективно можна очистити продуктивний розчин.
6. Які етапи потребують подальшої експериментальної перевірки.
7. Які екологічні обмеження має запропонована схема.
8. Чи може така технологія бути рекомендована для подальших лабораторних, пілотних або польових досліджень.

13. Вимоги до оформлення звіту.

Звіт з підсумкової комплексної роботи повинен містити:

1. Назву роботи.
2. Мету і завдання.
3. Коротке теоретичне обґрунтування біомайнінгового ланцюга.
4. Характеристику вихідного субстрату.
5. Обґрунтування вибору рослин.
6. Розрахунок показників біотестування.
7. Розрахунок фітоекстракційного потенціалу.
8. Оцінку біомаси як біоруди.
9. Розрахунок біовилуговування.
10. Розрахунок біосорбції та осадження.
11. Загальний баланс мас.
12. Технологічну блок-схему.
13. Екологічну оцінку.
14. Висновки.
15. Список використаних джерел.

Контрольні питання

1. Що таке фітоекстракція?
2. Які рослини можна вважати перспективними для фітоекстракції?
3. Як рН субстрату впливає на біодоступність металів?
4. Що таке біотестування і чим воно відрізняється від хімічного аналізу ґрунту?
5. Що означає коефіцієнт біоконцентрації?
6. Які властивості повинна мати ефективна рослина-фітоекстрактор?
7. Які екологічні ризики пов'язані зі збиранням і утилізацією забрудненої

біомаси?

8. За яких умов рослинна біомаса може розглядатися як потенційна біоруда?
9. Чому рослинна біомаса може розглядатися як потенційна сировина для вилучення металів?
10. Що показує зольність біомаси?
11. Які рослини можуть бути перспективними для отримання біоруди?
12. Чому забруднену біомасу не можна використовувати як компост або корм?
13. Чим біовилуговування відрізняється від хімічного вилуговування?
14. Які фактори впливають на селективність біосорбції?

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

Навчальні досягнення здобувачів вищої освіти за результатами вивчення курсу загалом оцінюватимуться за шкалою, що наведена нижче:

Рейтингова шкала	Інституційна шкала
90–100	відмінно
74–89	добре
60–73	задовільно
0–59	незадовільно

Здобувачі вищої освіти можуть отримати підсумкову оцінку з навчальної дисципліни на підставі поточного оцінювання знань за умови, якщо набрана кількість балів складатиме не менше як 60 балів.

Максимальне оцінювання:

Теоретична частина	Практична частина		Додаткові бали	Разом
	При своєчасному складанні	При несвоєчасному складанні	Тематичні дискусії щодо логіки лабораторних досліджень	
60	35	25	5	100

Лабораторні роботи приймаються за контрольними запитаннями до кожної роботи.

Критерії оцінювання лабораторної роботи

За кожну лабораторну роботу здобувач вищої освіти може отримати наступну кількість балів:

5 балів: отримано правильну відповідь на контрольні запитання, з поясненням змісту окремих складових лабораторної роботи

4 бали: отримано правильну відповідь з незначними неточностями згідно з еталоном, відсутня формула та/або пояснення змісту окремих складових, або не зазначено одиниці виміру.

3 бали: отримано неправильну відповідь, проте використано формулу з поясненням змісту окремих її складових, зазначено одиниці виміру.

2 бали: отримано неправильну відповідь, проте використано формулу без пояснень змісту окремих її складових та не зазначено одиниці виміру.

1 бал: наведено неправильну відповідь, до якої не надано жодних пояснень.

Додаткові **5 балів** здобувач може отримати під час тематичних дискусій щодо визначення логіки лабораторних досліджень в галузі біомайнінгу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Базові

1. Ковров О. С., Клімкіна І. І. Біомайнінг : монографія / О. С. Ковров, І. І. Клімкіна ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : Журфонд, 2025. 152 с.
2. Ковров О. С., Кулікова Д. В. Екологічні стратегії та інноваційні природоохоронні технології в ЄС та Україні : монографія / О. С. Ковров, Д. В. Кулікова ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : Журфонд, 2025. 236 с.
3. Харитонов М. М. Екологічна безпека ґрунтів в ЄС та Україні : монографія / М. М. Харитонов ; М-во освіти і науки України, Дніпровський державний аграрно-економічний університет. Дніпро : Журфонд, 2025. 234 с.
4. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, б. р. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення: 23.08.2026).
5. Цицюра Я. Г. Рекультивация і фіторе mediaція деградованих земель : метод. вказівки. Вінниця : ВНАУ, 2023. 360 с.
6. Клименко М. О., Залеський І. І. Техноекологія : підручник / М. О. Клименко, І. І. Залеський. Херсон : ОЛДІ ПЛЮС, 2017. 348 с.
7. Войтків П. І., Іванов Є. М. Технології захисту та відновлення ґрунтів : навч.-метод. посіб. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2023. 280 с.
8. Землеробство : підручник / за ред. І. Д. Примака. Київ : [б.в.], 2020. 578 с.
9. Манько Ю. П., Цюк О. Л. Модель системи екологічного землеробства в Лісостепу України : метод. рекомендації для впровадження у виробництво. Київ : Аграрна освіта, 2018. 36 с.
10. Шувар І. А. та ін. Сидерати в сучасному землеробстві : науково-виробниче видання (монографія). Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2018. 156 с.
11. Цицюра Я. Г., Шкатула Ю. М., Забарна Т. А., Пелех Л. В. Інноваційні підходи до фіторе mediaції та фіторекультивациї у сучасних системах землеробства : монографія. Вінниця : ТОВ «Друк», 2022. 1200 с. URL: <http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/31038.pdf> (дата звернення: 23.08.2026).
12. Герасимов О. І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища : навч. посіб. Одеса : ТЕС, 2018. 228 с.

Допоміжні

1. Kovrov O., Klimkina I., Kodachenko L. Обґрунтування способу фіторе mediaції деградованих та забруднених земель композитними біогумусовими брикетами. Technology Audit and Production Reserves. Industrial and Technology Systems. 2019. Vol. 5, № 3(49). P. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.183078>.

2. Ковров О. С., Красовський С. А., Сушко З. Л. Обґрунтування параметрів біологічної рекультивації відвалу шахти для зменшення викидів вуглепородного пилу в атмосферу. Екологічні науки. 2023. № 4(49). С. 97–104. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.13>.
3. Красовський С. А., Ковров О. С. Вплив солей важких металів Pb та Cd на вегетативні показники *Triticum aestivum*. Техногенно-екологічна безпека. 2022. № 12(2). С. 32–36. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2022.2.4>.
4. Красовський С. А., Ковров О. С., Клімкіна І. І. Визначення фізико-хімічних параметрів вугільного відвалу ДТЕК ШУ «Героїв космосу». Екологічні науки. 2021. № 6(39). С. 137–140. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.23>.
5. Красовський С. А., Ковров О. С., Клімкіна І. І. Фіторемедіація вугільних відвалів Західного Донбасу. Збірник наукових праць НГУ. 2021. № 65. С. 170–178. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.170>.
6. Ковров О. С., Клімкіна І. І., Самарська А. В., Красовський С. А. Лабораторне дослідження процесу біовилуговування важких металів як явища кислотного шахтного дренажу. Збірник наукових праць НГУ. 2020. № 60. С. 150–161. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.150>.
7. Kovrov O., Fedotov V., Zvoryhin K. Justification of phytoremediation technology of degraded landscapes on the basis of ecosystem approach. Technology Audit and Production Reserves. Industrial and Technology Systems. 2019. Vol. 6, № 3(50). P. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.185204>.
8. Бондарчук Ю. В., Вовк О. О. Біомайнінг – екологічна технологія при видобутку металів. Технічна інженерія. 2022. № 2(90). С. 144–146. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-144-146](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-144-146).

Інформаційні ресурси

- <http://zakon4.rada.gov.ua> Офіційний сайт Верховної Ради України
- <http://www.mon.gov.ua> Офіційний сайт Міністерства освіти і науки України
- www.irbis-nbuv.gov.ua Наукова періодика України. Бібліотека ім. В. Вернадського
- <http://env.teset.sumdu.edu.ua> Науковий центр прикладних екологічних досліджень
- <http://ir.nmu.org.ua> Репозиторій НТУ «Дніпровська політехніка» [електронний ресурс]

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	3
МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	4
1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1	7
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	19
3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3	28
4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4	41
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5	53
6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6	65
7. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7	77
КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	87

Навчальне видання

Ковров Олександр Станіславович

БІОМАЙНІНГ

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт
для здобувачів ступеня магістра освітньо-професійної програми
«Екологія» зі спеціальності Е2 Екологія

Видано в авторській редакції.

Електронний ресурс.
Підписано до видання 16.07.2026. Авт. арк. 4,2.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.