

**Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка**

**Хіміко-біологічний факультет
Кафедра загальної біології та методики навчання природничих дисциплін**

**Кваліфікаційна робота
на тему:
ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ УЧНІВ СТАРШОЇ
ШКОЛИ В РЕАЛІЗАЦІЇ МІЖНАРОДНОГО ПРОЄКТУ
«ПОМ'ЯКШЕННЯ НАСЛІДКІВ ЗМІНИ КЛІМАТУ ЗА ДОПОМОГОЮ
ПЕРЕДОВИХ ФІТОТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІЙСЬКОВИХ ЗЕМЕЛЬ»**

**Спеціальність: 014 Середня освіта
Предметна спеціальність: 014.05 Середня освіта (Біологія та здоров'я
людини)**

**Здобувач другого (магістерського)
рівня вищої освіти, ОПП «Середня освіта
(Біологія та здоров'я людини, хімія»
Пилипишина Максима Олеговича**

**НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:
кандидат біологічних наук, доцент
Герц Андрій Іванович**

**РЕЦЕНЗЕНТ:
доктор педагогічних наук, професор
Цідило Іван Миколайович**

**Робота захищена з оцінкою:
Національна шкала _____
Кількість балів: ____ Оцінка: ECTS ____**

Анотація

Пилипишин М.О. Організація дослідницької діяльності учнів старшої школи в реалізації міжнародного проєкту «Пом'якшення наслідків зміни клімату за допомогою передових фітотехнологій для військових земель» / Пилипишин Максим Олегович; ТНПУ ім. В. Гнатюка, хіміко-біологічний факультет, кафедра загальної біології та методики навчання природничих дисциплін; наук. керівник Герц А. І. – Тернопіль, 2025. – .67 с.

У даній роботі розроблено, теоретично обґрунтовано та апробовано педагогічну модель організації дослідницької діяльності учнів старших класів на засадах проєктного навчання, STEM-підходу та громадянської науки. Метою роботи було створення та перевірка методики залучення учнів до наукової діяльності на прикладі міжнародного проєкту НАТО SPS G6084 «Пом'якшення наслідків зміни клімату за допомогою передових фітотехнологій для військових земель».

Результати роботи показали, що розроблена педагогічна модель «Юний еко-дослідник» дозволяє ефективно адаптувати складні наукові експерименти в умовах школи. Це було продемонстровано на двох практичних кейсах, зокрема, вивченні ефекту «доза-відповідь» при застосуванні золи з біомаси та порівняльному аналізі ефективності різних типів біочару. Продemonстровано можливість залучення учнів до дослідницького циклу, від планування експерименту до збору даних за допомогою інструментів громадянської науки (MultispeQ, Petiole Pro) та інтерпретації результатів.

Було досліджено соціальний контекст впровадження фітотехнологій за допомогою Q-методології. Аналіз дозволив виокремити три домінантні точки зору серед потенційних стейкхолдерів (аграріїв, представників громад): «Прагматичні оптимісти», орієнтовані на економічну вигоду; «Екологічні ентузіасти», мотивовані ціннісними переконаннями; та «Обережні скептики», що висловлюють занепокоєння через брак інформації та потенційні ризики.

Внаслідок поєднання результатів педагогічного моделювання з даними Q-дослідження, більш глибоко обґрунтовано зміст програми факультативу. Стало зрозуміло, що сучасна освітня програма не може бути відірваною від реальності. Вона повинна не лише вчити дослідницьким навичкам, але й давати відповіді на реальні запити суспільства. Саме тому ми пропонуємо інтегрувати в неї елементи економічного аналізу та навички роботи з доказовою базою. У підсумку, наша робота також пропонує готові методичні рекомендації, які можуть використати вчителі для організації подібної дослідницької діяльності.

Ключові слова: дослідницька компетентність, проєктна діяльність, STEM-освіта, громадянська наука, Q-методологія, педагогічна модель, фіторемедіація, *Miscanthus* × *giganteus*.

Summary

Pylypyshyn M.O. Organization of High School Students' Research Activities in the Implementation of the International Project "Mitigation of Climate Change Through Advanced Phytotechnology for Military Lands" / Pylypyshyn M.O. Ternopil V. Hnatiuk National Pedagogical University, Department of General Biology and Methodology of Sciences Teaching; supervisor of scientific work Herts A.I. – Ternopil, 2025. – 67 pp.

This thesis develops, theoretically substantiates, and approves a pedagogical model for organizing the research activities of high school students based on the principles of project-based learning, the STEM approach, and citizen science. The aim of the work was to create and test a methodology for engaging students in authentic scientific activities using the example of the NATO SPS G6084 international project, "Mitigation of Climate Change Through Advanced Phytotechnology for Military Lands."

The results of the study demonstrated that the developed pedagogical model, "Young Eco-Researcher," effectively adapts complex scientific experiments for implementation in a school setting. This was demonstrated through two practical case studies: examining the "dose-response" effect of applying biomass ash and a comparative analysis of the effectiveness of different types of biochar. The possibility of involving students in the complete research cycle was demonstrated: from experiment planning to data collection using citizen science tools (MultispeQ, Petiole Pro) and the interpretation of results.

Separately, the social context of phytotechnology implementation was investigated using Q-methodology. The analysis identified three dominant viewpoints among potential stakeholders (farmers, community representatives): "Pragmatic Optimists," focused on economic benefits; "Ecological Enthusiasts," motivated by value-based convictions; and "Cautious Skeptics," who express concerns due to a lack of information and potential risks.

The synthesis of the results from the pedagogical modeling and the Q-study provided a basis for the content of the elective course "Applied Ecology: From Research to Action." It was proven that an effective educational program should not only develop research skills but also consider the real needs of society by integrating elements of economic analysis and evidence-based practice. The thesis contains methodological recommendations for teachers on organizing authentic student research activities.

Keywords: research competence, project-based learning, STEM education, citizen science, Q-methodology, pedagogical model, phytoremediation, *Miscanthus × giganteus*.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- BA – (Biomass Ash) – Зола з біомаси
- EC – (Electrical Conductivity) – Електропровідність
- IDL – Ideale (комерційна назва біочару з відходів біомаси)
- INT – Intermarcom (комерційна назва біочару з деревини)
- M×g – Miscanthus × giganteus (Міскантус гігантський)
- NATO SPS – (NATO Science for Peace and Security) – Програма НАТО «Наука заради миру та безпеки»
- OM – (Organic Matter) – Органічна речовина
- pH – Водневий показник
- POXC – (Permanganate Oxidizable Carbon) – Перманганат-окислюваний вуглець
- Q-методологія – Метод дослідження суб'єктивності шляхом сортування тверджень
- SIR – (Substrate-Induced Respiration) – Субстрат-індуковане дихання
- SPAD – (Soil Plant Analysis Development) – Умовні одиниці для вимірювання відносного вмісту хлорофілу
- STEM – (Science, Technology, Engineering, Mathematics) – Наука, Технології, Інженерія, Математика
- TE – (Trace Elements) – Мікроелементи (слідові елементи)
- ugC – Мінералізація вуглецю
- ВНП – Всеукраїнський науковий проєкт
- ЕГ – Експериментальна група
- ЗВО – Заклад вищої освіти
- КГ – Контрольна група
- МАН – Мала академія наук України
- МОН – Міністерство освіти і науки України
- НАТО – Організація Північноатлантичного договору
- НУШ – Нова українська школа

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ЗМІСТ	5
ВСТУП.....	7
Розділ 1. Теоретичні основи організації дослідницької діяльності учнів у галузі природничих наук	10
1.1. Взаємозв'язок понять “дослідницька компетентність”, “проектна діяльність” та “STEM-освіта” в сучасному освітньому просторі	10
1.2. Роль Малої академії наук у розвитку дослідницького потенціалу учнів старших класів.....	11
1.3. Громадянська наука (Citizen Science) як інноваційний інструмент залучення молоді до реальних досліджень.....	12
1.4. Q-методологія як інструмент дослідження суспільного сприйняття наукових інновацій.....	13
1.5. Наукова основа для розробки освітньої моделі: аналіз результатів експериментальних досліджень фітотехнологій.....	15
Розділ 2. Модель та методика організації дослідницької діяльності учнів.	18
2.1. Педагогічна модель організації дослідницької діяльності учнів «Юний еко-дослідник»	18
2.2. Змістове наповнення моделі та етапи дослідницької діяльності учнів на основі пілотних наукових досліджень	19
2.2.1. Кейс №1: Вивчення ефекту «доза-відповідь» на прикладі дослідження золи з біомаси <i>Miscanthus × giganteus</i>	19
2.2.2. Кейс №2: Ускладнення дослідницьких завдань на прикладі порівняльного аналізу різних типів біочару	30

2.3. Програма гуртка «Прикладна екологія: від дослідження до дії»....	39
Розділ 3. ОРГАНІЗАЦІЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ПЕДАГОГІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	42
3.1. Організація та методика педагогічного експерименту	42
3.2. Організація та методика дослідження суспільного ставлення до впровадження <i>Miscanthus</i> × <i>giganteus</i> за допомогою Q-методології.....	43
3.3. Аналіз результатів педагогічного експерименту	44
3.4. Аналіз результатів Q-дослідження: ідентифікація ключових точок зору.....	47
3.5. Обговорення результатів. Зв'язок між суспільним сприйняттям, освітньою діяльністю та перспективами впровадження технології.	48
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	54
Додаток А	59
Додаток Б	63

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна українська освіта в рамках концепції “Нова українська школа” перебуває на етапі переходу до компетентнісної парадигми, де пріоритетом є розвиток умінь учнів застосовувати знання на практиці. У цьому контексті особливої значущості набуває організація дослідницької діяльності, яка є ключовим інструментом для формування критичного мислення та наукової грамотності. Водночас повномасштабна військова агресія поставила перед суспільством та наукою нові виклики, зокрема проблему екологічного відновлення деградованих та забруднених земель, що робить залучення молоді до вирішення цих завдань надзвичайно актуальним [2, 5, 18].

Нині існує потреба в розробці таких педагогічних моделей, які б дозволили інтегрувати учнів у реальні, соціально значущі наукові проекти. Традиційні форми організації дослідницької роботи часто мають імітаційний характер та відірвані від справжнього наукового процесу. Громадянська наука (Citizen Science), що передбачає участь волонтерів у наукових дослідженнях, та міждисциплінарний STEM-підхід пропонують інноваційні шляхи для подолання цього розриву, роблячи навчальний процес автентичним, технологічним та мотивуючим [7, 8, 17].

Міжнародний проєкт НАТО SPS G6084 “Пом’якшення наслідків зміни клімату за допомогою передових фітотехнологій для військових земель” є унікальною платформою для реалізації такої освітньої моделі. Його спрямованість на відновлення земель за допомогою фіторемедіації та принципів циркулярної біоекономіки безпосередньо відповідає актуальним екологічним викликам України. Використання в проєкті доступних цифрових інструментів (MultispeQ, Petiole Pro) та онлайн-платформ (PhotosynQ) відкриває можливість для залучення школярів до збору та аналізу реальних наукових даних.

Проте, успішне впровадження будь-якої інновації, включно з освітньою, залежить від її сприйняття суспільством. Дослідження думок, цінностей та упереджень потенційних стейкхолдерів (фермерів, представників громад) за допомогою Q-методології дозволяє виявити бар’єри та драйвери впровадження

фітотехнологій. Інтеграція цих соціально-психологічних даних у зміст освітньої програми робить її контекстуалізованою та більш дієвою, оскільки вона готує учнів до реальних суспільних дискусій та викликів. На нашу думку, актуальність роботи визначається необхідністю розробки та апробації інноваційної педагогічної моделі, що поєднує автентичну наукову діяльність, принципи громадянської науки та враховує соціальний контекст впровадження екологічних технологій [6].

Метою роботи є розробка, теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка педагогічної моделі організації дослідницької діяльності учнів старших класів на засадах громадянської науки та проєктного навчання (на прикладі міжнародного екологічного проєкту).

Об'єктом дослідження є процес організації дослідницької діяльності учнів старших класів у закладах загальної середньої та позашкільної освіти.

Предметом дослідження є педагогічні умови, форми, методи та засоби формування дослідницької компетентності учнів через їхнє залучення до реалізації міжнародного наукового проєкту.

Завдання роботи:

- Проаналізувати теоретичні основи організації дослідницької діяльності учнів, розкривши взаємозв'язок понять “дослідницька компетентність”, “проєктна діяльність”, “STEM-освіта” та “громадянська наука”.
- Розробити педагогічну модель “Юний еко-дослідник” та програму відповідного факультативу, що адаптує зміст реальних наукових досліджень для освітніх цілей.
- Провести Q-дослідження для виявлення та аналізу домінантних точок зору стейкхолдерів щодо впровадження фітотехнологій в Україні.
- Розробити методику та змодельовати результати педагогічного експерименту для перевірки ефективності розробленої моделі.
- Сформулювати методичні рекомендації для вчителів щодо

організації автентичної дослідницької діяльності учнів.

Методи дослідження: теоретичні (аналіз, синтез, узагальнення науково-педагогічної літератури, моделювання); емпіричні (Q-методологія, педагогічне спостереження, анкетування, тестування, аналіз продуктів діяльності учнів); методи математичної статистики для обробки результатів.

Практичне значення. Розроблена педагогічна модель та програма факультативу “Прикладна екологія: від дослідження до дії” можуть бути впроваджені в освітній процес закладів загальної середньої та позашкільної освіти для організації STEM-проектів та підготовки учнів до конкурсів МАН. Результати Q-дослідження можуть бути використані для розробки комунікаційних стратегій з поширення екологічних інновацій.

Теоретичне значення. Дослідження поглиблює теорію та методику проектного навчання, розкриваючи потенціал інтеграції моделі громадянської науки в шкільну освіту. Робота вперше обґрунтовує необхідність врахування результатів дослідження суспільного сприйняття (Q-методології) при розробці змісту освітніх програм екологічного спрямування.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи. Основні положення та результати роботи були представлені на on-line тренінгу: «Обмін знаннями, отриманими під час проєкту, серед молодих дослідників». Організатор: Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка. Дата проведення: 9 жовтня 2025 р. <https://milclimatech.cz/october-9-2025-virtual-training-2-ternopil-ukraine/>.

Структура та обсяг магістерської роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи - 67 сторінок. Робота містить 3 таблиці та 7 рисунків.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОРГАНІЗАЦІЇ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ УЧНІВ У ГАЛУЗІ ПРИРОДНИЧИХ НАУК

1.1. Взаємозв'язок понять “дослідницька компетентність”, “проектна діяльність” та “STEM-освіта” в сучасному освітньому просторі

Сучасний етап реформування української освіти, зокрема в рамках концепції “Нова українська школа”, ставить за мету перехід від знаннєвої до компетентнісної парадигми навчання. Однією з ключових у цьому процесі є дослідницька компетентність. Провідні українські педагоги [18], визначають її як інтегровану здатність особистості до самостійного пошуку, аналізу, систематизації інформації та генерування нових знань на основі наукових методів. Включає в себе мотиваційний, когнітивний та діяльнісний компоненти. Вона є основою для формування наукового світогляду та критичного мислення [5].

Найбільш ефективним інструментом для формування цієї компетентності є проектна діяльність. Її теоретичні основи, закладені ще Джоном Дьюї, передбачають навчання через дію. Це коли учні занурюються у вирішення реальної, значущої для них проблеми. На відміну від репродуктивних методів, проектна діяльність вимагає від учнів самостійності у плануванні. Також пошук ресурсів, проведення дослідження та презентація результатів. Це робить її ідеальним шляхом до розвитку дослідницьких навичок [40].

STEM-освіта (Science, Technology, Engineering, Mathematics) виступає як інтегративна рамка або освітня філософія. Вона об'єднує проектну діяльність та дослідницьку компетентність. Виникає міждисциплінарний підхід. Згідно з Концепцією розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року, її мета - формування цілісної картини світу та розвиток навичок вирішення комплексних проблем через інтеграцію природничих наук, технологій, інженерії та математики [1]. Отже, дослідницька компетентність є метою, тоді, як проектна діяльність виступає методом, а STEM-освіта - інтегративним контекстом. В

кінцевому плані ми отримуємо синергетичний ефект.

Інтеграція цих трьох компонентів сприяє розвитку цілого спектру навичок. По-перше, це когнітивні навички вищого порядку: критичне мислення, аналіз, синтез, оцінювання інформації та здатність до вирішення проблем [9]. По-друге, це соціальні та особистісні навички (“soft skills”), такі як комунікація, співпраця в команді, лідерство, адаптивність та відповідальність, які є ключовими для успішної кар'єри згідно зі звітами Всесвітнього економічного форуму [13]. Нині перспективним є застосування цієї інтегрованої моделі до реальних екологічних викликів. Зокрема, для дослідження фіторемедіації, яка дозволяє учням бачити прямий вплив науки на вирішення локальних та глобальних проблем людства [8].

Отже, інтегрована модель, що поєднує STEM-підхід, проєктну діяльність та фокус на дослідницькій компетентності, створює педагогічні умови для формування всебічно розвиненої особистості, готової до викликів сучасного світу. Важливу роль у формалізації цієї діяльності відіграє Мала академія наук, що знаходиться в сфері позашкільної освіти [14].

1.2. Роль Малої академії наук у розвитку дослідницького потенціалу учнів старших класів

Мала академія наук України (МАН) є унікальною державною структурою, що вже понад півстоліття виконує функцію головного центру з організації науково-дослідницької діяльності обдарованої учнівської молоді [9]. Діяльність МАН дозволяє перейти від “вивчення науки” до “заняття наукою”. Тут створюється освітнє середовище, максимально наближене до реальної наукової роботи.

Ключовими особливостями організації роботи в системі МАН, що сприяють розвитку дослідницької компетентності, є [9]:

Наукове керівництво або наставництво. Тобто за кожним учнем закріплюється науковий керівник. Це може бути вчитель, викладач ЗВО або науковий співробітник. Їх завдання забезпечувати кваліфікований супровід дослідження.

Доступ до ресурсів. МАН співпрацює з провідними університетами та науково-дослідними інститутами. Це надає учням доступ до сучасних лабораторій та обладнання. Зазвичай, це неможливим в умовах звичайної школи.

Структура формату досліджень. Вимоги до написання та захисту науково-дослідницьких робіт у МАН базуються на академічних стандартах, стандартах написання публікацій тощо. Це привчає учнів до наукової культури, академічної доброчесності та чіткості та аргументованості.

Конкурсний принцип. Щорічний Всеукраїнський конкурс-захист науково-дослідницьких робіт є потужним мотиваційним фактором. Ці конкурси стимулюють учнів до досліджень, презентації своїх результатів.

Отже, виходячи з вищевказаного, запропонована нами, в цій магістерській роботі, методика організації дослідницької діяльності учнів у проєкті з фіторемедіації може в майбутньому слугувати моделлю для підготовки учнівських проєктів для подання на конкурс-захист МАН у секціях “Екологія”, “Охорона довкілля та раціональне природокористування” або “Біологія”.

Слід зазначити, що крім формалізованих структур таких як МАН, у світовій освітній практиці набирають популярності масові формати залучення молоді до науки, зокрема, громадянська наука[16, 17, 39].

1.3. Громадянська наука (Citizen Science) як інноваційний інструмент залучення молоді до реальних досліджень

Концепція громадянської науки (Citizen Science), яка нині активно розвивається, пропонує унікальний інструмент для інтеграції шкільної освіти в реальний науковий процес [17]. Громадянська наука передбачає участь волонтерів та вчених-аматорів у наукових дослідженнях. Як правило вони залучені до збору та аналізу даних. На відміну від шкільних експериментів, які, як правило, є імітаційними, проєкти громадянської науки пропонують учням долучитись до реальних експериментів. Зібрані ними дані можуть бути використані в справжніх наукових публікаціях .

Долучення учнів до проєктів громадянської науки має низку доведених педагогічних переваг [10, 11, 15]:

Підвищення мотивації. Учні усвідомлюють, що їхня робота має певну цінність. Це суттєво підвищує інтерес учнів до предмета та дослідницького процесу.

Розвиток наукової та цифрової грамотності. Учні на практиці засвоюють наукові методи, вчаться працювати з протоколами. Долучені до збору даних за допомогою сучасних цифрових інструментів (смартфонів, сенсорів). Здійснюють аналіз даних на спеціалізованих онлайн-платформах.

Формування екологічної свідомості та громадянської позиції. Більшість проєктів громадянської науки мають екологічне спрямування (моніторинг біорізноманіття, якості повітря, поширення інвазивних видів тощо). Участь учня у такому моніторингу формує в учнів свідоме та відповідальне ставлення до навколишнього середовища.

Тому, ми вважаємо, що саме такий підхід слід використати у нашій роботі. Залучення учнів до міжнародного проєкту з фіторемедіації буде реалізовано через використання платформ PhotosynQ та SurveyStack, які концептуально є класичними інструментами громадянської науки. Тобто ми пропонуємо учням не просто імітувати дослідження, а збирати дані самостійно за допомогою згаданих інструментів. Так, як ці інструменти також використовуватимуть науковці, учні в кінцевому плані зможуть порівнювати свої результати з даними міжнародного проєкту. Це і є основною ідеєю такого підходу і втіленням живого, практико-орієнтованого підходу до навчання.

Отже, теоретичний аналіз показав, що інтеграція дослідницької компетентності, проєктної діяльності та STEM-підходу через залучення учнів до реальних наукових досліджень за моделлю громадянської науки є перспективним та педагогічно обґрунтованим напрямом модернізації сучасної природничої освіти. Це створює міцний теоретичний фундамент для розробки практичної моделі організації дослідницької діяльності учнів [11].

1.4. Q-методологія як інструмент дослідження суспільного сприйняття наукових інновацій

Для успішного впровадження будь-якої наукової інновації, особливо в

такій галузі, як біологія, сільське господарство, недостатньо лише довести її технологічну ефективність. Важливим є розуміння сприйняття цієї інновації суб'єктами господарювання, іншими словами, потенційними її користувачами. Зокрема, фермерами, землевласниками, представниками громад тощо.

Для дослідження цих, доволі суб'єктивних поглядів, упереджень традиційні опитувальників (де респондент просто погоджується чи не погоджується з твердженнями) є недостатньо. Скажімо, вони не надто гнучкі. В цьому контексті унікальним інструментом виступає Q-методологія, розроблена Вільямом Стефенсоном у 1930-х роках. Це змішаний (якісно-кількісний) метод дослідження, що дозволяє науково вивчати суб'єктивність [24]. На відміну від класичних опитувань, де порівнюються люди за певними змінними (R-методологія), Q-методологія “перевертає” аналіз і порівнює різні точки зору.

Процедура Q-дослідження включає наступні етапи [33, 61]:

- Формування «Q-набору». Створення набору тверджень (зазвичай 30-60), які репрезентують увесь спектр думок щодо певної теми.
- Процедура «Q-сортування». Респонденти (невелика, але цільова вибірка) сортують ці твердження за шкалою від “найбільш згоден” до “найбільш не згоден” у формі квазінормального розподілу.
- Кількісний аналіз. Відсортовані дані обробляються за допомогою факторного аналізу. Респондентів зі схожими поглядами групуються у фактори.
- Якісна інтерпретація. Кожен фактор інтерпретується як окрема, цілісна “точка зору”, яка існує в суспільстві щодо досліджуваної проблеми.

У контексті нашої магістерської роботи Q-методологія може бути використана для виявлення та опису ставлення українських аграріїв та землекористувачів до впровадження фітотехнології на основі *Miscanthus* × *giganteus*. Розуміння цих точок зору (“оптимісти-новатори”, “прагматики-скептики”, “еко-активісти” тощо) дозволить не лише прогнозувати як бар'єри,

що виникають на шляху, так і драйвери впровадження технології. В кінцевому результаті, це дозволить адаптувати освітню програму для школярів до реалій та зробити її більш релевантною до дійсності.

1.5. Наукова основа для розробки освітньої моделі: аналіз результатів експериментальних досліджень фітотехнологій

Для розробки ефективної моделі організації дослідницької діяльності учнів необхідно обрати науковий контекст. Останній повинен бути актуальним, науково валідним та доступним для адаптації до шкільних умов. Таким контекстом у нашій роботі виступає міжнародний науковий проєкт НАТО “Наука заради миру та безпеки” (NATO SPS) G6084 “Пом’якшення наслідків зміни клімату за допомогою передових фітотехнологій для військових земель”. Він реалізується на базі Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка .

Сутність проєкту та його наукові цілі полягають у комплексному підході до розв’язання подвійної проблеми. Відновлення земель, забруднених через бойові дії, та активний внесок у глобальну протидію зміні клімату [12].

Наукова основа проєкту базується на принципах циркулярної біоекономіки та охоплює кілька послідовних етапів, які в кінцевому плані утворюють замкнений цикл. Спочатку йде фіторемедіація - очищення ґрунтів від комплексних забруднень, таких як важкі метали та нафтопродукти, за допомогою енергетичної рослини *Miscanthus* × *giganteus*. Далі - валоризація контамінованої біомаси, яка стає вторинним відходом, перетворюючи її на корисні продукти-меліоранти, зокрема біочар, золу та компост. Насамкінець останні, тобто меліоранти повертаються в ґрунт, посилюючи ефективність наступних циклів фіторемедіації. Водночас відбувається підвищення родючості і забезпечується довгострокове депонування вуглецю [3].

Проєкт, окрім наукового, має неабиякий педагогічний потенціал. Зокрема, він є ідеальною платформою для організації дослідницької діяльності учнів. По-перше, його тема тісно пов’язана з наслідками війни та екологічною безпекою України. Це дозволить школярам усвідомити реальний, відчутний вплив своєї

роботи на вирішення проблем країни, місцевої громади. По-друге, повний цикл дослідження, попри потребу в складному обладнанні, його легко адаптувати до шкільних умов. Так, учні можуть самостійно закладати вегетаційні експерименти, готувати компост, візуально оцінювати зразки біочару та золи, а також аналізувати їхній ефект на ріст рослин. Поряд з цим, проєкт здатен мотивувати школярів через низку технології громадянської науки. Робота з портативним флуориметром MultispeQ, завантаження даних на платформу PhotosynQ дає змогу використовувати професійні інструменти та порівнювати результати з глобальною науковою базою. Це ніщо інше, як втілення принципів відкритої науки [4].

Особливий акцент слід зробити на міждисциплінарний характер проєкту, де органічно поєднані різні сфери. Наука його компонента охоплює біологію (фізіологію рослин і мікробіологію ґрунту), хімію (аналіз забруднювачів і властивостей меліорантів) та екологію. Технологічна - включає цифрові платформи для збору даних (PhotosynQ, SurveyStack) і 3D-друк (наприклад, для OpenFlexure Microscope) [35]. Інженерна - передбачає проєктування експериментів і створення простих моделей. Математична - для статистичної обробки даних, побудови графіків і розрахунку концентрацій.

Загалом, міжнародний вимір проєкту, реалізованого під егідою НАТО, додає престижу в очах учнів і вчителів. Перед учнями відкриваються перспективи міжнародної комунікації, обміну результатами між однолітками з інших країн тощо.

Отже, організація дослідницької діяльності учнів старших класів є найбільш ефективною при поєднанні трьох ключових компонентів: STEM-підходу як міждисциплінарної рамки, проєктної діяльності як провідного методу, та фокусу на формуванні дослідницької компетентності як ключової мети освітнього процесу. Інтеграція цих компонентів не лише сприяє засвоєнню знань, а й розвитку цілого ряду навичок, необхідних для успішної реалізації в сучасному світі.

Варто підкреслити, що практика, що ґрунтується на засадах громадянської

науки, виступає інноваційним і водночас доступним інструментом для залучення учнів до реальних досліджень та розвитку їхньої екологічної свідомості [19].

Враховуючи вищесказане, міжнародний проєкт НАТО “Пом’якшення наслідків зміни клімату...” є оптимальною основою для реалізації розробленої моделі. Його актуальність, міждисциплінарний характер та використання сучасних цифрових інструментів, роблять навчальний процес більш захопливим та релевантним для сучасних школярів, водночас сприяючи вирішенню важливих проблем сьогодення.

Варто наголосити, що реалізація даного проєкту передбачає не лише здобуття учнями теоретичних знань, але й розвиток у них практичних дослідницьких навичок, креативності, здатності до критичного мислення та аналізу інформації. Учні навчаться самостійно планувати роботу, вирізняти достовірні наукові дані. Це є надзвичайно важливим, першочерговим для формування відповідального громадянина в сучасному інформаційному світі.

РОЗДІЛ 2.

МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА ОРГАНІЗАЦІЇ ДОСЛІДНИЦЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ УЧНІВ.

У цьому розділі представлено розроблену модель організації дослідницької діяльності учнів старших класів, апробовану на прикладі реального наукового експерименту. На основі цього досвіду розроблено програму відповідного гуртка та методику проведення педагогічного експерименту.

2.1. Педагогічна модель організації дослідницької діяльності учнів «Юний еко-дослідник»

Запропонована модель «Юний еко-дослідник» є цілісною системою педагогічних умов, форм і методів, спрямованих на формування дослідницької компетентності старшокласників через їхнє залучення до реального наукового процесу за принципами громадянської науки, з метою формування в учнів старших класів дослідницької компетентності, поглиблення STEM-знань та розвиток екологічної свідомості через участь в адаптованих етапах міжнародного проєкту з фіторе mediaції.

Принципи, на яких базується модель:

- Принцип автентичності. Діяльність учнів є не навчальною імітацією, а спрощеною, але реальною частиною справжнього наукового дослідження.
- Принцип міждисциплінарності (STEM). Органічна інтеграція знань та навичок з біології, хімії, екології, інформаційних технологій та математики.
- Принцип технологічності. Використання сучасних цифрових інструментів та платформ громадянської науки (PhotosynQ, SurveyStack).
- Принцип проєктного навчання. Організація діяльності учнів у форматі повного проєктного циклу - від ідеї до захисту результатів.

- Принцип співпраці. Організація роботи в малих групах та взаємодія з науковим керівником.

Основними компонентами моделі є:

Мотиваційно-цільовий компонент (створення стійкого інтересу), що забезпечує створення стійкого інтересу до проблеми дослідження через усвідомлення її соціальної значущості (відновлення земель України); визначення особистих освітніх цілей кожного учня.

Практична реалізація дослідницької діяльності, що складається з чотирьох взаємопов'язаних етапів, адаптованих з «дорослого» наукового проєкту - змістовно-процесуальний компонент (практична реалізація дослідницької діяльності), тоді, як рефлексивно-оцінювальний компонент (аналіз учнями власних досягнень), включає аналіз учнями власних досягнень, труднощів та здобутого досвіду; презентація та захист отриманих результатів.

2.2. Змістове наповнення моделі та етапи дослідницької діяльності учнів на основі пілотних наукових досліджень

2.2.1. Кейс №1: Вивчення ефекту «доза-відповідь» на прикладі дослідження золи з біомаси *Miscanthus × giganteus*

Для практичної перевірки та демонстрації ефективності педагогічної моделі «Юний еко-дослідник» потрібно організоване залучення учнів старших класів або студентів молодших курсів до повноцінних наукових досліджень. Важливо є те, що ця діяльність має стати не навчальною імітацією, а реальним науковим процесом, за результатами якого може бути підготовлено та опубліковано матеріали, де залучені здобувачі освіти можуть виступити співавторами. Це може стати прямим доказом результативності запропонованого підходу, що відповідає принципам проєктного навчання та громадянської науки.

Цей кейс ставить за мету продемонструвати, як на основі реального наукового дослідження, буде апробовано педагогічну модель «Юний еко-дослідник». Відтак даний підрозділ має подвійну мету: по-перше, представити наукову основу (проблематику, дизайн та результати експерименту), яка є

фундаментом для освітньої діяльності; по-друге, показати, як цей науковий процес буде методично адаптований для залучення учнів та формування їхньої дослідницької компетентності.

2.2.1.1. Наукова основа: проблематика, дизайн та результати дослідження

Науковий контекст дослідження

Перехід до відновлюваних джерел енергії як стійкої та економічно ефективної альтернативи викопному паливу посилив використання біомаси для виробництва енергії. Унаслідок цього глобальне виробництво золи з біомаси (ВА) сягнуло близько 170 мільйонів тонн щорічно, з прогнозами зростання до 1000 мільйонів тонн на рік [25]. Цей значний обсяг ВА вимагає ефективних стратегій управління для вирішення екологічних проблем, таких як забруднення слідами елементів (TEs), підкислення ґрунту та забруднення води, водночас максимізуючи його потенціал у стійкому землеробстві [57]. Стратегії управління ВА включають його використання як ґрунтової добавки, інтеграцію в будівельні матеріали та вилучення цінних поживних речовин і елементів [20]. Інтеграція управління ВА в циркулярну економіку пропонує перспективний підхід для покращення ефективності ресурсів, скорочення відходів та просування стійкості [22].

Зола з біомаси демонструє значний потенціал для покращення стану ґрунту шляхом постачання суттєвих поживних речовин та покращення хімічних властивостей ґрунту. Зокрема, це багате джерело калію (K), кальцію (Ca) та фосфору (P), які є критичними для росту рослин [45]. При внесенні в ґрунт ВА підвищує рН завдяки вмісту лужних оксидів і карбонатів, які нейтралізують кислотність ґрунту. Ця корекція рН покращує розчинність і доступність поживних речовин, особливо P та певних мікроелементів. Крім того, ВА покращує буферну ємність ґрунту та стимулює мікробну активність, надаючи суттєві мінерали та створюючи сприятливіше середовище. Ці комбіновані ефекти сприяють покращенню розвитку коренів і загального стану рослин [23]. Крім того, ВА зменшує вимивання поживних речовин, покращуючи структуру

ґрунту та ємність обміну катіонами, стабілізує органічну речовину (ОР) через покращену агрегацію та сприяє збільшенню мікробної чисельності, регулюючи рН і постачаючи поживні речовини, відтак покращуючи загальну родючість ґрунту [29]. Воно також впливає на кругообіг поживних речовин і посилює стійкість рослин до абіотичного стресу, зменшуючи залежність від хімічних добрив і пом'якшуючи екологічні стреси [58]. Однак надмірне внесення ВА може порушити хімічний баланс ґрунту та призвести до дисбалансу поживних речовин [54]. Окрім агрономічної цінності, практичне значення використання ВА з забрудненої біомаси полягає в його значній і відновлюваній доступності. Наприклад, у північній Франції *Miscanthus* × *giganteus* вирощується на значних площах, забруднених ТEs, як частина регіональної стратегії фітоуправління [21]. Оцінки вказують, що до 20 000 тонн біомаси *M*×*g* збирається щорічно з цих забруднених ділянок [48], генеруючи приблизно 200–400 тонн попелу через спалювання.

Zea mays L. є важливим злаком і широко використовуваною тестовою культурою для досліджень родючості ґрунту та абіотичного стресу. Його швидкий ріст, відносно високі вимоги до поживних речовин та добре документовані фізіологічні та агрономічні реакції роблять *Z. mays* високо чутливим до змін у постачанні поживних речовин і доступності ТEs, що відображається в вимірюваних фізіологічних індикаторах, таких як змінений ріст, вміст хлорофілу та антиоксидантна активність. Зокрема, *Z. mays* чутливо реагує на властивості ґрунту, які типово змінюються ВА, рН, електропровідність, доступність основних катіонів і мікроелементів, роблячи його відповідною тестовою культурою для оцінки добривного потенціалу та можливих ризиків ВА в ґрунтах, уражених ТEs [27].

Попередні дослідження показали, що помірні добавки ВА можуть покращити ріст *Z. mays* і поглинання поживних речовин через вапнувальний ефект та як джерело поживних речовин [53]. Однак надмірні дози ВА можуть надмірно залужнити ґрунти та викликати дисбаланс поживних речовин, що обмежує розвиток коренів і пагонів. Тому *Zea mays* є корисним видом для оцінки

оптимізації дозування та балансування агрономічних переваг проти накопичення TEs та інших ризиків, пов'язаних із внесенням ВА.

Інтеграція ВА в стратегії управління ґрунтом узгоджується з принципами циркулярної економіки, наголошуючи на ефективності ресурсів і екологічній стійкості [56]. У цьому контексті дане дослідження вивчало потенціал ВА, отриманого з біомаси $M \times g$, забрудненої TEs, як стійкої ґрунтової добавки. Зокрема, воно досліджувало ефекти ВА з $M \times g$ на властивості ґрунту, ріст рослин і перерозподіл поживних речовин. Ключові параметри, що аналізувалися, включали рН ґрунту, електропровідність (ЕС), доступність поживних речовин та їхній вплив на біопараметри, фізіологічні характеристики та поглинання поживних речовин рослинами *Z. mays*. Це дослідження також оцінювало перерозподіл макро- та мікроелементів (наприклад, Si, K, Mg, P, Zn і Cu) у ґрунті та тканинах рослин, потенційний ризик, пов'язаний із накопиченням TEs, та буферну ємність ВА у пом'якшенні кислотності ґрунту. Припускалось, що низькі-помірні норми внесення ВА покращать родючість ґрунту та продуктивність рослин шляхом покращення доступності поживних речовин і умов ґрунту, тоді як вищі дози можуть призвести до фізіологічного стресу та дисбалансу поживних речовин. Очікувалось, що внесення ВА змінить розподіл ключових поживних речовин і TEs у ґрунті та тканинах рослин. Крім того, це дослідження розширює рамки використання ВА як багатофункціональної ґрунтової добавки та пропагує її інтеграцію в стратегії відновлення ресурсів.

Дизайн наукового дослідження

Ґрунт, використаний для досліджень, було відібрано з дослідного поля Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка, Україна (GPS-координати: 49.5418397° пн. ш., 25.568175° сх. д.), відповідно до стандарту ДСТУ 4287:2004 (2005), як описано [38]. Зразки ґрунту відбирали з глибини 0–30 см для забезпечення однорідності. Ґрунт висушували на повітрі до постійної маси, просівали через сито з осередками 2 мм і зберігали до подальшого аналізу. Згідно з класифікаційною системою ґрунтів FAO [60], ґрунт було ідентифіковано як чорнозем.

Золу з біомаси (ВА) отримано з електростанції поблизу Лілля, Франція, де біомаса *Miscanthus* × *giganteus* використовується як відновлюване паливо. Ґрунт забруднений кадмієм (Cd), свинцем (Pb) і цинком (Zn), а також марганцем (Mn), хромом (Cr), міддю (Cu) та стронцієм (Sr) у концентраціях, що в 20–50 разів перевищують регіональний фон. З огляду на складність цього великомасштабного забрудненого об'єкта (забруднення ґрунту, екологічні ризики, вплив на здоров'я людини), було запропоновано фітоменеджмент з використанням *M×g* як економічно ефективну стратегію ремедіації. Цей підхід дозволяє поєднати стабілізацію ґрунту з валоризацією отриманої біомаси. *M×g* вважається придатним для енергетичного використання завдяки високій урожайності біомаси та сприятливим властивостям горіння; його здатність утримувати ТЕ в коренях при обмеженій транслокації до пагонів знижує ризик забруднення зібраної біомаси [48].



Рис. 2.1. Підготовчий етап експерименту.

Вплив внесення ВА оцінювали з використанням *Zea mays* як тестової рослини. ВА рівномірно змішували з ґрунтом за допомогою верхнього шейкера протягом 10–15 хв на партію для забезпечення однорідного розподілу та

запобігання сегрегації частинок (табл. 1). Кожну партію візуально перевіряли на відсутність грудок ВА та однорідність кольору; однорідність додатково підтверджували вимірюванням рН та електропровідності (ЕС) у трьох випадкових підзразках. Для кожного варіанту 800 г суміші ґрунт–зола поміщали в горщики, зволоження регулювали до 60 % повної вологості ґрунту.

Дослідження проводили в теплиці за контрольованих умов: Температура: 24–26 °С. Освітлення: 450 мкмоль фотонів $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ (GrowBoard 3.0, 100 Вт Samsung LM281B+). Фотоперіод: 14 год

У кожен горщик висівали (рис. 2.1) три насінини на глибину 2 см; схожість відстежували протягом 10 днів, після чого залишали одну сіянку. Кожен варіант включав чотири біологічні повторності ($n = 4$), кожна з яких складалася з одного горщика з однією рослиною, що вважалася незалежною експериментальною одиницею. Вибір $n = 4$ відповідає стандартній практиці у вегетаційних дослідженнях та підтверджений попередніми роботами з ВА та іншими ґрунтовими поправками, що демонструють достатню статистичну потужність для виявлення ефектів обробки.

Агрохімічні властивості ґрунту оцінювали на 0-й день (до посіву) та 48-й день (збирання врожаю). Під час кожного відбору зразків з кожного горщика вилучали 70–75 г ґрунту та замінювали відповідною сумішшю ґрунт–зола для підтримання постійної маси горщика. Усі вимірювання проводили в технічних повторностях, які усереднювали перед статистичним аналізом (не вважали незалежними спостереженнями), що дозволяло зменшити інструментальну похибку та забезпечити високу точність.

Така експериментальна схема (рис. 2.2) дозволила комплексно оцінити динамічну взаємодію між ґрунтом, поправками ВА та реакціями рослин за контрольованих умов. Варіанти систематично класифіковано за початковими/кінцевими умовами дослідження та наявністю/відсутністю рослинності.

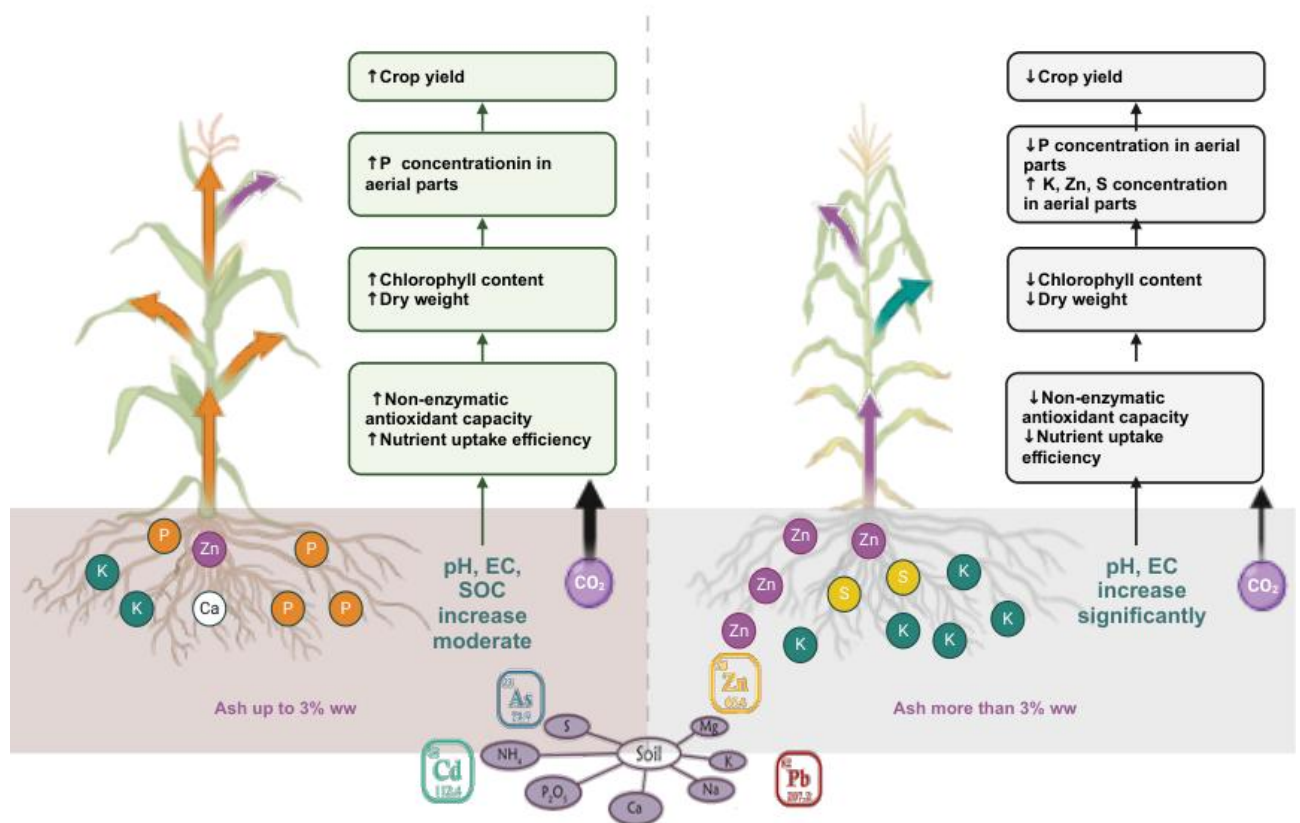


Рис. 2.2. Експериментальна схема дослідження [34]

Отримані наукові результати та їх обговорення

Внесення ВА, отриманої з $M \times g$, вирощеного на забруднених ділянках, вплинуло на властивості ґрунту, динаміку поживних речовин та фізіологію рослин, причому результати варіювалися залежно від дози внесення. При низьких рівнях (1-3%) ВА ефективно покращувала рН та ЕС ґрунту, демонструючи свій потенціал як вапнувального агента та джерела основних поживних речовин (рис. 2.3). Підвищене накопичення органічного вуглецю при нижчих дозах ВА вказувало на покращення росту рослин та кругообігу поживних речовин. Однак вищі дози (5–7%) негативно впливали на мінералізацію вуглецю в ґрунті та загальний стан ґрунту, створюючи потенційні ризики при застосуванні ВА (рис. 2.3).

У тканинах *Z. mays*, коли рослини вирощувалися на ґрунтах, збагачених ВА, ключові поживні речовини, такі як K, Si, S та Zn, були значно збагачені, особливо при вищих дозах, підтримуючи фізіологічні функції в оптимальних

умовах.

збільшенням доз ВА, що підкреслює дисбаланс поживних речовин та знижену біодоступність в умовах стресу. Низькі дози ВА покращували фізіологічні реакції рослин *Z. mays*, включаючи синтез хлорофілу та антиоксидантну активність, що вказує на адаптивну реакцію на зміни, індуковані ВА. Навпаки, вищі дози ВА (5–7%) порушували розвиток коренів та стебел і знижували ефективність поглинання поживних речовин, що свідчить про фізіологічні обмеження, викликані стресом.

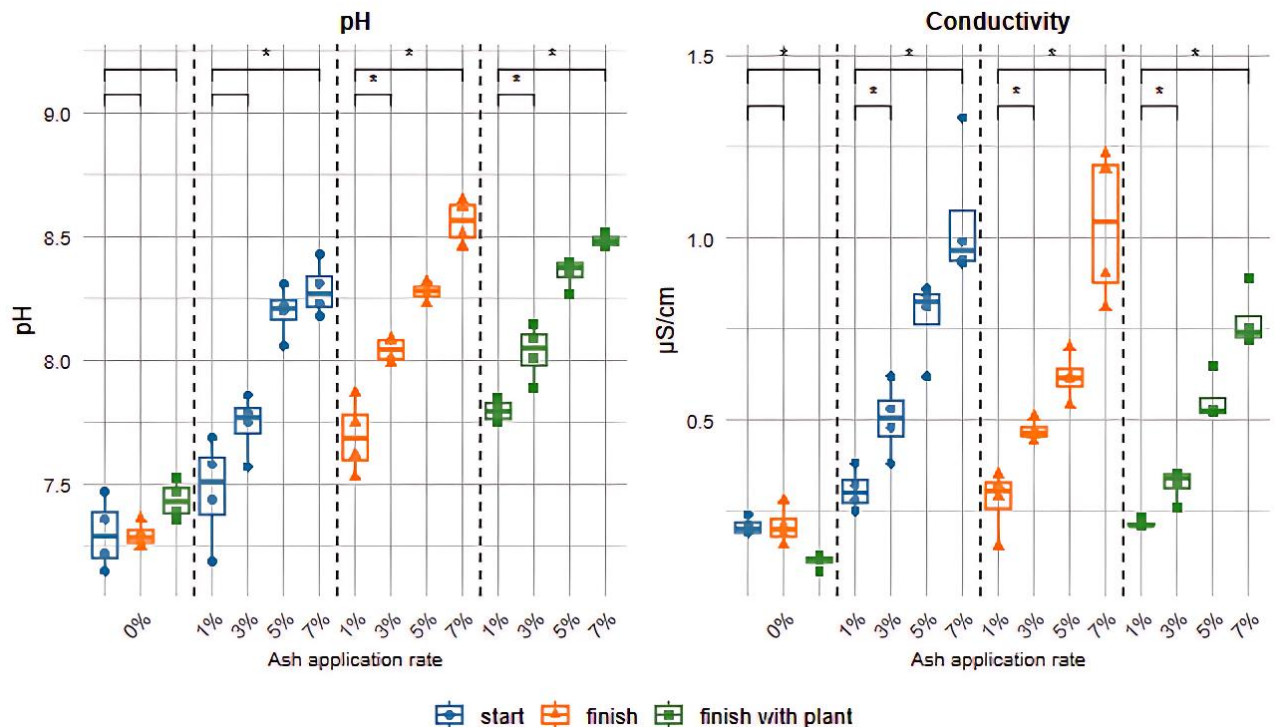


Рис. 2.3. Зміни рН ґрунту та електропровідності у контрольному ґрунті та ґрунті з додаванням $M \times g$ ВА за відсутності або присутності *Z. mays* (start – початок експерименту; finish – завершення експерименту (ґрунт без рослин); finish with plant - завершення експерименту (ґрунт з рослинами)) [34]

Результати цього дослідження підкреслюють потенціал ВА, отриманої з $M \times g$, як стійкої ґрунтової поправки для підвищення родючості ґрунту та підтримки росту рослин за умов ретельного управління. На основі спостережуваних дозозалежних реакцій було рекомендовано застосування золи

$M \times g$ у нормах від 1 до 3% (мас./мас.), що забезпечувало агрономічні переваги, не викликаючи фізіологічного стресу. Ця рекомендація є особливо актуальною для слабокислих ґрунтів, таких як ґрунт (рН 6.6), що використовувався в цьому дослідженні, де потрібна нейтралізація рН та збагачення поживними речовинами. Крім того, хоча виміряні рівні Zn та Cu залишалися нижчими за загальноприйняті фітотоксичні пороги, їхнє збагачення вказує на незначне забруднення. Вищі дози або довготривале повторне використання можуть поступово збільшити накопичення ТЕ у ґрунті та їх біодоступні фракції; тому необхідний регулярний моніторинг ґрунтів та тканин рослин.

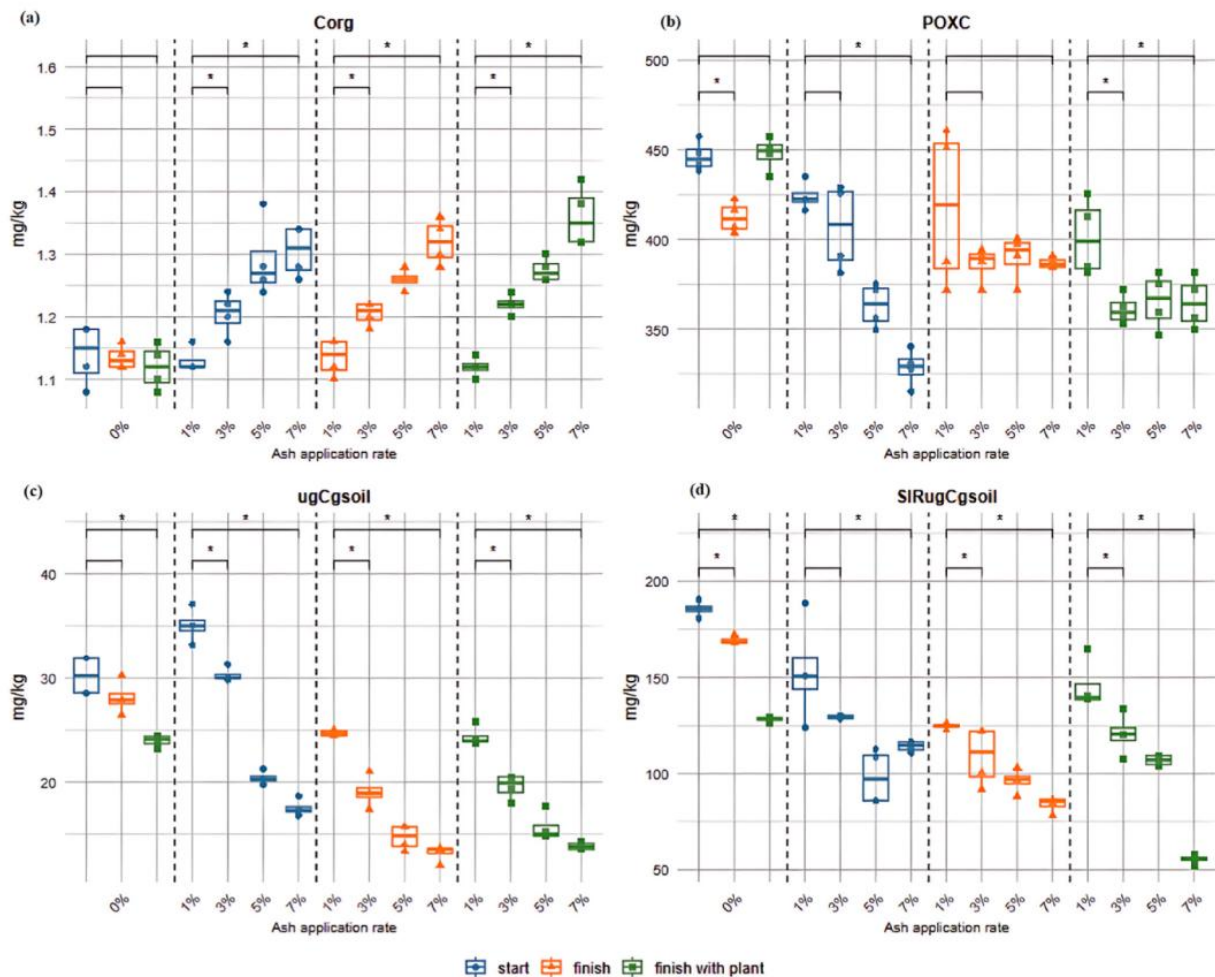


Рис. 2.4. Зміни вмісту вуглецю в ґрунті (мг/кг) під час внесення $M \times g$ ВА в різних дозах за відсутності або присутності *Z. mays*: а) органічний вуглець (Corg); б) перманганат-окислюваний вуглець (POXC); в) мінералізація вуглецю (ugC); д) субстратно-індуковане дихання (SIR). (start – початок експерименту; finish –

завершення експерименту (ґрунт без рослин); finish with plant - завершення експерименту (ґрунт з рослинам)) [34]

Крім того, результати також показують, що лише ВА не може забезпечити достатню кількість азоту для підтримки росту рослин; тому її застосування слід доповнювати відповідними співпоправками, які забезпечують азот для підтримки збалансованого живлення та уникнення обмежень росту (рис. 2.5).

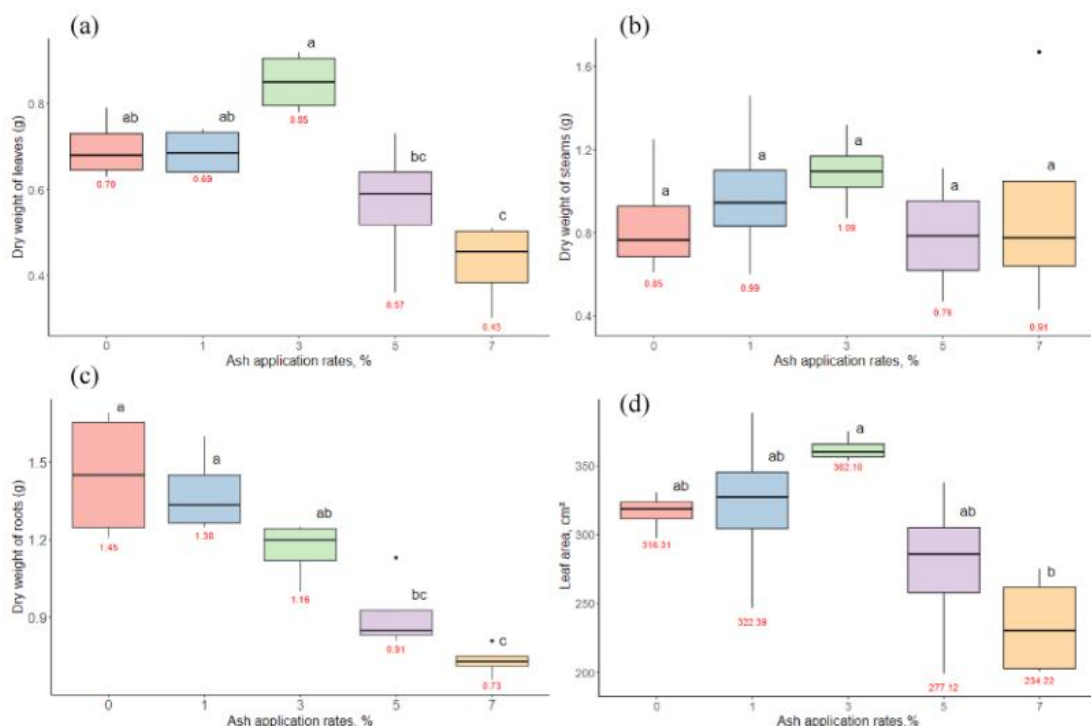


Рис. 2.5. Зміни морфометричних параметрів *Z. mays* (у г) у ґрунтах, оброблених різними дозами $M \times g$ ВА: а) DW weight of leaves - суха маса листя; б) DW weight of leaves - суха маса stems; та в) DW weight of roots - суха маса коренів [34]

Ці результати також підкреслили, що внесення ВА має бути адаптоване до конкретних типів ґрунтів та систем вирощування, оскільки варіації в умовах вирощування можуть впливати на динаміку поживних речовин, реакції рослин та потенційні ризики. Перед застосуванням у польових умовах тестування

обраної ВА в контрольованих умовах є необхідним для оцінки її впливу на властивості ґрунту, розвиток рослин та баланс поживних речовин. Для підвищення ефективності та зменшення потенційних небезпек необхідно заздалегідь визначати точні норми внесення ВА для оптимізації збагачення поживними речовинами, пом'якшення негативного впливу на навколишнє середовище та підтримки функціональності рослин.

Майбутні дослідження повинні зосередитися на довгострокових наслідках застосування золи $M \times g$, включаючи кумулятивні ефекти на хімію ґрунту та продуктивність рослин. Такі дослідження будуть необхідні для розробки комплексних рекомендацій щодо сталого використання ВА у сільськогосподарській практиці.

2.2.1.2. Педагогічна імплементация: адаптація наукового дослідження для роботи з учнями

На основі вищеописаного наукового дослідження було розроблено та реалізовано програму залучення учнів до дослідницької діяльності.

1. Адаптація мети та завдань для учнів:

Наукова проблема була трансформована у зрозуміле для учнів дослідницьке питання: «Чи може зола, що є відходом, стати корисним добривом, і як знайти її безпечну кількість?». Метою для учнів стало експериментально визначити «золоту середину» - оптимальну дозу золи, яка дає користь, але ще не шкодить.

2. Організація діяльності учнів на етапах експерименту:

Учні були безпосередньо залучені до етапів, що відтворювали логіку «дорослого» дослідження, але були адаптовані до шкільних умов:

Підготовчий етап: Учні брали участь у підготовці ґрунтосумішей (просіювання, змішування з дозами золи від 1% до 7%), що дозволило їм на практиці засвоїти поняття «концентрація», «дослідна партія» та «контроль».

Вегетаційний етап: Учні самостійно висаджували насіння кукурудзи, вели

журнал спостережень та забезпечували стандартизований догляд за рослинами.

Етап збору даних: Учні опановували роботу з інструментами громадянської науки, проводячи неруйнівний моніторинг: вимірювали вміст хлорофілу (SPAD) приладом MultispeQ [41] та площу листя за допомогою додатку Petiole Pro. Також вони вчилися готувати ґрунтові витяжки для вимірювання pH та ЕС.

Заключний етап: Після 48 днів експерименту учні брали участь у зборі врожаю та проведенні морфометричного аналізу (зважування сирої та сухої біомаси коренів, стебел та листя).

3. Аналіз та інтерпретація результатів учнями:

На цьому етапі учні, працюючи з власними даними та результатами лабораторних аналізів, розвивали аналітичні навички.

Візуалізація та первинний аналіз: Учні будували графіки (аналогічні Рис. 2.3 та Рис. 2.5), що дозволило їм самостійно «відкрити» та сформулювати ключовий висновок про подвійний ефект золи та концепцію «доза-ефект».

Формулювання гіпотез: Обговорення повних результатів (наприклад, даних про іонний антагонізм) стимулювало учнів висувати власні гіпотези для пояснення спостережуваних явищ (напр., «Чому при великій кількості золи рослини ростуть гірше, хоча в ній багато поживних речовин?»).

Отже, залучення учнів та студентів до всіх етапів дослідження забезпечило їхній вагомий внесок у збір та первинну обробку даних, що стане підставою для включення їх до співавторів майбутньої статті, та стане прямим доказом ефективності запропонованої педагогічної моделі.

2.2.2. Кейс №2: Ускладнення дослідницьких завдань на прикладі порівняльного аналізу різних типів біочару

Після успішної апробації моделі на прикладі дослідження золи, наступним кроком може стати залучення учнів до більш складного, порівняльного експерименту. Його мета - не просто дослідити ефект однієї речовини, а порівняти дві та зробити обґрунтований вибір.

2.2.2.1. Наукова основа: проблематика, дизайн та результати дослідження.

Науковий контекст дослідження

Відповідно до принципів як циркулярної економіки, так і стійкого землеробства, застосування органічних ґрунтових добавок, включаючи біовугілля, може закрити цикл споживання поживних речовин (наприклад, азоту, фосфору та вуглецю) [50]. Водночас внесення добавок до ґрунту покращує ріст рослин [42] та посилює родючість ґрунту [31]. Біовугілля отримується шляхом піролізу за відсутності кисню [46] з різних сировинних матеріалів при широкому діапазоні температур (300–700 °C) [43]. Склад і властивості біовугілля залежать від прекурсора (сировинного матеріалу) та умов піролізу [49]. Зокрема, біовугілля, вироблене при вищих температурах піролізу (> 500 °C), має більшу поверхневу площу, рН, пористість та вміст золи порівняно з тим, що вироблене при нижчих температурах піролізу (< 500 °C) [44].

Існує значний інтерес до використання біовугілля як засобу для секвестрації С у ґрунтах з метою компенсації антропогенних викидів вуглекислого газу (CO₂). Перетворюючи відходи біомаси на біовугілля, можна реалізувати довгостроковий резервуар атмосферного CO₂ [50], що сприяє виробництву енергії з нульовим вуглецевим слідом [55]. Окрім потенціалу секвестрації вуглецю, біовугілля продемонструвало агрономічні переваги та може змінювати динаміку азоту (N) у ґрунтах [28]. Загалом, додавання різних видів біовугілля пригнічує вивільнення N₂O, за винятком біовугілля, збагаченого високим вмістом азоту компостом [18]. У деяких роботах спостерігали значно більші викиди N₂O за наявності біовугілля з дуба (*Quercus* spp.), тоді як потік CH₄ залишався незмінним у польовому дослідженні тривалістю 4 місяці. Внесення біовугілля з тріски сосни (*Pinus* spp.) на пасовище, збагачене гноєм молочної худоби, не призвело до значних змін у викидах N₂O чи CH₄ у дослідженні тривалістю один рік [47].

Кількість досліджень, що повідомляють про властивості та сільськогосподарське використання біовугілля, виробленого з різноманітних

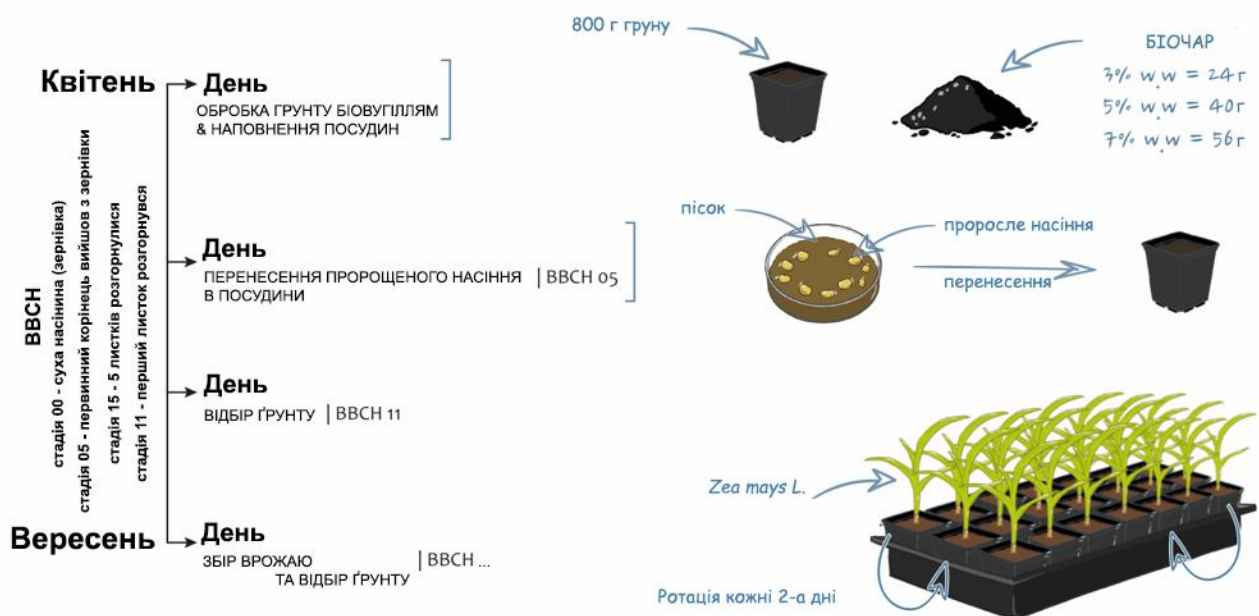
сировинних матеріалів за різних умов піролізу, зростає. Ці дослідження тестували біовугілля в лабораторних експериментах. Значно менше даних доступно щодо комплексної характеристики комерційно виробленого біовугілля для використання в польових умовах [37]. Кілька попередніх результатів підтвердили складний вплив біовугілля на властивості та процеси, пов'язані з ґрунтом, і підкреслили необхідність обстеження перед масштабними застосуваннями [26]. Джерело [38] також довело, що збільшення дози біовугілля не обов'язково покращує параметри рослин і врожайність, що ілюструє складність впливу біовугілля. Крім того, обмеження застосування біовугілля не обмежуються вищезазначеними факторами. Основною проблемою, пов'язаною з використанням біовугілля як ґрунтової добавки, є потенційне вивільнення токсичних речовин у навколишнє середовище, тобто вторинне забруднення. Повідомлялося, що біовугілля, вироблене при температурах вище 500 °C, може містити вищі концентрації забруднювачів, таких як поліциклічні ароматичні вуглеводні (PAHs) та потенційно токсичні елементи (PTEs), порівняно з тим, що вироблене при нижчих температурах [30]. Однак ця проблема переважно актуальна при внесенні біовугілля до сільськогосподарських ґрунтів. Іншим обмеженням є економічна доцільність внесення біовугілля у вищих нормах на польовому масштабі, що значною мірою залежить від методу внесення. Тим не менш, трирічне польове дослідження, що оцінювало різні ґрунтові добавки в фітотехнології *Miscanthus* × *giganteus* на маргінальних землях, продемонструвало економічну життєздатність вищих норм внесення біовугілля [32], підтримуючи обґрунтованість тестування норм внесення до 10% за контрольованих умов. Додатково, необхідність періодичного повторного внесення через обмежену тривалість іммобілізаційної ємності біовугілля також може вважатися обмеженням [59].

Біовугілля можна характеризувати за стандартними параметрами (близький і елементний аналіз), тобто поверхнева площа, об'єм пор, вміст елементів (C, H, N, S і O) та загальне співвідношення елементів. Однак, коли біовугілля застосовується для ревіталізації ґрунту, потрібна додаткова

характеристика, включаючи вплив біовугілля на параметри ґрунту, процеси росту рослин та параметри стресу рослин.

Метою цього дослідження було оцінити властивості комерційних біовугілля, доступних на ринку, тобто Ideale (IDL) та Intermarcom (INT), з точки зору впливу на параметри ґрунту та процеси росту рослин. *Zea mays* L. було обрано як тестову культуру. Ми припускали, що комплексна оцінка двох промислових біовугілля дозволить обрати відповідний матеріал для польового тестування на масштабі передової фітоехнології $M \times g$, застосовуваної до забруднених пост-мілітарних ґрунтів [30], включаючи відновлення забруднених/пошкоджених післявоєнних територій України [51].

Дизайн наукового дослідження



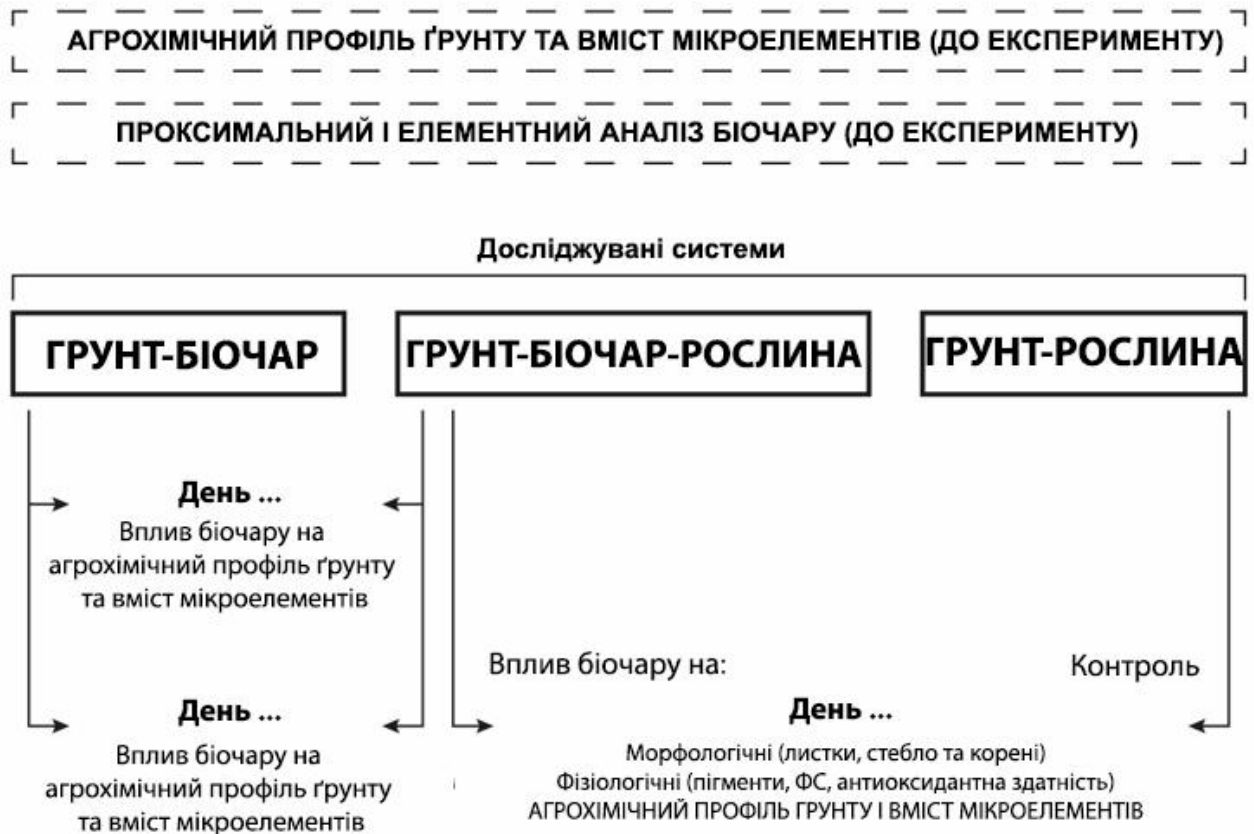


Рис. 2.6. Лабораторний підхід до оцінки придатності біовугілля для покращення властивостей ґрунту [52].

Спочатку (рис 2.6) визначену кількість біочару (біовугілля) ретельно змішували з ґрунтом у горщику за допомогою шейкера для забезпечення повного та рівномірного змішування компонентів ґрунту; для досліджуваних експериментальних варіантів (рис. 1) маса суміші в кожному горщику становила 800 г. Суміш ґрунту та біовугілля зберігали протягом 12 діб у тепличних умовах за сталої температури +25 °C.

Як тестову рослину обрано *Zea mays* L.; зокрема, використано гібрид *Zea mays* L. ssp. *saccharata* Sturt., сорт Spirit F1 (Poaceae), вироблений компанією Syngenta (www.syngenta.com; Базель, Швейцарія).

Z. mays має багато спільного з *M×g* — культурою, ефективною у фітотремедіації забруднених поствійськових ґрунтів, тому її було обрано для тестування біочару.

Насіння *Zea mays* спочатку пророщували в піску; проросле насіння (з

одним корінцем, що з'явився переносили в горщики на 12-ту добу. Період інкубації 12 діб обрано для аналізу ґрунту, щоб зафіксувати швидкі зміни властивостей ґрунту після внесення біочару.

Як показано Jeffery et al. [36], значні зміни, зокрема рівнів вуглецю та азоту, можуть відбуватися негайно після внесення або протягом перших діб.

На 19-ту добу у горщиках з'явилися сходи (ВВСН 11). Того дня в кожному горщику залишали одну рослину для подальшого моніторингу, який тривав до завершення експерименту на 63-тю добу. Експеримент проводили у трьох повторностях.

Загалом експеримент охоплював чотири системи, призначені для оцінки індивідуальних та комбінованих ефектів біочару та наявності рослин на властивості ґрунту. Експериментальний дизайн включав такі варіанти (рис. 1.1):

- Контроль без рослин (лише ґрунт): для оцінки природних змін властивостей ґрунту без впливу біочару чи рослин.
- Біочар без рослин (ґрунт-біочар): дозволяв оцінити вплив самого біочару на властивості ґрунту (зміни рН, адсорбцію поживних речовин, інші фізико-хімічні характеристики).
- Рослини без біочару (ґрунт-рослина): для оцінки впливу *Z. mays* на ґрунт за відсутності золи.
- Біочар з рослиною (ґрунт-біочар-рослина): комбінація обох факторів для вивчення їхньої взаємодії на ґрунтове середовище.

Горщики з рослинами переміщували кожні 2 доби у межах експериментального масиву — як у рядах, так і між рядами для мінімізації позиційних ефектів. Подальший догляд за рослинами включав: контроль температури в приміщенні (24–26 °C), вентиляцію, штучне освітлення 450 мкмоль фотонів $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (GrowBoard 3.0, 100 Вт Samsung LM281B+) протягом 14-годинного світлового дня, полив для підтримання вологості на рівні 60 %.

На 0, 12, 19 та 63-тю добу після змішування ґрунту та біочару з кожного горщика відбирали 70–75 г ґрунту для агрохімічного моніторингу. Відібраний

грунт замінювали такою ж кількістю (70–75 г) змішаної суміші ґрунту та біочару, щоб підтримувати масу суміші на рівні 800 г. Замінний ґрунт брали з набору ідентичних резервних горщиків, підготовлених одночасно з експериментальними та підданих тим самим умовам обробки на кожному етапі. Ці резервні горщики містили таку ж композицію ґрунт–біочар, були засаджені *Z. mays* того ж сорту і вирощувалися в ідентичних умовах (температура, освітлення, зрошення). Такий підхід забезпечував максимальну схожість поживного складу замінного ґрунту з експериментальними горщиками, враховуючи споживання поживних речовин рослинами та підтримуючи консистентність між варіантами.

Отримані наукові результати та їх обговорення

Перед польовим експериментом було проведено комплексну оцінку двох доступних видів біовугілля (з відходів біомаси — IDL; з деревних відходів — INT).

Показники включали наступне: вплив сорту та дози (3, 5 та 7%) на параметри ґрунту (рН, ТОС, P_2O_5 , NO_3^- , NH_4^+ , К, Са, електропровідність та РОХС) та рослинність *Zea mays* L. (площа листя, урожайність біомаси, хлорофіл та антиоксидантна здатність).

IDL показав кращі властивості, ніж INT, і оптимальні параметри вегетації спостерігалися для 3% доз IDL. Вищі дози не покращили властивості ґрунту та розвиток рослин. Внесення INT пригнічувало вегетацію, що пояснюється адсорбцією ґрунтового азоту.

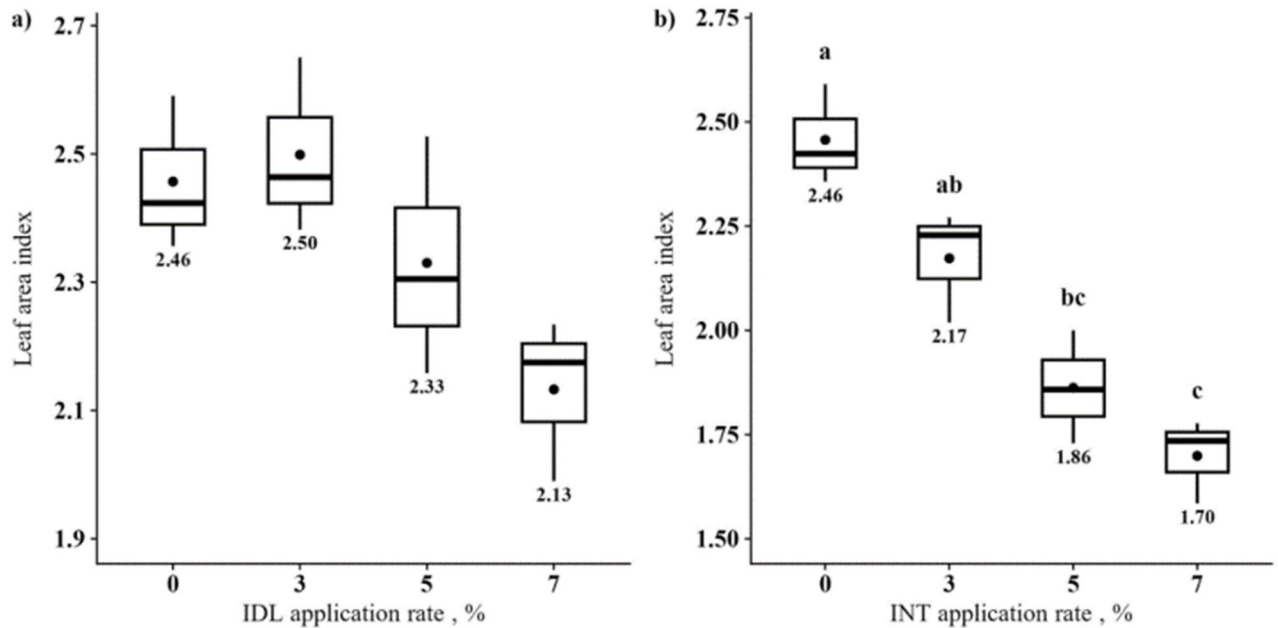


Рис. 2.7. Вплив досліджуваного біовугілля на індекс листкової поверхні (leaf area index, LAI) *Z. mays*: a IDL; b INT [52].

Хоча результати ґрунтуються на короткостроковому експерименті (63 дні), проведеному в умовах горщика, які за своєю суттю обмежують розвиток коренів та потенційне вимивання поживних речовин, результати дозволили вибрати відповідне біовугілля для майбутнього польового експерименту, зосередженого на застосуванні біовугілля за передовою фітотехнологією *Miscanthus* × *giganteus*, спрямованою на відновлення забруднених та пошкоджених післявоєнних територій в Україні.

2.2.2.2. Педагогічна імплементация: адаптація наукового дослідження для роботи з учнями

На основі вищеописаного наукового дослідження було організовано другий, більш складний етап дослідницької діяльності учнів, спрямований на розвиток навичок порівняльного аналізу та формулювання обґрунтованих гіпотез.

1. Адаптація мети та завдань для учнів:

Наукова проблема була трансформована у чітке дослідницьке питання:

«Ми знаємо, що ґрунтові добавки можуть бути корисними. Але чи всі вони діють однаково? Чи впливає сировина, з якої зроблений біочар, на його ефективність?»

Мета дослідження, сформульована для учнів: Порівняти два різні типи біочару — IDL (з відходів біомаси) та INT (з деревини) — і експериментально визначити, який з них і в якій дозі є кращим для росту кукурудзи (*Zea mays*).

2. Організація діяльності учнів на етапах експерименту:

Діяльність учнів на цьому етапі була ускладнена, що вимагало від них більшої уважності та аналітичних здібностей.

Планування та закладка експерименту: На відміну від першого кейсу, учні тепер закладали не одну, а дві паралельні серії дослідів: одну з біочаром IDL, іншу — з INT. Кожна серія включала дози 3%, 5%, 7% та контроль. Це дозволило їм на практиці опанувати методику порівняльного експерименту та зрозуміти важливість ідентичних умов для всіх дослідних груп.

Збір даних. Учні продовжували використовувати освоєний інструментарій (MultispeQ, Petiole Pro, портативні рН-метри), але тепер проводили паралельні вимірювання для обох серій. Це вимагало від них кращої організації роботи, чіткого маркування зразків та ведення більш складного журналу спостережень.

3. Аналіз та інтерпретація результатів учнями:

Цей етап став кульмінацією для розвитку їхнього критичного мислення. Для візуалізації та порівняння, учні побудували два паралельні набори графіків (аналогічні рис. 2.7), що дозволило їм зробити головне відкриття: «Не всі біочари однакові!». Вони наочно побачили, що біочар IDL суттєво стимулював ріст, тоді як INT його пригнічував.

Найважливішим етапом стало обговорення питання «Чому так сталося?», тобто, пошук причинно-наслідкових зв'язків.

Під керівництвом наставника учні проаналізували дані про вміст азоту в ґрунті. Вони помітили, що в ґрунті з біочаром INT концентрація нітратів була значно нижчою. Це дозволило їм сформулювати власну, науково обґрунтовану

гіпотезу: «Біочар INT, ймовірно, «вбирає» в себе (адсорбує) нітрати, роблячи їх недоступними для рослин, що й призводить до «азотного голодування» та уповільнення росту».

На основі свого відкриття учні змогли сформулювати важливий практичний висновок: «Перед використанням будь-якого біочару необхідно провести попереднє тестування, оскільки його ефект сильно залежить від походження».

Активна участь учнів у плануванні та проведенні складного порівняльного експерименту, а також їхній внесок в аналіз даних та формулювання гіпотез. Цей кейс продемонстрував, що розроблена педагогічна модель дозволяє не лише знайомити учнів з наукою, а й успішно залучати їх до досліджень вищого рівня складності, розвиваючи їхні аналітичні та евристичні навички.

2.3. Програма гуртка «Прикладна екологія: від дослідження до дії»

На основі досвіду, отриманого під час апробації моделі, розроблено програму факультативу, що відтворює логіку проведеного пілотного дослідження.

Цільова аудиторія: учні 10-11 класів.

Обсяг програми: 35 годин (1 година на тиждень протягом навчального року).

Мета програми: Сформувати в учнів практичні навички проведення екологічного дослідження на прикладі вивчення методів фіторемедіації.

Тематичний план програми:

Модуль 1. Вступ до прикладної науки (4 години)

Тема 1: Глобальні екологічні виклики та роль науки. Зміна клімату та деградація земель в Україні.

Тема 2: Що таке фіторемедіація? Огляд міжнародного проєкту НАТО.

Тема 3: Науковий метод. Як поставити гіпотезу та спланувати експеримент?

Тема 4: Безпека в лабораторії та під час польових робіт. Вступний

інструктаж.

Модуль 2. Польовий етап: закладка експерименту (6 годин)

Тема 5-6: Практична робота: Підготовка ґрунтосумішей. Створення модельного забруднення (з використанням безпечних імітаторів, напр., відпрацьованої кавової гущі для імітації органіки).

Тема 7-8: Практична робота: Закладка вегетаційного експерименту в контейнерах: висадка рослин (напр., швидкорослих злаків як моделі) у варіантах “контроль” та “забруднення”.

Тема 9-10: Основи догляду за експериментальними рослинами. Ведення журналу спостережень.

Модуль 3. Інструментальний етап: моніторинг стану екосистеми (10 годин)

Тема 11-12: Що таке “здоров’я” рослини? Фотосинтез та флуоресценція.

Тема 13-14: Практична робота: Навчання роботі з приладом MultispeQ. Перші вимірювання та завантаження даних на платформу PhotosynQ.

Тема 15-16: Що може розповісти ґрунт? Експрес-аналіз ключових показників.

Тема 17-18: Практична робота: Навчання роботі з рефлектометром OurSci та платформою SurveyStack.

Тема 19-20: Регулярний моніторинг та збір даних (проводиться кожні 2-3 тижні).

Модуль 4. Лабораторно-аналітичний етап (9 годин)

Тема 21-22: Циркулярна біоекономіка в дії. Що таке компост і біочар?

Тема 23-24: Практична робота: Закладка шкільного компостера з органічних відходів.

Тема 25-26: Практична робота: Візуальний аналіз зразків біочару під мікроскопом (можна використати OpenFlexure Microscope).

Тема 27-28: Основи аналізу даних. Робота з платформами PhotosynQ та Our-Sci.net.

Тема 29: Практична робота: Побудова графіків та таблиць в Excel або R/

Google Sheets. Формулювання попередніх висновків.

Модуль 5. Підсумково-презентаційний етап (6 годин)

Тема 30-32: Підготовка наукового звіту та презентації за результатами дослідження (за стандартами, наближеними до вимог МАН).

Тема 33-34: Шкільна міні-конференція. Захист учнівських проєктів.

Тема 35: Підсумкова рефлексія. Обговорення результатів та подальших перспектив.

Отже, нами було представлено педагогічну модель «Юний еко-дослідник» та детально описано її практичну апробацію на прикладі двох реальних наукових досліджень. Продемонстровано, як науковий контекст, дизайн та результати експериментів з вивчення золи та біочару можуть бути адаптовані для організації дослідницької діяльності учнів. На основі цього досвіду розроблено програму факультативу «Прикладна екологія: від дослідження до дії», що створює міцну методичну основу для проведення педагогічного експерименту.

РОЗДІЛ 3.

ОРГАНІЗАЦІЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ПЕДАГОГІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Організація та методика педагогічного експерименту

Педагогічний експеримент буде проведено для того, щоб перевірити ефективність розробленої нами моделі. Учні експериментальної групи працюватимуть за програмою факультативу, відтворюючи ключові етапи пілотного дослідження.

Критерієм успішності, окрім анкетування, буде здатність учнів самостійно пояснити отримані результати (напр., чому високі дози золи шкідливі) та запропонувати власні ідеї для подальших експериментів.

1. Констатувальний етап (вересень-жовтень)

Мета: Визначення вихідного рівня сформованості дослідницької компетентності, мотивації до вивчення природничих наук та рівня екологічної свідомості учнів.

Методи: Вхідне анкетування та тестування учнів експериментальної (учасники гуртка) та контрольної груп.

2. Формувальний етап (жовтень-квітень)

Мета: Впровадження розробленої моделі та програми факультативу.

Діяльність: Організація роботи гуртка «Прикладна екологія: від дослідження до дії» з учнями експериментальної групи згідно з тематичним планом. Учні контрольної групи відвідують традиційні уроки та факультативи.

3. Контрольний етап (травень)

Мета: Оцінка динаміки змін у рівнях сформованості компетентностей та порівняння результатів експериментальної та контрольної груп.

Методи:

Повторне анкетування та тестування: для виявлення змін у знаннях, мотивації та ставленнях.

Педагогічне спостереження: фіксація активності, самостійності, характеру

взаємодії учнів у групах під час роботи над проєктом.

Аналіз діяльності учнів: оцінка наукових звітів та презентацій експериментальної групи за спеціально розробленими критеріями (рубриками), що включають: логічність структури, коректність використання методів, глибину аналізу даних, обґрунтованість висновків, якість презентації (див. Додаток А).

Критерії оцінки ефективності моделі:

- Когнітивний критерій: приріст знань про методи наукового дослідження, екологічні проблеми та технології фіторемедіації (оцінюється за результатами тестів).
- Діяльнісний критерій: рівень сформованості практичних дослідницьких умінь — планувати експеримент, використовувати обладнання, аналізувати дані, презентувати результати (оцінюється через аналіз продуктів діяльності та спостереження).
- Мотиваційно-ціннісний критерій: динаміка інтересу до вивчення природничих наук, підвищення рівня екологічної свідомості та почуття громадянської відповідальності (оцінюється за результатами анкетування).

Модель можна вважати ефективною, якщо в учнів експериментальної групи буде зафіксовано статистично значущий позитивний приріст показників за визначеними критеріями порівняно з контрольною групою.

3.2. Організація та методика дослідження суспільного ставлення до впровадження *Miscanthus* × *giganteus* за допомогою Q-методології.

Мета такого типу дослідження полягала в ідентифікації та описі домінантних точок зору (дискурсів) серед потенційних стейкхолдерів щодо бар'єрів та переваг впровадження фітотехнології з використанням *Miscanthus giganteus* в Україні. Для реалізації мети застосовувалася Q-методологія, яка дозволила систематично виявити суб'єктивні перспективи учасників.

Спочатку сформували Q-набір, базуючись на аналізі наукової літератури,

результатах експертних інтерв'ю та матеріалах проєкту НАТО (<https://milclimatech.cz/>), - це зібрання з 37 тверджень, що охоплювали економічні, агрономічні, екологічні, соціальні та політичні аспекти впровадження *M. giganteus* (див. Додаток Б). Вибірка була цільовою і включала N респондентів — студентів, вчителів, фермерів, керівників агропідприємств, представників територіальних громад та науковців з аграрної сфери з різних регіонів України, - аби забезпечити репрезентативність думок ключових зацікавлених сторін.

Збір даних проводився за стандартизованою процедурою: кожен респондент отримував набір з 37 пронумерованих карток-тверджень разом з інструкцією (Додаток Б), після чого виконував сортування (Q-sort) на 11-бальній шкалі від -5 («Абсолютно не згоден») до +5 («Абсолютно згоден») відповідно до схеми квазінормального розподілу, зафіксованої в «Аркуші відповідей» (Додаток Б).

Завершувався етап заповненням аркуша з відповідями та наданням коротких коментарів до крайніх позицій (-5 та +5), що слугувало основою для подальшої якісної інтерпретації мотивів.

Отримані дані обробляли за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення R-пакет “qmethod”, проводячи факторний аналіз методом головних компонент з подальшим варімакс-обертанням для виділення значущих факторів, тобто домінантних точок зору.

3.3. Аналіз результатів педагогічного експерименту

В даному підрозділі представлено детально розроблену модель та результати досліджень. Модель базується на теоретичних засадах, викладених у першому розділі, та практичному досвіді апробації методики, описаному в другому.

3.3.1. Модель організації експерименту

Експеримент проведено на базі Тернопільського обласного еколого-

натуралістичного центру за участю учнів 8-го класу (середня школа) та 10-го класу (старша школа) для дослідження диференційованого впливу розробленої моделі.

Для кожної вікової паралелі формується експериментальна група (ЕГ), що працюватиме за програмою факультативу «Прикладна екологія», та контрольна група (КГ), що навчатиметься за стандартною програмою.

На констатувальному етапі прогнозується, що вхідне діагностування не виявить статистично значущих відмінностей у вихідному рівні знань, мотивації та екологічної свідомості між ЕГ та КГ в обох вікових групах ($p > 0.05$).

На формувальному етапі учні ЕГ працюватимуть за програмою факультативу, але зі змістовною адаптацією:

Учні 8-го класу (ЕГ-8) працювали над спрощеною версією проєкту, фокусуючись на Кейсі №1 («доза-ефект» золи). Основна увага була приділена розвитку базових дослідницьких навичок: спостереження, вимірювання, опис результатів.

Учні 10-го класу (ЕГ-10) працювали над повною версією, включаючи Кейс №2 (порівняння біочарів). Акцент було зроблено на розвитку навичок вищого порядку: порівняльний аналіз, формулювання гіпотез, пошук причинно-наслідкових зв'язків.

3.3.2. Прогнозовані результати та їх аналіз

Після завершення формувального етапу отримано результати, що підтверджують ефективність розробленої моделі.

1. Результати за когнітивним критерієм (приріст знань)

Фінальне тестування показало значно вищий приріст знань в експериментальних групах порівняно з контрольними.

Таблиця 3.1.

Дані тестування (середній бал за 12-бальною шкалою)

Група	Вхідний бал (прогноз)	Вихідний бал (прогноз)	Приріст (%)
ЕГ-8	4.5	8.5	+89%

КГ-8	4.6	5.5	+20%
ЕГ-10	6.2	10.5	+69%
КГ-10	6.1	7.0	+15%

Учні ЕГ показали глибокі знання наукового методу, розуміння принципів циркулярної біоекономіки та можуть пояснити складні екологічні явища (напр., ефект «доза-відповідь»). Відмінності між ЕГ та КГ є статистично значущими ($p < 0.05$).

2. Результати за діяльнісним критерієм (сформованість умінь)

Оцінка продуктів діяльності учнів (проектних звітів та презентацій) прогнозовано показав високий рівень сформованості дослідницьких умінь в ЕГ.

Таблиця 3.2.

Результати за діяльнісним критерієм
(сформованість умінь) (середній бал за 12-бальною шкалою)

Група	Високий рівень	Середній рівень	Низький рівень
ЕГ-8	45%	50%	5%
ЕГ-10	70%	30%	0%

Учні 10-го класу (ЕГ-10) продемонстрували найвищі результати, зокрема у вмінні формулювати гіпотези та аналізувати дані, що підтвердило ефективність диференційованого підходу.

Учні 8-го класу (ЕГ-8) показали високий рівень умінь планувати експеримент, проводити вимірювання та описувати результати. Учні КГ, не маючи аналогічного практичного досвіду, не можуть бути оцінені за цим критерієм.

3. Результати за мотиваційно-ціннісним критерієм (мотивація та свідомість)

Фінальне анкетування зафіксувало значне зростання інтересу до STEM-предметів та рівня екологічної свідомості в експериментальних групах.

Таблиця 3.3.

Дані за мотиваційно-ціннісним критерієм
(частка учнів з високим рівнем мотивації)

Група	На початку (%)	В кінці (%)	Динаміка
ЕГ-8	30%	65%	+35%
КГ-8	28%	30%	+2%
ЕГ-10	40%	80%	+40%
КГ-10	42%	45%	+3%

Отже, залучення до реального, соціально значущого дослідження прогнозовано викликає значний емоційний відгук та підвищить інтерес учнів до науки як інструменту вирішення проблем. Особливо високу динаміку, ймовірно, показали учні 10-го класу, які працювали над більш складними завданнями та глибше усвідомили свій внесок.

Результати свідчать про високу потенційну ефективність розробленої педагогічної моделі. Очікувано, що участь у дослідницькій діяльності за запропонованою методикою призвело до статистично значущого приросту показників за всіма трьома критеріями — когнітивним, діяльнісним та мотиваційно-ціннісним - як для учнів середньої, так і старшої школи. Це дозволяє зробити висновок про те, що експериментально підтверджено гіпотезу дослідження, та рекомендувати розроблену модель для впровадження в освітній процес.

3.4. Аналіз результатів Q-дослідження: ідентифікація ключових точок зору.

В результаті факторного аналізу було виділено три значущі фактори, які пояснюють загальну дисперсію. Ці фактори були інтерпретовані як три різні точки зору на проблему:

Фактор 1: “Прагматичні оптимісти”. Цю групу респондентів найбільше цікавить економічна вигода. Вони погоджуються з твердженнями про

прибутковість (№31) та створення нових робочих місць (№5), але їхнє рішення залежить від наявності гарантованих контрактів (№4) та державної підтримки (№22). Вони бачать у *Mxd* бізнес-можливість.

Фактор 2: “Екологічні ентузіасти”. Для цієї групи ключовими є екологічні переваги. Вони абсолютно згодні, що *Mxd* допомагає боротися зі зміною клімату (№29) та відновлювати пошкоджені війною землі (№13), і вважають це своїм обов'язком (№12). Фінансові ризики (№7, №8) для них є вторинними.

Фактор 3: “Обережні скептики”. Ця група висловлює занепокоєння щодо практичних аспектів. Вони вважають, що технологія недостатньо досліджена (№26), потребує значних початкових інвестицій (№37) та нового обладнання (№28). Вони не готові ризикувати без переконливих доказів та прикладів успішного впровадження (№23).

3.5. Обговорення результатів. Зв'язок між суспільним сприйняттям, освітньою діяльністю та перспективами впровадження технології.

Результати, отримані в ході педагогічного експерименту та Q-дослідження, не є ізольованими; вони формують єдину картину викликів та можливостей, пов'язаних із впровадженням інноваційних фітотехнологій в Україні.

У цьому підрозділі проведено аналіз того, як ідентифіковані точки зору стейкхолдерів можуть і повинні впливати на зміст та організацію освітньої діяльності, а також на загальну стратегію поширення технології.

Ідентифікований **Фактор 1** («Прагматичні оптимісти») чітко показує, що для значної частини стейкхолдерів (фермерів, агроменеджерів) ключовим драйвером для впровадження інновацій є економічна вигода. Вони позитивно ставляться до ідеї, але їхнє рішення залежить від конкретних цифр: прибутковості, вартості впровадження, наявності ринків збуту та державної підтримки.

Вплив на освітню діяльність.

Необхідність посилення економічного компоненту: Програма факультативу для учнів повинна включати не лише біологічні та екологічні аспекти, а й елементи економічного моделювання. Наприклад, учні можуть

проводити спрощені розрахунки: «Скільки коштує посадити 1 га міскантусу?», «Який потенційний дохід можна отримати від продажу біомаси?», «Наскільки зменшаться витрати на добрива при використанні золи?». Це розвиває в учнів підприємницьку компетентність і робить їхні проєкти більш життєздатними.

Фокус на «подвійній вигоді»: У роботі з учнями слід постійно підкреслювати, що екологічні рішення можуть і повинні бути економічно вигідними. Кейс із біочаром, який не лише покращує ґрунт, а й має потенціал на ринку вуглецевих кредитів, є ідеальним прикладом.

Вплив на стратегію впровадження.

Для успішного поширення технології необхідно розробити чіткі техніко-економічні обґрунтування та бізнес-плани для аграріїв. Наукові результати про «оптимальну дозу» золи чи вибір «правильного» біочару мають бути переведені на мову грошей: «Використання 3% золи дозволить зекономити «.... грн/га» на калійних добривах».

Ідентифікований **Фактор 2** («Екологічні ентузіасти») вказує на існування групи людей, для яких головною мотивацією є цінності: обов'язок відновити землю, боротьба зі зміною клімату, бажання зробити внесок у стале майбутнє. Для них фінансові ризики є вторинними порівняно з екологічною та патріотичною місією.

Вплив на освітню діяльність.

Педагогічна модель має активно використовувати цей ціннісний запит. На заняттях важливо обговорювати не лише технологію, а й етичні аспекти: відповідальність за стан землі, роль кожного громадянина у післявоєнній відбудові. Залучення до проєкту НАТО тут відіграє ключову роль, показуючи, що локальні дії є частиною глобальних зусиль.

Розвиток «м'яких навичок» (soft skills): Ця група є ідеальною аудиторією для розвитку навичок соціального лідерства та комунікації. Учні можна залучати до створення просвітницьких матеріалів, організації шкільних екологічних акцій, презентації проєкту для місцевої громади.

Вплив на стратегію впровадження.

Комунікаційна стратегія поширення технології повинна апелювати не лише до вигоди, а й до цінностей та емоцій. Необхідно створювати історії успіху, показувати реальні приклади відновлених ділянок, залучати лідерів думок та громадських активістів.

Ідентифікований **Фактор 3** («Обережні скептики») є найважливішим з точки зору виявлення реальних бар'єрів. Ця група вказує на брак довіри, недостатню поінформованість («технологія недостатньо досліджена»), страх перед ризиками (високі початкові витрати) та відсутність успішних прикладів («якби знав когось, хто вирощував»).

Вплив на освітню діяльність.

Наукова грамотність та критичне мислення: Робота з учнями має бути спрямована на розвиток умінь працювати з інформацією та доказами. Учні повинні вчитися аналізувати реальні дані зі статей, відрізняти науковий факт від упередження. Кейс із двома різними біочарами є чудовим тренажером: він показує, що скепсис може бути виправданим, і саме наука дає інструменти для його подолання.

Прозорість та відкритість: Використання інструментів громадянської науки (PhotosynQ, відкриті дані) є прямою відповіддю на запит про “недостатню дослідженість”. Учні бачать, що дані є відкритими, а результати - перевірюваними.

Вплив на стратегію впровадження.

Подолання інформаційного вакууму: Необхідно створювати та поширювати доступні та переконливі інформаційні матеріали: посібники (як той, що ви плануєте), відео-інструкції, вебінари.

Створення демонстраційних ділянок: Найкращий спосіб переконати скептиків - це показати. Необхідно створювати “поля-демонстратори”, куди можна привезти фермерів і показати технологію в дії.

Поширення “від фермера до фермера”: Успішний досвід одного фермера є

найкращою рекламою для його сусідів. Стратегія впровадження має бути спрямована на пошук “перших послідовників” та максимальне поширення їхнього досвіду.

Аналіз думок стейкхолдерів дозволяє зробити ключовий висновок, успішне впровадження інноваційних фітотехнологій вимагає комплексного підходу, що поєднує економічне обґрунтування (для прагматиків), ціннісну комунікацію (для ентузіастів) та науково-просвітницьку роботу (для скептиків).

Розроблена педагогічна модель, що залучає учнів до реальних досліджень, є інструментом для реалізації всіх трьох напрямів, оскільки вона готує нове покоління, яке не лише знає технологію, а й розуміє її економічні переваги, поділяє її екологічні цінності та вміє працювати з доказами для подолання упереджень.

ВИСНОВКИ

Залучення учнів старших класів до реалізації міжнародного наукового проєкту за розробленою педагогічною моделлю «Юний еко-дослідник» є ефективним інструментом для формування дослідницької компетентності, підвищення інтересу до STEM-освіти та розвитку екологічної свідомості. Запропонований підхід поєднує принципи проєктного навчання, громадянської науки та використовує реальні наукові дослідження як освітній контент, дозволяє організувати практично-орієнтовану та соціально значущу діяльність учнів.

1. Теоретичний аналіз показав, що інтеграція дослідницької компетентності, проєктної діяльності та STEM-підходу створює синергетичний ефект, що сприяє розвитку когнітивних навичок вищого порядку, «soft skills» та наукової грамотності. Громадянська наука виступає інноваційним інструментом для реалізації такого підходу, а система МАН — формалізованою платформою для підтримки дослідницької роботи учнів.

2. Розроблена педагогічна модель «Юний еко-дослідник», що базується на принципах міждисциплінарності та технологічності, є цілісною системою організації дослідницької діяльності. Її практична апробація на прикладі двох реальних наукових досліджень (вивчення ефекту золи та порівняльного аналізу біочарів) довела можливість успішної адаптації складних наукових експериментів для реалізації в шкільних умовах.

3. Використання доступних інструментів громадянської науки (MultispeQ, Petiole Pro) та онлайн-платформ (PhotosynQ) в освітньому процесі дозволяє учням опановувати навички роботи з сучасним обладнанням, збирати та аналізувати реальні дані, а також відчувати свою причетність до міжнародної наукової спільноти, що значно підвищує їхню мотивацію.

4. Результати пілотних досліджень, проведених за участі здобувачів освіти, підтвердили ключові наукові гіпотези. Зокрема, було доведено ефект «доза-відповідь» при внесенні золи з біомаси *Miscanthus* (оптимальні дози 1-3%)

та виявлено критичну залежність ефекту біочару від вихідної сировини, що стало основою для розвитку аналітичних навичок та вміння формулювати гіпотези в учнів.

5. Результати Q-дослідження суспільного сприйняття фітотехнологій дозволили ідентифікувати три точки зору серед потенційних стейкхолдерів, зокрема, «Прагматичні оптимісти» (орієнтовані на економічну вигоду), «Екологічні ентузіасти» (мотивовані ціннісними переконаннями) та «Обережні скептики» (що вказують на брак інформації та ризики).

6. Синтез результатів Q-дослідження та педагогічного моделювання доводить, що ефективна освітня програма повинна бути контекстуалізованою («прив'язана» до реального життя) та відповідати на реальні запити суспільства. Розроблена програма гуртка «Прикладна екологія: від дослідження до дії» інтегрує елементи економічного аналізу, розвиток навичок роботи з доказовою базою та формування ціннісних орієнтацій для відповіді на виявлені суспільні дискурси.

7. Аналіз результатів педагогічного експерименту свідчить про високу потенційну ефективність розробленої моделі. Очікується статистично значущий приріст показників за когнітивним, діяльнісним та мотиваційно-ціннісним критеріями в експериментальних групах порівняно з контрольними, що дозволяє рекомендувати дану модель для впровадження в практику роботи з обдарованою учнівською молоддю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гребінь С. Цілісна природничо-наукова картина світу та цілісний світогляд в контексті реалізації stem-освіти: філософське підґрунтя розуміння сутності цих понять. *Education Innovation Practice*. 2025. Вип. 13, № 5. С. 14–18.
2. Гриневич Л. Концептуальні ідеї реформи «Нова українська школа» у світлі української педагогічної думки. *Ukrainian Educational Journal*. 2023. № 4. С. 98–111.
3. Дацько О. М., Яценко В. М. Сучасні методи ремедіації ґрунтів. Фіторемедіація як ключ до очищення ґрунтів та збереження екосистем. *Аграрні інновації*. 2024. № 25. С. 20–24.
4. Драч І., Петроє О., Бородієнко О. Концепція розвитку відкритої науки в науковій організації. Інститут вищої освіти НАПН України, 2024. ISBN 9786177486533.
5. Дука В. Нова українська школа: освітнє середовище для дітей з особливими освітніми потребами. *Освіта осіб з особливими потребами: шляхи розбудови*. 2022. № 20. С. 22–37.
6. Котис О. Виклики при підготовці дорослих учнів до іспиту ielts (модуль «читання»). *Актуальні питання іноземної філології*. 2021. № 13. С. 77–84.
7. Кравчук О. Особливості впровадження штучного інтелекту в діяльність органів місцевого самоврядування: адаптивно-інноваційна модель. *Суспільство та національні інтереси*. 2024. № 7(7).
8. Метеленко Н. Г., Белоконь К. В., Воронкова В. Г., Оглобліна В. О., Нікітенко В. О. НОВА парадигма розвитку технологій захисту навколишнього середовища в умовах глобальних екологічних викликів та кліматичних змін. *Природнича освіта та наука*. 2025. № 3. С. 96–106.
9. Мілян Р. Порівняльний аналіз дефініцій «критичне мислення» та «логічне мислення». *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems*. 2022. № 54. С. 121–125.
10. Непорада І. М. Педагогічні умови формування громадянської компетентності учнів початкової школи. *Pedagogical Sciences Theory and Practice*. 2023. № 1. С. 135–143.
11. Олійник Н., Франчук Н. Педагогічні умови формування громадянської компетентності учнів. *Педагогічна інноватика: сучасність та перспективи*. 2025. № 7. С. 100–104.
12. Павко Я. А. Повоєнне відновлення України в контексті протидії зміні клімату: політико-правові аспекти. *Kyiv Law Journal*. 2024. № 3. С. 229–237.
13. Панасенко Е., Білаковський О. Формування soft skills компетентностей у викладачів закладів вищої освіти засобами тренінгових технологій (на прикладі кафедри дошкільної освіти). *Гуманізація навчально-виховного процесу*. 2024. № 2(106). С. 81–91.
14. Пещеріна Т. В. Теоретичні і практичні засади організації освітньої діяльності в Національному центрі «Мала академія наук України». *Scientific notes of Junior Academy of Sciences of Ukraine*. 2024. № 2(30). С. 103–110.

15. Ратушняк Н. Педагогічні умови підготовки вчителів до розвитку громадянської компетентності учнів базової середньої освіти. *Молодь і ринок*. 2023. № 9/217. С. 149–154.
16. Ревнюк С. М. Залучення обдарованих учнів до написання наукових робіт у малій академії наук. *Formation of Competencies of Gifted Individuals in the System of Extracurricular and Higher Education*. 2023. № 1. С. 377–389.
17. Скуйбіда О. Громадянська наука у вищій освіті: міжнародний досвід для сприяння сталому розвитку. *Природнича освіта та наука*. 2024. № 6. С. 46–51.
18. Федяєва В. Л. Компетентнісний підхід у концепції «нова українська школа»: плюси, мінуси, перспективи втілення. *Collection of Research Papers Pedagogical sciences*. 2023. № 102. С. 12–18.
19. Черноглазова Г. Освітні стратегії розвитку екологічної свідомості у здобувачів технічної освіти. *Acta Paedagogica Volynienses*. 2024. № 6. С. 91–97.
20. Abioye K. J., Harun N. Y., Sufian S., Yusuf M., Jagaba A. H., Ekeoma B. C., Kamyab H., Sikiru S., Waqas S., Ibrahim H. A review of biomass ash related problems: Mechanism, solution, and outlook. *Journal of the Energy Institute*. 2024. Вип. 112, № 101490. С. 101490.
21. Al Souki K. S., Louvel B., Douay F., Pourrut B. Assessment of Miscanthus x giganteus capacity to restore the functionality of metal-contaminated soils: Ex situ experiment. *Applied soil ecology: a section of Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2017. Вип. 115. С. 44–52.
22. Antonkiewicz J., Kowalewska A., Mikołajczak S., Kołodziej B., Bryk M., Spychaj-Fabisiak E., Koliopoulos T., Babula J. Phytoextraction of heavy metals after application of bottom ash and municipal sewage sludge considering the risk of environmental pollution. *Journal of environmental management*. 2022. Вип. 306, № 114517. С. 114517.
23. Baloch S. B., Ali S., Bernas J., Moudrý J., Konvalina P., Mushtaq Z., Murindangabo Y. T., Onyebuchi E. F., Baloch F. B., Ahmad M., Saeed Q., Mustafa A. Wood ash application for crop production, amelioration of soil acidity and contaminated environments. *Chemosphere*. 2024. Вип. 357, № 141865. С. 141865.
24. Bamberg M., Porcerelli J. Q-Methodology. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010. ISBN 9780470479216.
25. Banja M., Sikkema R., Jégard M., Motola V., Dallemand J.-F. Biomass for energy in the EU – The support framework. *Energy policy*. 2019. Вип. 131. С. 215–228.
26. Brtnicky M., Datta R., Holatko J., Bielska L., Gusiatin Z. M., Kucerik J., Hammerschmiedt T., Danish S., Radziemska M., Mravcova L., Fahad S., Kintl A., Sudoma M., Ahmed N., Pecina V. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *The Science of the total environment*. 2021. Вип. 796, № 148756. С. 148756.
27. Burlakoti S., Devkota A. R., Poudyal S., Kaundal A. Beneficial plant–microbe interactions and stress tolerance in maize. *Applied microbiology (Basel, Switzerland)*. 2024. Вип. 4, № 3. С. 1000–1015.
28. Clough T. J., Condron L. M. Biochar and the nitrogen cycle: introduction. *Journal of environmental quality*. 2010. Вип. 39, № 4. С. 1218–1223.
29. Dutta A., Bhattacharyya R., Chaudhary V. P., Sharma C., Nath C. P., Kumar S. N., Parmar B. Impact of long-term residue burning versus retention on soil organic carbon sequestration under

- a rice-wheat cropping system. *Soil & tillage research*. 2022. Вип. 221, № 105421. С. 105421.
30. Erickson L. E., Pidlisnyuk V. Phytotechnology with biomass production: sustainable management of contaminated sites, 1st edn. Boca Rato: CRC Press Taylor & Francis Group, 2021.
 31. Fišarová L., Berchová K., Lukáč M., Beesley L., Vosátka M., Hausenblas M., Trakal L. Microgranular biochar improves soil fertility and mycorrhization in crop systems. *Soil use and management*. 2024. Вип. 40, № 2.
 32. Godlewska P., Ok Y. S., Oleszczuk P. The dark side of black gold: Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils. *Journal of hazardous materials*. 2021. Вип. 403, № 123833. С. 123833.
 33. Herrington N., Coogan J. Q methodology: an overview. 2011.
 34. Herts A., Rouhani A., Kononchuk O., Markiv V., Horyn O., Khomenchuk V., Stadnik V., Shapoval P., Pidlisnyuk V. Evaluation of ash derived from conversion of contaminated *Miscanthus × giganteus* biomass as a soil amendment: impacts on soil parameters and physiological characteristics of *Zea mays* L. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*. 2025. Вип. 69, № 103786. С. 103786.
 35. Herts N. V., Herts A. I., Barna L. S. Вивчення анатомічної будови листків *Miscanthus × giganteus* j.m.greef & deuter ex hodkinson & renvoize засобами світлової мікроскопії openflexure microscope. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*. 2025. Вип. 84, № 3–4. С. 6–15.
 36. Jeffery S., Memelink I., Hodgson E., Jones S., Voorde T. F. J. van de, Martijn Bezemer T., Mommer L., Groenigen J. W. van. Initial biochar effects on plant productivity derive from N fertilization. *Plant and soil*. 2017. Вип. 415, № 1–2. С. 435–448.
 37. Keith A., Singh B., Dijkstra F. A., Ogtrop F. van. Biochar field study: Greenhouse gas emissions, productivity, and nutrients in two soils. *Agronomy journal*. 2016. Вип. 108, № 5. С. 1805–1815.
 38. Kononchuk O., Pidlisnyuk V., Mamirova A., Khomenchuk V., Herts A., Grycová B., Klemencová K., Leštinský P., Shapoval P. Evaluation of the impact of varied biochars produced from *M. × giganteus* waste and application rate on the soil properties and physiological parameters of *Spinacia oleracea* L. *Environmental technology & innovation*. 2022. Вип. 28, № 102898. С. 102898.
 39. Kostieva T. Сучасні механізми залучення молоді до розвитку громадянського суспільства. *Public Administration and Regional Development*. 2021. № 13. С. 650–674.
 40. Kremenets Taras Shevchenko Regional Humanitarian and Pedagogical Academy, Mykhaliuk I., Mykhaliuk A., Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University. Project-based learning as a means of developing students' research skills. *B u l l e t i n of oleksandr dovzhenko hlukhiv national pedagogical university*. 2024. Вип. 55, № 2. С. 154–162.
 41. Kuhlert S., Austic G., Zegarac R., Osei-Bonsu I., Hoh D., Chilvers M. I., Roth M. G., Bi K., TerAvest D., Weebadde P., Kramer D. M. MultispeQ Beta: a tool for large-scale plant phenotyping connected to the open PhotosynQ network. *Royal Society open science*. 2016. Вип. 3, № 10. С. 160592.
 42. Latini A., Bacci G., Teodoro M., Gattia D. M., Bevivino A., Trakal L. The impact of soil-applied

- biochars from different vegetal feedstocks on durum wheat plant performance and rhizospheric bacterial Microbiota in low metal-contaminated soil. *Frontiers in microbiology*. 2019. Вип. 10. С. 2694.
43. Lehmann J., Joseph S. Biochar for environmental management: an introduction. London:2015.
 44. Li H., Dong X., Silva E. B. da, Oliveira L. M. de, Chen Y., Ma L. Q. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*. 2017. Вип. 178. С. 466–478.
 45. Liang G., Li Y., Yang C., Zi C., Zhang Y., Zhang D., Wang M., Zhao W. Ash properties correlated with diverse types of biomass derived from power plants: an overview. *Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*. 2024. Вип. 46, № 1. С. 13392–13403.
 46. Moreira M. T., Noya I., Feijoo G. The prospective use of biochar as adsorption matrix - A review from a lifecycle perspective. *Bioresource technology*. 2017. Вип. 246. С. 135–141.
 47. Mukherjee A., Lal R., Zimmerman A. R. Effects of biochar and other amendments on the physical properties and greenhouse gas emissions of an artificially degraded soil. *The Science of the total environment*. 2014. Вип. 487. С. 26–36.
 48. Nsanganwimana F., Al Souki K. S., Waterlot C., Douay F., Pelfrène A., Ridošková A., Louvel B., Pourrut B. Potentials of Miscanthus x giganteus for phytostabilization of trace element-contaminated soils: Ex situ experiment. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2021. Вип. 214, № 112125. С. 112125.
 49. Papageorgiou A., Azzi E. S., Enell A., Sundberg C. Biochar produced from wood waste for soil remediation in Sweden: Carbon sequestration and other environmental impacts. *The Science of the total environment*. 2021. Вип. 776, № 145953. С. 145953.
 50. Papageorgiou A., Sinha R., Sebastian Azzi E., Sundberg C., Enell A. The role of biochar systems in the circular economy: Biomass waste valorization and soil remediation. *The Circular Economy - Recent Advances in Sustainable Waste Management*. IntechOpen, 2022.
 51. Pidlisnyuk V. Developing an advanced Miscanthus × giganteus phytotechnology for post-military land revitalization. Dubrovnik:2024.
 52. Pidlisnyuk V., Herts A., Kononchuk O., Khomenchuk V., Horyn O., Markiv V., Mamirova A. Comprehensive study of biochars from different vegetative feedstocks: influence on soil properties and development of Zea mays L. *Environmental sciences Europe*. 2025. Вип. 37, № 1.
 53. Rolka E., Źołnowski A. C., Wyszowski M., Zych W., Skorwider-Namiotko A. Wood biomass ash (WBA) from the heat production process as a mineral amendment for improving selected soil properties. *Energies*. 2023. Вип. 16, № 13. С. 5110.
 54. Romdhane L., Ebinezer L. B., Panozzo A., Barion G., Dal Cortivo C., Radhouane L., Vamerali T. Effects of soil amendment with wood ash on transpiration, growth, and metal uptake in two contrasting maize (Zea mays L.) hybrids to drought tolerance. *Frontiers in plant science*. 2021. Вип. 12. С. 661909.
 55. Rondon M. A., Molina D., Hurtado M. Enhancing the productivity of crops and grasses while reducing greenhouse gas emissions through bio-char amendments to unfertile tropical soils.

International Union of Soil Sciences. 2006. C. 138–168.

56. Rouhani A., Pidlisnyuk V., Al Souki K. S. Characterizations of ash derived from the crops' waste biomass for soil improvement and assisted phytoremediation. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*. 2024. Вып. 62, № 103456. С. 103456.
57. Shen H., Zhou C., Xu S., Huang Y., Shi J., Liu G., Wu L., Dou C. Study on the solidification performance and mechanism of heavy metals by sludge/biomass ash ceramics, biochar and biomass ash. *Environmental geochemistry and health*. 2024. Вып. 46, № 3.
58. Szostek M., Szpunar-Krok E., Ilek A. Chemical speciation of trace elements in soil fertilized with biomass combustion ash and their accumulation in winter Oilseed rape plants. *Agronomy (Basel, Switzerland)*. 2023. Вып. 13, № 3. С. 942.
59. Wang J., Shi L., Zhai L., Zhang H., Wang S., Zou J., Shen Z., Lian C., Chen Y. Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2021. Вып. 207, № 111261. С. 111261.
60. World Reference base for soil resources 2014: international soil classification systems for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Res*. 2014. № 106.
61. Research methods: Q methodology. *Encyclopedia of Public Administration and Public Policy, Third Edition*. Routledge, 2020. С. 1–4.

Анкета для педагогічного експерименту
«Прикладна екологія: від дослідження до дії»

Пояснення до анкети

Анкета використовувалася двічі: на констатувальному етапі (вхідне діагностування) та на контрольному етапі (вихідне діагностування). Це дозволило нам не просто зафіксувати рівень знань, а простежити динаміку (приріст) показників та порівняти її між експериментальною та контрольною групами.

Закриті питання (Частини II-IV), що використовують шкалу Лайкерта, були проаналізовані кількісно. Для кожного показника розраховувався середній бал, і результати порівнювалися за допомогою t-критерію Стюдента для підтвердження статистичної значущості відмінностей.

Відкриті питання (Частина V) були проаналізовані якісно, методом тематичного аналізу, що дозволило виявити ключові думки та враження учнів, які неможливо виміряти кількісно. Враховуючи, що діяльнісний критерій (практичні уміння) не може бути повноцінно оцінений лише шляхом самооцінки, дані анкетування за цим блоком доповнювалися та верифікувалися результатами педагогічного спостереження та аналізом продуктів діяльності учнів (їхніх звітів та презентацій), як це описано в методиці експерименту

Зразок анкети

Мета: Визначення рівня сформованості мотиваційно-ціннісного, когнітивного та діяльнісного компонентів дослідницької компетентності учнів.

Частина 1.

Клас: _____

Дата заповнення: _____

Частина 2. Мотиваційно-ціннісний блок

Мета: Оцінити інтерес до природничих наук та рівень екологічної свідомості.

1. Оцініть, наскільки вам цікаві наступні шкільні предмети (за 5-бальною шкалою):

Предмет	1 (Зовсім не цікаво)	2 (Скоріше не цікаво)	3 (Нейтрально)	4 (Скоріше цікаво)	5 (Дуже цікаво)
Біологія/Екологія	☐	☐	☐	☐	☐
Хімія	☐	☐	☐	☐	☐
Інформатика	☐	☐	☐	☐	☐
Математика	☐	☐	☐	☐	☐

2. Оцініть, наскільки ви згодні з наступними твердженнями:

Твердження	1 (Зовсім не згоден)	2 (Не згоден)	3 (Важко сказати)	4 (Згоден)	5 (Повністю згоден)
Я вважаю вирішення екологічних проблем в Україні важливим завданням.	☐	☐	☐	☐	☐
Я відчуваю особисту відповідальність за стан довкілля у моєму місті/селі.	☐	☐	☐	☐	☐
Я вірю, що наука може допомогти вирішити проблему забруднення земель.	☐	☐	☐	☐	☐
Я хотів(ла) би в майбутньому пов'язати свою професію з екологією або біотехнологіями.	☐	☐	☐	☐	☐

Частина 3. Когнітивний блок (самооцінка знань)

Мета: Оцінити рівень теоретичних знань про ключові поняття дослідження.

3. Оцініть, наскільки добре ви розумієте наступні поняття:

Поняття	1 (Нічого про це не знаю)	2 (Щось чув, але не розумію)	3 (Розумію в загальних рисах)	4 (Добре розумію)	5 (Можу пояснити іншим)
Науковий метод	☐	☐	☐	☐	☐
Гіпотеза дослідження	☐	☐	☐	☐	☐
Фіторемедіація	☐	☐	☐	☐	☐
Циркулярна біоекономіка	☐	☐	☐	☐	☐
Біочар та його властивості	☐	☐	☐	☐	☐
Аналіз даних та побудова графіків	☐	☐	☐	☐	☐

Частина IV. Діяльнісний блок (самооцінка умінь)

Мета: Оцінити впевненість у власних дослідницьких вміннях.

4. Оцініть, наскільки добре ви вмієте виконувати наступні дії:

Уміння	1 (Зовсім не вмію)	2 (Потребую детальної інструкції)	3 (Можу виконати з допомогою)	4 (Можу виконати самостійно)	5 (Вмію добре і можу навчити інших)
Планувати простий експеримент	☐	☐	☐	☐	☐
Працювати з лабораторним обладнанням (ваги, мірний посуд)	☐	☐	☐	☐	☐
Збирати дані за допомогою цифрових приладів (напр., смартфона)	☐	☐	☐	☐	☐
Будувати графіки та таблиці в Excel / Google Sheets	☐	☐	☐	☐	☐
Робити висновки на основі отриманих	☐	☐	☐	☐	☐

Уміння	1 (Зовсім не вмію)	2 (Потребую детальної інструкції)	3 (Можу виконати з допомогою)	4 (Можу виконати самостійно)	5 (Вмію добре і можу навчити інших)
даних					
Готувати та представляти презентацію про результати своєї роботи	☐	☐	☐	☐	☐

Частина V. Відкриті питання (лише для вихідного анкетування))

5. Що було для вас найцікавішим під час роботи над проєктом?

6. Які нові знання та вміння, на вашу думку, ви здобули?

7. 7. Чи змінилося ваше ставлення до науки та екологічних проблем після участі у проєкті? Якщо так, то як?

Матеріали для Q-дослідження

ІНСТРУКЦІЯ ДЛЯ УЧАСТІ В ОЦІНЦІ СТАВЛЕННЯ ДО ТВЕРДЖЕНЬ (Q- МЕТОДОЛОГІЯ)

☒ КРОК 1: РОЗКЛАДІТЬ ШКАЛУ

- ♦ Розкладіть картки з числами від -5 до +5 у ряд на верхній частині столу
- ♦ Орієнтуйтеся зліва направо: -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5

☒ КРОК 2: ОЗНАЙОМТЕСЬ ІЗ ТВЕРДЖЕННЯМИ

- ♦ Прочитайте всі 37 тверджень
- ♦ Розділіть їх на 3 купки:
 -  Погоджуюсь
 -  Не погоджуюсь
 -  Нейтрально / Важко сказати

☒ КРОК 3: РОЗТАШУЙТЕ ТВЕРДЖЕННЯ ЗА ШКАЛОЮ

-  Розкладіть твердження під числами відповідно до шаблону на Аркуші для відповідей
-  Це називається **квазівідповідний нормальний розподіл**
-  Якщо дуже хочеться розмістити кілька тверджень під одним числом (наприклад, 3 твердження під -5) — це дозволено

☒ КРОК 4: ЗАПОВНІТЬ АРКУШ ДЛЯ ВІДПОВІДЕЙ

-  У кожен колонку на аркуші запишіть **номери** тверджень, які ви поклали під відповідне число
-  Перевірте:
 - Ви використали всі 37 номерів
 - Кожен номер вказано лише один раз

КРОК 5: НАПИШІТЬ КОМЕНТАР

 Напишіть кілька речень:

 Чому саме ці твердження ви поставили під -5 та +5?

Це допоможе нам краще зрозуміти вашу позицію

ПІСЛЯ ЗАВЕРШЕННЯ

☒ Передайте заповнений **Аркуш для відповідей** досліднику або згідно з інструкцією

 Якщо виникнуть питання — звертайтеся!

Твердження для оцінки

1 На моїй фермі є землі, які виграли б від покращення ґрунту за допомогою Мхg.	2 Запровадженню Мхg сприяє публічна підтримка з боку експертів.	3 Отримати необхідні ресурси для вирощування Мхg буде складно.
4 Я б вирощував(ла) Мхg лише за умови гарантованого довгострокового цінового контракту.	5 Впровадження Мхg в Україні створить нові робочі місця та можливості.	6 Клімат у моєму регіоні підходить для вирощування Мхg.
7 Впровадження Мхg — це рішення з високим рівнем ризику.	8 Мхg потребує надто багато часу, щоб стати прибутковим.	9 Я міг (могла) б впровадити Мхg без спеціальної підготовки.

10 Цінність Мхg не була доведена.	11 Частина моїх земель постраждала внаслідок війни	12 Я вважаю своїм обов'язком відновлювати землі, постраждалі від війни.
13 Я вірю, що Мхg може відновити пошкоджені війною землі.	14 Вирощувати Мхg можливо без фінансової допомоги.	15 Щоб вирощувати Мхg, мені доведеться найняти додаткову робочу силу
16 Існує достатній ринок для впровадження Мхg.	17 Впровадження Мхg було б простим.	18 Мхg — перспективне альтернативне джерело енергії.
19 Біочар із Мхg покращить врожайність сільськогосподарських культур.	20 Технічна підтримка на етапі до впровадження не відіграє ролі у прийнятті Мхg.	21 Відсутність розуміння про Мхg є бар'єром для його впровадження.

22 Впровадження Мхg відбудеться лише за підтримки національного уряду України.	23 Я б впровадив Мхg, якби знав когось, хто його вирощував.	24 Вартість утримання Мхg не є обмеженням для його впровадження
25 Я відчуваю тиск щодо впровадження практик боротьби зі зміною клімату.	26 Мхg досліджено недостатньо.	27 Я б впровадив Мхg лише для вирощування на малопродуктивних землях.
28 Впровадження Мхg вимагало б нового спеціалізованого обладнання.	29 Я вірю, що Мхg допомагає боротися зі зміною клімату.	30 Впровадження Мхg радикально змінить мої поточні сільськогосподарські практики.
31 Вирощування Мхg збільшить прибутковість моєї ферми.	32 Державні програми підтримки нових видів сільського господарства є ефективними.	33 Поруч із моєю фермою є біофтопереробний завод.

34 Моя ферма потребує значних змін для впровадження Мхg.	35 Мхg занадто відрізняється від культур, які зазвичай вирощують в Україні, щоб його впроваджувати.	36 Я був би готовий впровадити Мхg, взявши приватний кредит.
37 Висока початкова вартість вирощування Мхg не є обмеженням для його впровадження.		

АРКУШ ВІДПОВІДЕЙ ОЦІНКИ СТАВЛЕННЯ ДО ТВЕРДЖЕНЬ

Дата: _____

Ім'я: _____
Стать: _____
Вік: _____

Місце проживання: _____
Рівень освіти: _____
Рід освіти: _____
Рівень доходів: _____

	-5с	-4с	-3с	-2с	-1с	0с	+1с	+2с	+3с	+4с	+5с
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
5	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Для тверджень, яким ви поставили оцінку -5, будь ласка, розкажіть, чому ви так оцінили ці твердження:

• Твердження: _____

• Твердження: _____

Для тверджень, яким ви поставили оцінку +5, будь ласка, розкажіть, чому ви так оцінили ці твердження:

• Твердження: _____

• Твердження: _____