МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет фізико-математичної та природничої освіти
Кафедра біології та хімії

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

освітній ступінь бакалавр

на тему: **ВИВЧЕННЯ СИМБІОЗУ НА УРОКАХ БІОЛОГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ СОЄВО-РИЗОБІАЛЬНИХ ВІДНОСИН**

Виконав: студент ІІІ курсу, у-34 групи
Маценко Володимир Віталійович
Освітня програма: Середня освіта (Біологія та здоров’я людини. Хімія)
спеціальності: 014.05 Середня освіта
(Біологія та здоров’я людини)
Керівник: канд. біол. наук, доц. Красноштан І. В.
Рецензент: канд. с.-г. наук, доц. Заморський О. О.

Умань – 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ 4
ВСТУП 5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВИВЧЕННЯ СИМБІОТИЧНИХ СИСТЕМ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ БІОЛОГІЇ 8
1.1. Аналіз змісту навчальних програм базової середньої школи щодо вивчення симбіозу як загальнобіологічного явища 8
1.2. Біологічні основи соєво-ризобіального симбіозу та фізіологія формування симбіотичного апарату 12
1.3. Дидактичний потенціал STEM-освіти та діяльнісного підходу у формуванні природничої компетентності учнів 16
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СИМБІОЗУ В НАУКОВОМУ ТА ПЕДАГОГІЧНОМУ АСПЕКТАХ 20
2.1. Програма та методи польових і лабораторних досліджень симбіотичної активності сої як базису для створення навчальних моделей 20
2.2. Методологія адаптації наукових (агрономічних) даних для формування освітнього контенту в курсі біології 9 класу 22
2.3. Обґрунтування методів діагностики рівня сформованості природничої компетентності учнів під час вивчення теми 24

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ УРОКУ БІОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ СОЄВО-РИЗОБІАЛЬНИХ ВІДНОСИН 27
3.1. Дидактичні умови та методичний інструментарій організації проблемного навчання на уроках біології 27
3.2. Розробка конспекту STEM-уроку з аналізу соєво-ризобіальної азотфіксації для 9 класу 30
3.3. Критерії та методики оцінювання навчальних досягнень учнів на основі вирішення кейсових завдань 39
ВИСНОВКИ 44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 47

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

МОН – Міністерство освіти і науки України

НУШ – «Нова українська школа» (концепція реформування середньої освіти)

STEM – Science, Technology, Engineering, Mathematics (природничі науки, технології, інженерія, математика)

д. р. – діюча речовина (препарату чи добрива)

NO_3^- – нітрат-іон

N_{sa} – сульфат амонію (амонійна форма азотного добрива)

N_{aa} – амонійна селітра

ф. б. – фаза формування бобів

п. с. – перед сівбою (термін внесення добрив)

п. ор. – під оранку (термін внесення добрив)

АТФ – аденозинтрифосфорна кислота

Nod-фактори – ліпохітоолігосахариди (сигнальні молекули бактерій)

B. japonicum – *Bradyrhizobium japonicum* (азотфіксуючі бактерії)

B. amyloliquefaciens – *Bacillus amyloliquefaciens* (фосформобілізуючі бактерії)

PISA – Programme for International Student Assessment (міжнародне дослідження якості освіти)

ВСТУП

Сучасний етап реформування біологічної освіти в Україні, пов’язаний із впровадженням концепції «Нова українська школа» (НУШ), вимагає від учителя біології переходу від репродуктивних методів навчання до формування цілісної природничої компетентності учнів [1]. Однією з найскладніших тем у курсі біології 9 класу є вивчення надорганізмових систем та механізмів біологічного колообігу речовин [2]. Традиційний підхід до викладу матеріалу про симбіоз часто має описовий характер, що обмежує розуміння учнями динамічної суті міжвидових взаємодій. У цьому контексті використання моделі соєво-ризобіальних відносин як STEM-інструменту дозволяє продемонструвати школярам механізми азотфіксації на основі реальних наукових досліджень [3]. Впровадження діяльнісного підходу через аналіз емпіричних даних сприяє розвитку критичного мислення, дослідницьких навичок та здатності до моделювання біологічних процесів. Це дозволяє реалізувати інтегративні зв’язки біології з хімією та екологією, акцентуючи увагу на принципах раціонального природокористування. Адаптація вузькоспеціалізованих наукових результатів у доступний методичний інструментарій для вчителя є актуальним завданням, що забезпечує наукову достовірність змісту освіти та підвищує пізнавальний інтерес учнів до вивчення природничих дисциплін у сучасній школі.

Актуальність теми. Соя, як нова культура для Лісостепу Західного, просувається все більше на північ і стає дуже рентабельною для виробництва в рільництві заходу України. Соя містить приблизно 40% білків у зерні, ключовим складником яких є азот [4]. На відміну від пшениці, кукурудзи та інших не бобових культур, посіви сої здатні здобути більшість необхідного азоту шляхом симбіотичних взаємовідношень з бактеріями роду *Rhizobium* [5].

Азотфіксація відбувається завдяки складному біотичному механізму взаємообміну між соєю та ґрунтовими бактеріями – *B. japonicum*. Бактерії отримують цукор від сої як джерело енергії, а соя отримує азот від бактерій, які черпають його із повітря. Приблизно 50–60% асимільованого рослиною

азоту надходить до неї від фіксації елемента з атмосфери. Решту соя засвоює з ґрунту, що за планування високих врожаїв може спричиняти дефіцит елемента. Водночас підвищений рівень концентрації нітратного азоту в ґрунті може гальмувати процес фіксації азоту [5]. З огляду на це, застосування інокуляції та інгібіторів нітрифікації є важливим предметом наукового зацікавлення [6; 7]. Для методики навчання біології актуальним є перетворення цих закономірностей формування симбіотичного апарату та продуктивності сої [8] у дидактичні моделі для формування природничої компетентності учнів 9 класу [2].

Мета дослідження – теоретично обґрунтувати та розробити методику вивчення симбіозу на уроках біології в 9 класі за допомогою адаптованої моделі соєво-ризобіальних відносин на основі сучасних наукових даних.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати стан висвітлення теми симбіотичних взаємодій у модельних навчальних програмах з біології для базової школи.
2. Розкрити біологічні основи функціонування соєво-ризобіального симбіозу як об’єкта для навчального моделювання.
3. Обґрунтувати методичні засади адаптації наукових даних щодо азотфіксації сої для формування STEM-орієнтованого освітнього контенту.
4. Розробити конспект уроку біології для 9 класу з використанням емпіричних показників динаміки бульбочкоутворення та врожайності сої.

Об’єкт дослідження – процес навчання біології учнів основної школи в умовах реалізації компетентнісного підходу.

Предмет дослідження – методика використання моделі соєво-ризобіальних взаємовідносин як засобу формування природничої компетентності учнів 9 класу.

Методи дослідження:

теоретичні: аналіз нормативних документів, педагогічної та методичної літератури; дидактична трансформація результатів польових експериментів;

емпіричні: педагогічне моделювання, спостереження за освітнім процесом;

математичні: статистичне опрацювання результатів для підтвердження ефективності методики.

Емпірична база дослідження: результати досліджень системи удобрення сої сорту ЕС Ментор, викладені у дисертаційній роботі автора.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та методично обґрунтовано комплекс навчальних завдань для 9 класу, що базуються на реальних показниках симбіотичної активності та біохімічного складу зерна сої. Запропонована методика проведення STEM-уроку дозволяє інтегрувати наукові факти про азотфіксацію у процес формування дослідницьких навичок школярів. Матеріали можуть бути використані вчителями біології та студентами педагогічних спеціальностей.

Структура роботи: випускна кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (65 найменувань). Загальний обсяг роботи 54 сторінки.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВИВЧЕННЯ СИМБІОТИЧНИХ СИСТЕМ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ БІОЛОГІЇ

1.1. Аналіз змісту навчальних програм базової середньої школи щодо вивчення симбіозу як загальнобіологічного явища

Сучасний етап розвитку біологічної освіти в Україні в межах концепції «Нова українська школа» (НУШ) орієнтований на формування цілісної наукової картини світу та розвиток ключових компетентностей учнів [1]. Одним із фундаментальних понять загальної біології є симбіоз – форма взаємодії між організмами різних видів, яка забезпечує стабільність екосистем. Згідно з Державним стандартом базової середньої освіти, під час вивчення біології в 9 класі (тема «Надорганізмові біологічні системи») учні мають не лише знати визначення взаємовигідного співжиття, а й розуміти механізми кругообігу речовин та енергії, у які залучені симбіотичні пари.

Традиційно в шкільних підручниках симбіоз розглядається на описовому рівні. Аналіз чинних підручників для 9 класу (авторів К. М. Задорожного, В. І. Соболя, Л. І. Остапченко, Р. В. Шаламова) дозволяє констатувати, що в освітньому контенті переважають класичні приклади мутуалізму: лишайники, співжиття рака-самітника з актинією або грибів із вищими рослинами. Зокрема, у підручнику Л. І. Остапченко та П. Г. Балана акцент робиться на морфологічних особливостях симбіонтів, тоді як у роботах К. М. Задорожного увага зосереджена на класифікації типів взаємодій. Підручник В. І. Соболя вводить цікаві діяльнісні рубрики, проте навіть у них бракує конкретних кількісних показників, які б ілюстрували інтенсивність обмінних процесів у симбіосистемі. Підручник Р. В. Шаламова містить глибокі проблемні запитання, але вони здебільшого стосуються загальної екології, не заглиблюючись у біотехнологічні аспекти азотфіксації. Таким чином, попри високу якість викладу, наявні підручники не повною мірою реалізують потенціал STEM-освіти, оскільки не надають учням можливості працювати з реальними масивами наукових даних. Різницю між традиційним

та інноваційним підходами до вивчення теми наочно систематизовано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Порівняльна характеристика традиційного та STEM-орієнтованого підходів до вивчення соєво-ризобіального симбіозу в 9 класі

Характеристика	**Традиційний (описовий) підхід (за наявними підручниками)**	**STEM-орієнтований (дослідницький) підхід (пропонована модель)**
Джерело інформації	Текст підручника, класичні схеми та готові визначення.	Первинні наукові дані, емпіричні таблиці та результати польових дослідів.
Характер діяльності учня	Репродуктивний: запам'ятовування фактів, переказ прочитаного матеріалу.	Продуктивний: аналіз даних, розрахунок ефективності, висування та перевірка гіпотез.
Математичний апарат	Не використовується або зведений до мінімуму.	Статистичний аналіз, обчислення відсотків, кореляцій, економічних та енергетичних показників.
Рівень інтеграції	Переважно внутрішньопредметна інтеграція (ботаніка, екологія).	Міжпредметна: біологія, хімія (властивості нітратів), математика, основи економіки.
Екологічний контекст	Теоретичний розгляд наслідків забруднення навколишнього середовища.	Практичний пошук біотехнологічних рішень (використання інгібіторів та мікробних інокулянтів).

Проте для повноцінної реалізації діяльнісного підходу необхідні об’єкти, які дозволяють залучити кількісні параметри та методи математичного аналізу [3]. Соєво-ризобіальна система є ідеальною моделлю для такої трансформації. Як свідчать наукові дані, соя є стратегічно важливою культурою, зерно якої містить високий відсоток білків – близько 35–40%, що вимагає значної кількості азоту для повноцінного живлення порівняно з

іншими рослинами [4–6]. Це створює ідеальну проблемну ситуацію для уроку: звідки екосистема бере таку кількість ресурсу, якщо доступність мінерального азоту в ґрунті часто є лімітуючим фактором?

Аналіз навчальних програм показує, що тема кругообігу нітрогену часто сприймається учнями як надто абстрактна. Використання моделі соєво-ризобіальних відносин дозволяє її безпосередньо матеріалізувати. Учні 9 класу, оперуючи фактами про те, що рослини сої утворюють кореневі бульбочки за допомогою бактерій [7–10], які здатні фіксувати атмосферний N_2 і віддавати його рослині-господарю, отримують можливість дослідити «біологічний бартер». Рослина забезпечує мікроорганізми вуглеводами (енергією), а натомість отримує доступні сполуки азоту.

Для поглиблення STEM-інтеграції у шкільній біології доцільно використовувати економіко-математичні показники, наведені у фахових дослідженнях [11]. Наприклад, залучення статистичних даних про те, що ринкова ціна зерна сої коливається в межах 9000–10000 грн/тонну [12], дозволяє вчителю сформулювати інтегроване завдання: розрахувати економічну доцільність симбіотичної азотфіксації порівняно із закупівлею та внесенням синтетичних добрив. Такі завдання сприяють реалізації наскрізної лінії «Підприємливість та фінансова грамотність», передбаченої концепцією НУШ.

Дані щодо енергетичної ефективності різних систем удобрення наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Показники продуктивності сої як основа для розробки STEM-кейсів у 9 класі [13]

Варіант (Сценарій для моделювання)	Очікувана врожайність, т/га	Енергетичний коефіцієнт	Дидактична мета завдання
Контроль (природний рівень фіксації)	2,12 – 2,23	1,64 – 1,76	Аналіз лімітуючих чинників у природі
Оптимізована система $N_{30}P_{60}K_{60}$	3,01 – 3,22	2,53 – 2,75	Моделювання ідеальних умов екосистеми

Використання таких точних вимірювальних показників у навчальному процесі дозволяє відійти від завченого відтворення тексту до аналізу біологічних закономірностей. Здобувачі освіти можуть переконатися, що нераціональне застосування хімічних азотних добрив (зокрема, прямий контакт нітратів із кореневою системою) зазвичай пригнічує утворення бульбочок і блокує фіксацію азоту [14]. Це стимулює розвиток екологічного мислення, оскільки учні мають самостійно зробити висновок про крихкість симбіотичного апарату та важливість дотримання балансу у втручанні людини в біосферу.

Проведений аналіз чинних програм та підручників біології для базової середньої школи свідчить про наявність значного потенціалу для впровадження моделі соєво-ризобіальних відносин як засобу інтенсифікації навчання. Незважаючи на широке висвітлення теми симбіозу в теоретичному аспекті, практичний та діяльнісний складники потребують оновлення через залучення масивів емпіричних даних із сучасної науки. Транспозиція показників білковості насіння, інтенсивності нодуляції та енергетичної ефективності вирощування сої дозволяє перетворити стандартний урок на повноцінне STEM-дослідження. Це гарантує реалізацію компетентнісного підходу, де рослинний організм виступає складною надорганізмовою

системою, аналізуючи яку учні опановують методологію природничих наук та усвідомлюють значення екологічно безпечних біотехнологій.

1.2. Біологічні основи соєво-ризобіального симбіозу та фізіологія формування симбіотичного апарату

Формування природничої компетентності учнів 9 класу під час вивчення надорганізмових біологічних систем вимагає переходу від простого запам’ятовування фактів до аналізу складних фізіологічних механізмів. Сучасний підхід до викладання біології передбачає розгляд екологічних взаємодій не лише на рівні макроорганізмів, а й на молекулярному, клітинному та тканинному рівнях. Модель соєво-ризобіального симбіозу надає вчителю унікальний інструментарій для створення багаторівневих проблемних ситуацій на уроці. Фундаментальним біологічним протиріччям, яке можна запропонувати школярам для вирішення, є дисбаланс між величезною потребою рослини в поживних речовинах та обмеженими ресурсами середовища.

Зокрема, для синтезу білків, нуклеїнових кислот (ДНК, РНК) та макроергічних сполук (АТФ) соя потребує колосальних обсягів азоту: для продукування однієї тони зерна рослині необхідно асимілювати приблизно 70–90 кг азоту, що майже в чотири рази перевищує аналогічні потреби злакових культур [15]. Використання методу математичного моделювання в біології дозволяє учням простежити лінійну кореляцію ($r = 0,86$) між кількістю накопиченого азоту в пагоні та фінальним урожаєм насіння [14]. Аналіз масиву з 637 опублікованих досліджень доводить, що збільшення азоту в надземній частині рослини на 1 кг забезпечує приріст урожайності на 13 кг, що еквівалентно 77 кг азоту для вирощування однієї тони зерна [16]. Робота з такими кількісними показниками є основою STEM-підходу, оскільки інтегрує біологію з математичною статистикою та формує в учнів навички обробки великих даних (Data Literacy) [17].

Важливим аспектом, який слід розкрити школярам у рамках діяльнісного підходу, є динаміка формування симбіотичного апарату та

складність «молекулярного діалогу» між макро- та мікроорганізмом. Учні мають усвідомити, що симбіоз – це процес, розтягнутий у часі, який ініціюється специфічними хімічними сигналами – флавоноїдами кореневих виділень рослини та Nod-факторами бактерій. Фізіологічні дані свідчать, що від стадії сходів до початкової фази квітування соя встигає засвоїти лише близько 20% від загальної потреби в азоті [16; 18; 19;]. Подальше інтенсивне засвоєння елемента вимагає активної роботи кореневих бульбочок, куди бактерії проникають через інфекційні нитки кореневих волосків. Спочатку нодуляція (утворення бульбочок) відбувається в базальній частині головних коренів, а згодом, під час репродуктивної стадії, переміщується на бічні корені [20] (рис. 1.1).

Дидактична цінність цього матеріалу полягає у можливості пояснити учням біохімічні основи фіксації молекулярного азоту. Ферментний комплекс мікроорганізмів – нітрогеназа, який розриває міцний потрійний зв'язок молекули N_2, є надзвичайно чутливим до кисню і швидко інактивується за його наявності. Для захисту нітрогенази рослина синтезує специфічний білок – леггемоглобін, який зв'язує кисень і надає активним бульбочкам рожевого забарвлення. Це чудовий приклад коеволюції, який вчитель може використати для міжпредметних зв'язків із темою «Дихання людини» (аналогія з гемоглобіном крові).

Для створення когнітивного дисонансу на уроці доцільно використати явище так званого «нітратного парадоксу». Логіка підказує учням: якщо рослині бракує азоту, людина має просто внести хімічні добрива. Проте реальні наукові дані руйнують цей лінійний підхід. Доведено, що високі концентрації мінерального азоту в ґрунті (особливо нітратів) серйозно пригнічують утворення бульбочок і блокують азотфіксацію [21; 22]. Школярам можна запропонувати проаналізувати фізіологічні гіпотези цього явища: виникнення дефіциту вуглеводів у бульбочках (оскільки рослині стає енергетично невигідно «годувати» бактерії цукрами за наявності готового азоту), інгібування процесу за принципом зворотного зв'язку через надлишок уреїдів

(алантоїну та алантоїнової кислоти) та аспарагіну [23], або ж зниження дифузії кисню, що обмежує життєво необхідне дихання бактероїдів [24].



Рис. 1.1. Фізіолого-анатомічна модель формування соєво-ризобіального симбіозу

Щоб довести учням неефективність грубого хімічного втручання в тонкі симбіотичні механізми, вчитель може навести статистику масштабних агроекспериментів. Так, аналіз 5991 показника врожайності у 207 локалітетах показав, що 68% мінливості врожаю залежало від природних умов та ґрунту, тоді як вплив зміни норми внесеного азоту становив менше 1% [25]. Польові дослідження в Айові (США) продемонстрували, що внесення 45 та 90 кг діючої речовини азоту на гектар дало мізерну надбавку до врожаю – лише 39 кг/га, при цьому концентрації протеїну, олії та клітковини в зерні залишилися незмінними [26]. В інших масштабних дослідах усереднене розділене внесення азоту дозволило збільшити врожайність лише на 60–120 кг/га порівняно з контролем без добрив [26]. Ці емпіричні дані є чудовим матеріалом для екологічного виховання: вони доводять школярам, що стимулювання природної азотфіксації є не лише екологічно безпечнішим, а й раціональнішим за використання синтетичних препаратів.

У контексті ознайомлення школярів із сучасними науковими технологіями (елемент профорієнтації у STEM-освіті) варто розглянути методи діагностики стану симбіотичного апарату. Традиційні руйнівні методи поступаються місцем біофізичним технологіям. Зокрема, інтенсивність азотного живлення корелює з активністю хлорофілу, яку можна виміряти за допомогою методу фотоіндукованої флуоресценції живих листків без порушення їхньої нативності [27; 28]. У стані посухи чи азотного голодування знижується стаціонарна енергізованість фотосинтетичних мембран. Це призводить до того, що світлова енергія не використовується на фотосинтез повною мірою, а випромінюється у вигляді флуоресценції, що миттєво фіксується високоточними портативними флуорометрами [29; 30]. Ознайомлення з такими міжпредметними зв’язками (біологія та оптика) формує в учнів розуміння важливості фізичних методів у біологічних дослідженнях та суттєво збагачує природничий світогляд учнів [31].

Отже, біологічні основи соєво-ризобіального симбіозу є потужним

дидактичним підґрунтям для шкільного курсу біології. Використання точних даних щодо динаміки засвоєння азоту, фізіологічного пригнічення нодуляції нітратами та економічної неефективності надмірного штучного удобрення дозволяє вчителю конструювати уроки на засадах проблемного навчання. Інтеграція біохімічних, фізіологічних та біофізичних аспектів симбіозу перетворює теоретичний матеріал на захопливе наукове дослідження для дев'ятикласників, готуючи їх до свідомого розуміння складних екологічних процесів у біосфері.

1.3. Дидактичний потенціал STEM-освіти та діяльнісного підходу у формуванні природничої компетентності учнів

Сучасна парадигма базової середньої освіти в умовах реформування вимагає відмови від фрагментарного, ізольованого вивчення біологічних, хімічних та фізичних процесів на користь їхньої глибокої системної інтеграції. Трансформація традиційного шкільного уроку у справжнє наукове дослідження стає можливою завдяки впровадженню методології STEM-освіти (Science, Technology, Engineering, Mathematics). Модель соєво-ризобіального симбіозу володіє винятковим дидактичним потенціалом для реалізації такого інтегрованого підходу, оскільки органічно поєднує фундаментальні закони природи (біологічна фіксація азоту) із сучасними агроінженерними технологіями (інокуляція, інгібітори) та актуальними екологічними викликами сьогодення [32].

Кожен із компонентів STEM знаходить своє відображення під час роботи з цією моделлю. Наукова складова (Science) розкриває фізіологію макро- та мікроорганізмів; технологічна (Technology) знайомить школярів із біопрепаратами; інженерна (Engineering) вчить конструювати оптимальні моделі агроекосистем із мінімальними втратами ресурсів; а математична (Mathematics) формує навички роботи зі статистикою та розрахунку рентабельності.

Одним із ключових завдань діяльнісного підходу є формування в учнів

9 класу екологічного мислення через глибоке розуміння того, як локальні агрохімічні процеси спричиняють глобальні наслідки для всієї біосфери. З метою створення проблемної ситуації школярам можна запропонувати проаналізувати глобальний екологічний парадокс: в аграрних регіонах світу обсяги асиміляції азоту сільськогосподарськими культурами зросли у два рази, тоді як внесення азотних добрив збільшилося у три рази [33–35]. Учні, застосовуючи базові математичні навички, мають самостійно розрахувати частку втраченого азоту та усвідомити масштаби проблеми. Згідно з точними науковими даними, коефіцієнт використання азотних добрив становить лише від 42 до 47% [36]. Це означає, що понад половина штучно синтезованого та внесеного в ґрунт дороговартісного ресурсу безповоротно втрачається для екосистеми: близько 35–40% випаровується в атмосферу у вигляді аміаку, ще 10% втрачається як закис азоту (N_2O), а 15–25% (рухливі нітрати NO^{3-}) вимиваються у підземні ґрунтові води.

Аналіз цих шляхів втрат азоту дозволяє вчителю біології організувати проблемну дискусію щодо катастрофічних наслідків непродуктивного застосування мінеральних добрив. Здобувачам освіти пропонується дослідити два вектори екологічної небезпеки: від евтрофікації та токсичного забруднення водних екосистем (що призводить до цвітіння водойм, падіння рівня кисню та масової загибелі гідробіонтів) до посилення глобального парникового ефекту через емісію N_2O [37; 38]. Учням варто наголосити, що закис азоту як парниковий газ є майже у 300 разів агресивнішим за вуглекислий газ, що робить проблему його емісії з сільськогосподарських угідь надзвичайно гострою.

Щоб показати учням, як сучасна наука технологічно долає ці виклики (безпосередня реалізація елемента «Technology» у STEM), доцільно ознайомити їх із технологією застосування інгібіторів мікробної активності. Як ілюстрацію школярам пропонується розглянути використання нітрапірину – специфічної бактерицидної субстанції, яка діє на молекулярному рівні. Вона прицільно блокує ензими ґрунтових бактерій роду *Nitrosomonas* (зокрема,

аміномонооксигеназу та нітритоксидоредуктазу) [39; 40]. Завдяки цьому тонкому втручанню природний процес перетворення стабільного амонію на рухливий нітрит призупиняється на критичний період – 8–10 тижнів. Масштабні польові випробування препаратів на основі нітрапірину довели, що їх осіннє застосування збільшує збереження доступного для рослин амонійного азоту на вражаючі 21–63% порівняно з нестабілізованими добривами [41]. Моделювання таких високотехнологічних процесів на уроці формує в учнів розуміння важливості інноваційних біотехнологій для забезпечення сталого розвитку людства, вчить їх шукати рішення на перетині мікробіології та хімії.

Іншим потужним напрямком для реалізації дослідницької діяльності є вивчення ефективності мікробних інокулянтів. Учням важливо зрозуміти фізіологічну ціну симбіозу: фіксація атмосферного азоту – це надзвичайно енергозатратний біохімічний процес розриву міцного потрійного ковалентного зв'язку молекули N_2 за участю унікального білкового комплексу нітрогенази [42]. Отриманий у результаті реакції аміак не засвоюється самими бактеріями, а одразу ж постачається до цитоплазми клітини рослини-господаря. Там він негайно трансформується у нетоксичні транспортні форми – глютамінову кислоту і глютамін, а далі у вигляді уреїдів безпечно транспортується провідною системою (ксилемою) всім організмом сої [43]. Розгляд цього механізму дозволяє поглибити знання учнів з цитології та біохімії, демонструючи красу еволюційних адаптацій.

Щільність ризобій під час сівби (що штучно регулюється мікробіологічними інокулянтами) є критичним фактором успішного старту симбіозу. Наукові досліди беззаперечно підтверджують, що використання якісних інокулянтів збільшує врожайність зерна сої до 25%, суттєво зменшує потребу в хімічних засобах захисту (завдяки підвищенню природного імунітету рослин) та системно підвищує загальну родючість ґрунту [44]. Більше того, розкриваючи концепцію екологічної синергії, вчитель може навести дані про комплексне застосування інокулянтів. Так, використання

азотфіксуючих бактерій разом із фосформобілізуючими мікроорганізмами (наприклад, препарати на кшталт Райс Пі) створює так званий «ефект посилення». Взаємозв'язок тут прямий: для роботи нітрогенази бактеріям потрібна величезна кількість енергії АТФ, основою якої є фосфор. Фосформобілізуючі бактерії здатні вивільняти до 600 мкг/мл неорганічного фосфору з важкодоступних ґрунтових сполук, що врешті-решт збільшує суху масу врожаю від 40 до 134% [45]. У цьому контексті дев'ятикласники можуть проаналізувати висновки провідних учених і самостійно переконатися: інокуляція насіння складними комплексами корисних бактерій може стати не просто доповненням, а повноцінною, екологічно чистою та економічно вигідною альтернативою небезпечним хімічним добривам [46].

Транспозиція цих глибоких наукових даних у шкільний курс забезпечує якісний перехід від пасивного сприйняття абстрактних біологічних термінів до активного конструювання знань. Учні на практиці вчаться працювати з реальними агрономічними статистиками, розуміти приховані хімічні механізми глобальних екологічних проблем та самостійно бачити інженерно-біотехнологічні шляхи їх вирішення [47]. Таким чином, модель соєво-ризобіальних відносин, органічно доповнена даними про дію інгібіторів нітрифікації та фосформобілізуючих інокулянтів, стає ідеальною дидактичною базою для формування комплексного, науково обґрунтованого природничого світогляду сучасної молоді.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СИМБІОЗУ В НАУКОВОМУ ТА ПЕДАГОГІЧНОМУ АСПЕКТАХ

2.1. Програма та методи польових і лабораторних досліджень симбіотичної активності сої як базису для створення навчальних моделей

Проєктування якісного STEM-орієнтованого уроку біології неможливе без використання достовірних, емпірично підтверджених даних. Штучно змодельовані приклади в шкільних підручниках часто не відображають усієї складності природних екосистем, що знижує рівень довіри учнів до навчального матеріалу та обмежує можливості для дослідницької діяльності [48]. З огляду на це, емпіричною базою для розробки нашого навчально-методичного інструментарію слугують результати комплексних польових і лабораторних досліджень систем удобрення сої, проведених та докладно описаних у дисертаційній роботі автора [49].

Використання реальної наукової програми дозволяє продемонструвати учням 9 класу етапи застосування наукового методу: від формування робочої гіпотези до статистичної обробки результатів. Дослідження, що лягли в основу нашої дидактичної моделі, проводилися впродовж 2022–2024 років на базі Львівського національного університету природокористування в умовах Малого Полісся на дерновому глейовому ґрунті [49].

Основним біологічним об’єктом, який пропонується для аналізу школярам, є соя сорту ЕС Ментор. Для створення проблемних завдань щодо впливу біотичних та абіотичних факторів на симбіоз було використано багатоваріантну схему експерименту, яка включала: контроль (без удобрення), фонове внесення фосфорно-калійних добрив ($P_{60}K_{60}$), різні норми та форми азоту (сульфат амонію, амонійна селітра), а також застосування інгібітора нітрифікації N-Lock™ (нітрапірин) у нормі 1,7 л/га [49].

Особливу дидактичну цінність для уроків біології становить застосування біологічних препаратів. У межах наукового експерименту інокуляцію насіння здійснювали препаратами ХайКот Супер Соя, що містить

азотфіксуючі бактерії *Bradyrhizobium japonicum*, та Райс Пі, який містить фосформобілізуючі бактерії *Bacillus amyloliquefaciens* [49]. Аналіз впливу цих мікроорганізмів на врожайність дозволяє учням наочно переконатися у перевагах мікробіологічних технологій над традиційним хімічним удобренням.

Для формування в учнів навичок наукового спостереження доцільно використовувати методики фенологічних спостережень, застосовані в базовому дослідженні: фіксація початку фази розвитку (вступ не менше 10% рослин) та повної фази (75% рослин) [50]. Здобувачі освіти можуть використовувати аналогічні підходи під час виконання шкільних дослідницьких проєктів із пророщування бобових культур.

Реалізація математичного компонента (Mathematics) у рамках STEM-підходу здійснюється шляхом залучення школярів до обчислень за реальними агрохімічними формулами. Наприклад, для оцінки екологічних ризиків під час застосування мінеральних добрив, учням можна запропонувати розрахувати обсяг річного звітрювання парникового газу – закису азоту (N_2O) з ґрунту в атмосферу. Для цього використовується емпірична формула А. Ф. Боумана [51; 52]:

$$EN_2O = 1 + 0.0125 * N_{\text{д.р.}}$$

де $N_{\text{д.р.}}$ – норма удобрення в діючій речовині азоту або запаси нітратів в орному шарі ґрунту [49].

Також інтеграція хімії, математики та екології досягається через обчислення запасів екологічно небезпечних нітратів $3N\text{-}NO_3$ (кг/га) за адаптованою формулою обчислення запасів гумусу [53]:

$$3N - NO_3 = N_N - NO_3 * 0.0001 * 1000 * 1.47 * 20$$

де N_N–NO_3 – вміст N–NO_3 в орному (0–20 см) шарі ґрунту у мг/кг; 1,47 – щільність орного шару модельного ґрунту у г/см^3; 20 – товщина орного шару в сантиметрах [49]. Рівень нітратів у самому дослідженні визначався високоточним потенціометричним методом за допомогою йонселективного

електрода [54], що демонструє учням застосування сучасних біофізичних приладів.

Таким чином, програма та методи базового дисертаційного дослідження надають вичерпний масив верифікованих статистичних, фенологічних та агрохімічних даних. Їхня адаптація гарантує наукову достовірність створюваних дидактичних моделей і забезпечує ефективну трансформацію складного наукового інструментарію у доступні навчальні кейси для формування дослідницької компетентності учнів.

2.2. Методологія адаптації наукових (агрономічних) даних для формування освітнього контенту в курсі біології 9 класу

Перенесення здобутків фундаментальної та прикладної науки у шкільну практику вимагає застосування методології дидактичної транспозиції – цілеспрямованої адаптації наукового знання до вікових та когнітивних особливостей учнів без втрати його академічної достовірності [55]. Зважаючи на те, що базове дисертаційне дослідження має яскраво виражений агрономічний характер і містить складний статистичний апарат, пряме перенесення цих матеріалів на урок біології у 9 класі є недоцільним. Тому нами було розроблено специфічну методологію адаптації емпіричного масиву даних [49], яка базується на чотирьох ключових принципах.

Першим принципом є наукова автентичність із спрощенням форми подачі. Під час конструювання освітнього контенту всі кількісні показники (наприклад, норми внесення добрив, маса симбіотичних бульбочок, рівень нітратів у ґрунтовому профілі) зберігаються у незмінному вигляді. Проте складні багатофакторні дисперсійні аналізи та вузькоспеціалізована термінологія (наприклад, деталі калібрування сільськогосподарської техніки) вилучаються. Замість цього акцент робиться на виявленні чітких лінійних чи нелінійних кореляцій між біотичними та абіотичними чинниками, що є доступними для розуміння п’ятнадцятирічними підлітками.

Другий принцип полягає у суворому відборі даних крізь призму вимог

Державного стандарту базової середньої освіти. Для ілюстрації теми «Надорганізмові біологічні системи» з усього масиву дисертаційного дослідження [49] відбираються лише ті блоки, які демонструють механізми кругообігу речовин та екологічну пластичність симбіозу. Наприклад, детальний агрохімічний опис дернового глейового ґрунту спрощується до поняття «середовище існування», натомість дані щодо інгібування процесу нодуляції надлишком нітратів стають центральним елементом для вивчення екологічних лімітуючих факторів.

Третім принципом є застосування методу візуального та математичного моделювання, що є основою STEM-підходу. Сирі дані з класичних академічних таблиць (наприклад, динаміка накопичення азоту чи показники врожайності) трансформуються в інтерактивні графіки, діаграми та інфографіку. Це дозволяє реалізувати математичну галузь STEM-освіти: здобувачі освіти самостійно аналізують графічні тренди, екстраполюють дані та роблять висновки щодо ефективності азотфіксації [56]. Робота з перетвореними візуальними моделями сприяє формуванню природничої компетентності, оскільки учні працюють з інформацією так, як це роблять сучасні науковці-аналітики.

Четвертий принцип – проблематизація наукового факту. У межах діяльнісного підходу кінцевий висновок дисертації має стати початковою гіпотезою для учня. Якщо наукове дослідження констатує факт підвищення ефективності збереження амонію на 21–63% завдяки застосуванню нітрапірину [49], вчитель не подає цю інформацію у готовому вигляді. Замість цього учням надається фрагмент даних про масштаби втрат ґрунтового азоту через вимивання та емісію газів, після чого ставиться проблемне запитання: «Яким чином можна технологічно заблокувати ферментативну активність нітрифікуючих бактерій без шкоди для симбіотичних ризобій?». Лише після висунення учнями власних гіпотез (інженерне мислення) їм демонструються результати реального польового експерименту [57].

Алгоритм дидактичної транспозиції наукового знання представлено на рисунку 2.1



Рис. 2.1. Алгоритм дидактичної транспозиції наукового знання

Запропонована методологія адаптації дозволяє органічно інтегрувати високоточні емпіричні дані про соєво-ризобіальний симбіоз у шкільний курс біології. Вона забезпечує перетворення вузькоспеціалізованих агрономічних результатів на потужний дидактичний інструментарій, здатний активізувати пізнавальну діяльність дев'ятикласників та сформувати в них навички наукового аналізу природних процесів.

2.3. Обґрунтування методів діагностики рівня сформованості природничої компетентності учнів під час вивчення теми

Впровадження компетентнісного підходу в Новій українській школі зумовлює суттєві зміни не лише в методології викладання, а й у системі оцінювання навчальних досягнень учнів. Діагностика природничої компетентності під час вивчення надорганізмових біологічних систем у 9 класі вимагає відмови від традиційного репродуктивного тестування (на відтворення завчених термінів) на користь комплексного оцінювання здатності школярів застосовувати знання на практиці [58]. Оскільки навчальна діяльність будується на основі моделі соєво-ризобіального симбіозу з використанням

наукових емпіричних даних, інструментарій оцінювання має бути адаптований до формату STEM-навчання.

Основним методом діагностики під час роботи з науковими моделями стає формувальне оцінювання. На відміну від підсумкового, воно спрямоване на відстеження динаміки навчального поступу кожного учня безпосередньо в процесі виконання дослідницьких завдань. Учитель оцінює не лише правильність кінцевої відповіді, а й самі етапи наукового пошуку: здатність самостійно сформулювати гіпотезу щодо причин пригнічення нодуляції за надлишку нітратів, коректність роботи з емпіричними таблицями врожайності, вміння знаходити кореляції між дозою добрив та енергетичним коефіцієнтом [59]. Формувальне оцінювання здійснюється через постійний зворотний зв'язок (фідбек), спостереження за груповою роботою та використання чек-листів самооцінювання.

Дієвим інструментом перевірки сформованості дослідницьких навичок є застосування компетентнісних завдань у форматі міжнародного дослідження якості освіти PISA. Замість прямих запитань («Що таке азотфіксація?» або «Які бактерії живуть на коренях сої?»), учням пропонуються контекстні задачі з відкритою формою відповіді на основі наведеного масиву даних. Наприклад, школярам надається графік залежності маси бульбочок від дози внесених азотних добрив, після чого вони мають:

1. науково пояснити причини негативної кореляції з точки зору фізіології мікроорганізмів;
2. спрогнозувати наслідки для екосистеми;
3. запропонувати технологічну альтернативу (наприклад, використання мікробних інокулянтів чи інгібіторів нітрифікації).

Такий формат дозволяє надійно діагностувати всі три складники природничо-наукової грамотності за рамкою PISA: здатність науково пояснювати явища, застосовувати методи природничо-наукового дослідження та інтерпретувати дані й докази [60].

Для об’єктивізації процесу оцінювання результатів вирішення міжпредметних STEM-кейсів розробляються спеціальні багатокритеріальні матриці (рубрики). Вони охоплюють відразу кілька аспектів навчальної діяльності:

- *біологічний* (розуміння механізмів обміну речовин та енергії в симбіотичній парі);
- *математичний* (точність розрахунків економічної рентабельності застосування біопрепаратів або обсягів емісії закису азоту);
- *комунікативний* (здатність аргументовано захистити свою позицію під час презентації результатів).

Отже, комплексне застосування методів формувального оцінювання, компетентнісних завдань PISA-формату та критеріальних матриць забезпечує високу валідність діагностики. Це дозволяє вчителю біології не лише зафіксувати рівень засвоєння теми «Надорганізмові біологічні системи», але й вчасно скоригувати освітній процес, забезпечуючи максимальну ефективність реалізації діяльнісного підходу.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ УРОКУ БІОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ СОЄВО-РИЗОБІАЛЬНИХ ВІДНОСИН

3.1. Дидактичні умови та методичний інструментарій організації проблемного навчання на уроках біології

Трансформація змісту загальної середньої освіти в контексті реалізації концепції «Нова українська школа» (НУШ) вимагає від учителя біології докорінного перегляду традиційних підходів до організації освітнього процесу. Перехід від знаннєво-репродуктивної парадигми до компетентнісної зумовлює необхідність впровадження педагогічних технологій, які б не лише забезпечували засвоєння фактологічного матеріалу, а й стимулювали розвиток вищих когнітивних функцій учнів: критичного мислення, здатності до аналізу, синтезу та оцінювання інформації. Однією з найбільш ефективних технологій, що відповідає цим вимогам під час вивчення курсу біології у 9 класі, є технологія проблемного навчання.

Сутність проблемного навчання полягає у цілеспрямованому створенні вчителем серії проблемних ситуацій та організації керованої самостійної діяльності учнів щодо їх вирішення. З психолого-педагогічної точки зору, для учнів 9 класу (віком 14–15 років) характерний перехід до концептуального мислення. У цьому віці підлітки втрачають інтерес до простого запам’ятовування абстрактних істин і потребують доказової бази, практичного застосування знань та можливості дискутувати [61]. Саме тому вивчення такої складної теми, як надорганізмові біологічні системи та кругообіг речовин, не може обмежуватися трансляцією готових висновків. Використання моделі соєво-ризобіальних відносин створює ідеальне епістемологічне підґрунтя для реалізації проблемного підходу, оскільки феномен мутуалізму за своєю природою є еволюційним вирішенням складної біологічної проблеми виживання в умовах лімітованих ресурсів.

Для того щоб організація проблемного навчання на уроках біології була

максимально ефективною та сприяла формуванню природничої компетентності, необхідно забезпечити дотримання комплексу дидактичних умов.

Першою та фундаментальною дидактичною умовою є створення глибокого когнітивного дисонансу на основі достовірних наукових фактів. Проблемна ситуація виникає тоді, коли учень стикається з протиріччям між наявними знаннями та новими фактами, які він не може пояснити за допомогою свого попереднього досвіду. Учитель конструює це протиріччя, спираючись на екологічний парадокс: атмосфера Землі майже на 78% складається з азоту (N_2), проте цей елемент є найбільш дефіцитним лімітуючим фактором для росту рослин у наземних екосистемах. Для посилення дисонансу залучаються точні наукові дані: наприклад, демонструється, що соя для формування однієї тонни зерна потребує асиміляції колосальної кількості азоту – від 70 до 90 кг, що приблизно в чотири рази більше, ніж показники потреби звичайних не бобових зернових культур [62]. Усвідомлення учнями того факту, що рослина фізично не здатна розірвати потрійний ковалентний зв’язок атмосферного азоту, ставить перед ними чітку дослідницьку проблему: яким чином надорганізмова система долає цей еволюційний бар’єр? Це запитання стає тригером для внутрішньої пізнавальної мотивації.

Другою невід’ємною дидактичною умовою є забезпечення чіткого прикладного спрямування навчального матеріалу. Впровадження STEM-освіти передбачає, що наука (Science) розглядається у нерозривному зв’язку з технологіями та інженерією. Завдяки адаптації матеріалів фахових агрономічних досліджень, проведених в умовах Малого Полісся та Західного Лісостепу [49], проблемна ситуація набуває рис реального виробничого кейсу. Учням пропонується розглянути симбіоз не лише як біологічний феномен, але і як потужний біотехнологічний інструмент. Школярі дізнаються про катастрофічні масштаби втрат синтетичного азоту: до 35-40% може вивітрюватися у вигляді аміаку, 15–25 % вимивається у вигляді токсичних

нітратів, а ще 10% перетворюється на парниковий газ – закис азоту (N_2O) [49]. Аналіз цих даних дозволяє розширити межі уроку, перетворюючи його на міжпредметний дискусійний майданчик, де обговорюються питання екологічної безпеки, продовольчої кризи та рентабельності використання мікробних інокулянтів [63].

Третьою умовою є опора на потужний емпіричний базис та використання сучасного дослідницького інструментарію. Проблемне навчання неможливе без надання учням інструментів для перевірки своїх гіпотез. Замість готових відповідей у параграфах підручника, здобувачі освіти отримують масиви первинних даних, представлені у вигляді адаптованих таблиць, кореляційних матриць та графіків. Це дозволяє вчителю інтегрувати у канву уроку такі методичні інструменти:

- Евристична бесіда (сократівський діалог): метод спільного пошуку істини, під час якого вчитель за допомогою серії логічно пов’язаних запитань підводить учнів до розуміння складних фізіологічних процесів. Наприклад, обговорення молекулярного діалогу між рослиною та бактеріями, де ризобії постачають аміак, а натомість отримують від рослини-господаря енергію у вигляді вуглеводів, необхідну для роботи ферменту нітрогенази.
- Кейс-метод (Case-study): аналіз конкретних науково-виробничих ситуацій. Учням може бути запропоновано роль агрономів-дослідників, які мають прийняти рішення щодо доцільності застосування високих доз нітратних добрив. Спираючись на дані про те, що мінеральний неорганічний азот серйозно пригнічує утворення симбіотичних бульбочок та блокує азотфіксацію [49], школярі мають науково обґрунтувати відмову від надмірного хімічного втручання на користь збереження симбіотичного апарату.
- STEM-моделювання та основи Data Science: залучення школярів до роботи з математичними моделями біологічних процесів. Учитель може продемонструвати наявність чіткої лінійної кореляції ($r = 0,86$) між урожаєм зерна та кількістю накопиченого азоту в пагоні [14]. Аналіз таких

закономірностей формує навички роботи з великими даними та статистикою, що є невід'ємною частиною сучасної природничо-наукової грамотності.

Отже, застосування моделі соєво-ризобіальних відносин у тісній синергії з технологією проблемного навчання забезпечує докорінну зміну дидактичного ландшафту уроку біології. За дотримання описаних дидактичних умов та використання широкого арсеналу методичного інструментарію, вчитель перестає бути єдиним джерелом істини, перетворюючись на фасилітатора дослідницької діяльності. Учні, зі свого боку, отримують можливість пройти повний цикл наукового пізнання: від зіткнення з проблемою та формулювання гіпотези до аналізу емпіричних даних і генерування науково обґрунтованих висновків.

3.2. Розробка конспекту STEM-уроку з аналізу соєво-ризобіальної азотфіксації для 9 класу

Перехід від теоретичного обґрунтування до практичної реалізації вимагає розробки чіткого дидактичного інструментарію. Нижче наведено розгорнутий план-конспект (сценарій) здвоєного STEM-уроку біології для 9 класу, який базується на адаптованих результатах польових та лабораторних досліджень автора. Урок побудований за технологією проблемного навчання у форматі рольового дослідницького симпозіуму.

ПАСПОРТ УРОКУ

Цільова аудиторія: 9 клас (вік 14–15 років).

Тема за програмою: Надорганізмові біологічні системи. Екологічні фактори. Ланцюги живлення і кругообіг речовин.

Тема STEM-уроку: «Агробіологічний кейс: Хімія проти Природи. Дослідження ефективності соєво-ризобіального симбіозу».

Тривалість: 90 хвилин (здвоєний урок / бінарне заняття).

Тип уроку: Урок формування та вдосконалення компетентностей (урок-

практикум).

STEM-компоненти: * *Science (Наука):* фізіологія рослин, мікробіологія, екологія симбіозу.

– *Technology (Технології):* біопрепарати (інокулянти), інгібітори нітрифікації.
– *Engineering (Інженерія):* конструювання оптимальної агроекосистеми з мінімальними втратами ресурсів.
– *Mathematics (Математика):* статистичний аналіз графіків, розрахунок економічної рентабельності.

Очікувані результати навчання (за Державним стандартом): Учень/учениця пояснює суть симбіозу; аналізує емпіричні дані, подані у вигляді таблиць та графіків; встановлює причиново-наслідкові зв’язки між абіотичними факторами (надлишок нітратів) та станом біосистеми; здійснює елементарні економіко-екологічні розрахунки; презентує результати власного дослідження.

Обладнання та матеріали: мультимедійний проєктор, роздруковані робочі аркуші (кейси) з масивами даних для трьох експертних груп, калькулятори, ватмани (або онлайн-дошка Jamboard/Miro) для візуалізації висновків.

СЦЕНАРІЙ ТА ХІД УРОКУ

ЕТАП І. Орієнтація, мотивація та створення когнітивного дисонансу (15 хв.)

Діяльність учителя (Вступне слово):

«Доброго дня, юні дослідники! Сьогодні ми працюємо не у форматі звичайного шкільного класу, а у форматі науково-аналітичного центру. Тема нашого засідання стосується проблеми, яка може призвести до глобальної продовольчої кризи або, навпаки, врятувати планету від хімічного забруднення.

Погляньте на екран. Перед вами кругова діаграма складу атмосфери Землі (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Кругова діаграма складу атмосфери Землі

Майже 78% повітря, яким ми дихаємо, – це молекулярний азот (N_2). Водночас рослини на полях масово страждають від азотного голодування. Наприклад, щоб сформувати всього 1 тонну насіння сої, рослині необхідно «з'їсти» 70–90 кг азоту [49]. Уявіть парадокс: рослина буквально купається в азоті, але «вмирає від голоду».

Запитання до аудиторії: Чому рослина не може засвоїти азот прямо з повітря?»

Очікувані відповіді учнів: (пригадуючи хімію) Молекула N_2 має дуже міцний потрійний ковалентний зв'язок, який рослина не має змоги розірвати.

Учитель: «Абсолютно правильно. Традиційне рішення агрономів – засипати поле хімічними азотними добривами (нітратами). Але сучасна наука стверджує: хімія руйнує екосистему. Природа мільйони років тому винайшла власний біотехнологічний завод – симбіоз бобових рослин і бульбочкових бактерій (ризобій) (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Колонії бульбочкових бактерій на кореневій системі сої

Ваше завдання сьогодні: спираючись на реальні дані польових експериментів, проведених у Малому Поліссі, довести або спростувати гіпотезу про те, що природний симбіоз ефективніший та вигідніший за штучне хімічне удобрення».

ЕТАП ІІ. Цілепокладання та поділ на експертні групи (10 хв.)

Учитель об’єднує клас у три дослідницькі групи за принципом випадкового або цільового розподілу. Кожна група отримує специфічну роль та власний «Робочий аркуш» (Data Sheet) із реальними даними з дисертаційного дослідження.

- **Група 1: «Мікробіологи»** (досліджують фізіологію бульбочок та нітратний парадокс).
- **Група 2: «Екологи-Агрохіміки»** (досліджують втрати азоту та дію інгібіторів).
- **Група 3: «Біоекономісти»** (досліджують кінцеву врожайність та рентабельність інокулянтів).

ЕТАП ІІІ. Самостійна STEM-дослідницька діяльність груп (30 хв.)

Учитель виступає фасилітатором: переміщується між групами, не дає прямих відповідей, а ставить навідні запитання. Нижче наведено детальний зміст роздаткових матеріалів для кожної групи.

РОБОЧИЙ АРКУШ ГРУПИ №1: «МІКРОБІОЛОГИ»

Ваша мета: З'ясувати, як наявність мінерального азоту в ґрунті впливає на розвиток симбіозу, і оцінити дію біопрепаратів (інокулянтів).

Блок даних 1 (Нітратний парадокс)

Учені H. Fujikake та N. Yamashita проводили досліди на гідропоніці. В умовах без азоту діаметр кореневої бульбочки сої збільшувався з 1 мм до 6 мм упродовж 2 тижнів [49]. Проте, після подачі нітрату (хімічного добрива) ріст бульбочок повністю зупинявся. Механізм цього явища пов'язаний із тим, що рослина припиняє подавати бактеріям фотоасиміляти (вуглеводи). Але коли нітрат прибирали з розчину, ріст бульбочок швидко відновлювався.

Блок даних 2 (Результати польових дослідів)

Для проведення аналізу скористайтеся наведеними нижче результатами польових досліджень (таблиця 3.1), які демонструють вегетаційну динаміку формування симбіотичного апарату сої (на основі адаптованих даних [49]).

Таблиця 3.1.

Маса активних бульбочок на коренях сої у період бутонізації-квітування залежно від систем удобрення та інокуляції, г/рослину (адаптовано для навчального кейсу)

Варіант досліду (система удобрення / біопрепарат)	Фаза бутонізації, г	Фаза квітування, г	Приріст маси, г
1. Контроль (без мінеральних добрив)	0,22	0,45	+ 0,23
2. Фон $P_{60}K_{60}$ (без азоту)	0,30	0,50	+ 0,20
3. Фон + N_{30} (сульфат амонію)	0,32	0,54	+ 0,22
4. Фон + N_{30} + інгібітор нітрифікації N-Lock	0,42	0,70	+ 0,28
5. Фон + N_{30} + інокулянт ХайКот Супер Соя	0,45	0,78	+ 0,33
6. Комплексна інокуляція (ХайКот Супер + Райс Пі)	0,49	0,82	+ 0,33

Ваші дослідницькі завдання:

1. Поясніть «нітратний парадокс»: чому рослина сої «відмовляється» годувати бульбочкові бактерії цукрами, якщо людина вносить у ґрунт багато нітратних добрив? (Підказка: чи вигідно рослині витрачати енергію на симбіоз, якщо азот лежить готовий?)
2. Побудуйте на ватмані стовпчасту діаграму, яка порівнює масу бульбочок: N_{30} (0,26 г) / ХайКот (0,78 г) / ХайКот+Райс Пі (0,82 г).
3. Зробіть науковий висновок: що є кращим стимулятором симбіотичного апарату – хімічне добриво чи біологічна інокуляція насіння?

РОБОЧИЙ АРКУШ ГРУПИ №2: «ЕКОЛОГИ-АГРОХІМІКИ»

Ваша мета: Дослідити екологічну доцільність застосування інгібіторів мікробної активності для збереження азоту.

Блок даних 1 (Проблема втрат):

Азотні добрива легко втрачаються з ґрунту. Мікроби-нітрифікатори швидко перетворюють амоній на нітрати, які вимиваються у ґрунтові води, отруюючи їх.

Блок даних 2 (Рішення - Інгібітори):

В експерименті використовували препарат N-Lock™ (діюча речовина – нітрапірин, 1,7 л/га) [49]. Це бактеріостатик, який тимчасово (на 8–10 тижнів) пригнічує ґрунтові бактерії, що перетворюють азот на рухливі нітрати.

- *Ситуація А:* Звичайна система удобрення $N_{30}P_{60}K_{60}$ 2023 року забезпечила врожайність 3,69 т/га [49].
- *Ситуація Б:* Та ж сама система + нітрапірин ($N_{30}P_{60}K_{60}$ + N-Lock) забезпечила 4,02 т/га [49].

Надвишка від простого блокування вимивання азоту склала 0,33 т/га [49].

Ваші дослідницькі завдання:

1. Проаналізуйте дані: яким чином препарат, що *пригнічує* одні бактерії (нітрифікатори), допомагає рослині та іншим, корисним бактеріям (ризобіям)?
2. Обчисліть відсоток приросту врожаю у Ситуації Б порівняно із Ситуацією А.
3. Зробіть екологічний висновок: чому використання інгібітора нітрифікації є більш екологічним підходом, ніж просто постійне збільшення доз хімічних добрив до N_{60} чи N_{90}?

РОБОЧИЙ АРКУШ ГРУПИ №3: «БІОЕКОНОМІСТИ»

Ваша мета: Провести математичний та економічний аналіз ефективності різних систем удобрення на основі даних трирічних польових досліджень (2022–2024 рр.).

Блок даних (Середня врожайність сої за 3 роки, т/га):

Для розрахунку фінансової та енергетичної ефективності використайте матрицю врожайності за три роки (таблиця 3.2), сформовану на базі дернового

глибокого глейового ґрунту [49].

Таблиця 3.2

Врожайність зерна сої залежно від системи удобрення та застосування препаратів (середнє за 2022-2024 рр.), т/га

№	Варіант досліду (Специфікація живлення)	Врожай, т/га	Відхилення від контролю, ± т/га	Відхилення від фону, ± т/га
1	Контроль – без удобрення	2,81	–	–
2	Фон – $P_{60}K_{60}$ (під оранку)	3,03	+ 0,22	–
3	Фон + N_{30} (сульфат амонію перед сівбою)	3,55	+ 0,74	+ 0,52
4	Фон + N_{30} (сульфат амонію) + нітрапірин	3,66	+ 0,85	+ 0,63
5	Фон + N_{30} (перед сівбою) + N_{30} (бутонізація)	3,67	+ 0,86	+ 0,64
6	Фон + N_{30} + нітрапірин + N_{30} (бутонізація)	3,90	+ 1,09	+ 0,87
7	Фон + N_{30} (амонійна селітра)	3,41	+ 0,60	+ 0,38
8	Фон + N_{30} (амонійна селітра) + нітрапірин	3,59	+ 0,78	+ 0,56
9	Фон + N_{30} + нітрапірин + N_{30} (бутонізація)	3,79	+ 0,98	+ 0,76
10	Фон + N_{30} + N-мобілізуючі бактерії (ХайКот)	3,90	+ 1,09	+ 0,87
11	Фон + N_{30} + P-мобілізуючі бактерії (Райс Пі)	3,75	+ 0,94	+ 0,72
12	Фон + N_{30} + Комплекс (ХайКот + Райс Пі)	3,95	+ 1,14	+ 0,92

Економічна довідка:

Середня закупівельна ціна 1 тонни сої становить 10 000 грн.

Ваші дослідницькі завдання:

1. Розрахуйте абсолютний приріст врожаю (у тоннах на гектар) для Варіанта 3 (хімія) та Варіанта 12 (біологія) відносно Варіанта 1 (контролю).
2. Переведіть цей приріст у грошовий еквівалент (грн/га). Розрахуйте, на скільки гривень біологічний підхід (інокулянти) виявився прибутковішим за суто хімічний підхід.
3. Підготуйте тезисну доповідь для «Міністерства аграрної політики»: чому держава повинна субсидувати (підтримувати) використання біологічних препаратів (ризобій) замість хімічних заводів з виробництва селітри?

ЕТАП IV. Презентація результатів та Науковий симпозіум (20 хв.)

Кожна група має до 5 хвилин на презентацію своїх висновків (захист проєкту). Учитель модерує дискусію.

Фрагмент очікуваного діалогу під час захисту (Скрипт):

Спікер від Мікробіологів: «Ми дослідили нітратний парадокс. Наші графіки показують, що внесення готових нітратів у ґрунт змушує сою «лінуватися». Вона припиняє живити бактерії цукрами, і ріст бульбочок зупиняється на 6 мм. Натомість обробка насіння бактеріями (інокулянтами) без зайвої хімії збільшила масу бульбочок з 0,26 г до 0,82 г. Висновок: симбіоз працює ідеально лише тоді, коли ми не перегодовуємо рослину штучно».

Спікер від Екологів: «Ми підтверджуємо слова колег. Більше хімії – більше шкоди. Наші дані свідчать, що азот з добрив просто вимивається. Але якщо застосувати інгібітор нітрифікації N-Lock, який тимчасово «присипляє» шкідливі ґрунтові бактерії, врожайність стрибає з 3,69 до 4,02 т/га лише за рахунок збереження існуючого ресурсу! Екологічний висновок: треба зберігати те, що є, а не сипати нове».

Спікер від Біоекономістів: «Економіка ставить крапку в цій дискусії.

Хімічне добриво дало приріст врожаю 0,74 т/га (3,55 - 2,81). У грошах це 7400 грн додаткового прибутку з гектара. А ось використання біопрепаратів (ризобій та фосфорних бактерій) дало врожай 3,95 т/га, тобто приріст 1,14 т/га! Це 11 400 грн з гектара. Біологія виявилася на 4000 грн з гектара прибутковішою за чисту хімію!».

Учитель (Підсумок): «Блискуча аналітика! Ви щойно, оперуючи даними реальної наукової дисертації, довели фундаментальний закон екології та економіки: співпраця (симбіоз) завжди ефективніша за пряме втручання. Бактерії роблять ту роботу, яку не може зробити найсучасніший хімічний завод, причому роблять це безкоштовно і без шкоди для довкілля».

ЕТАП V. Рефлексія та формувальне оцінювання (15 хв.)

На фінальному етапі вчитель застосовує інструменти формувального оцінювання. Замість виставлення традиційних балів за переказ тексту, оцінюється внесок кожного учня у розв’язання STEM-кейсу. Учні заповнюють листи самооцінювання, де рефлексують над труднощами, які виникли під час аналізу графіків чи розрахунку відсотків.

Розроблений конспект STEM-уроку демонструє, як вузькоспеціалізований агрономічний масив даних [49] успішно дидактично транспозується у формат захопливого шкільного дослідження, забезпечуючи формування предметної (біологічної) та ключових (математичної, екологічної, підприємницької) компетентностей дев’ятикласників.

3.3. Критерії та методики оцінювання навчальних досягнень учнів на основі вирішення кейсових завдань

Завершальним та критично важливим етапом методичного проєктування навчального процесу є розробка валідної та прозорої системи оцінювання. В умовах впровадження компетентнісного підходу НУШ оцінювання перестає бути лише інструментом контролю, перетворюючись на засіб стимулювання навчальної діяльності та корекції освітньої траєкторії

учня. Оцінювання результатів роботи дев’ятикласників із моделлю соєво-ризобіального симбіозу вимагає особливого підходу, оскільки традиційні п’ятибальні або навіть дванадцятибальні шкали, зорієнтовані на відтворення знань, не здатні повноцінно відобразити рівень сформованості STEM-компетентностей [64].

Методологія багатокритеріального оцінювання

Для діагностики успішності вирішення агробіологічних кейсів нами пропонується методика критеріальних матриць (рубрик), яка дозволяє диференціювати досягнення учня за декількома незалежними параметрами: когнітивним (біологічна грамотність), праксеологічним (дослідницькі та математичні навички) та аксіологічним (екологічні цінності та ставлення). Такий підхід забезпечує об’єктивність оцінювання під час групової та індивідуальної роботи над даними дисертаційного дослідження [49].

Нижче наведено розгорнуту дескрипторну таблицю оцінювання результатів вирішення STEM-кейсу «Агробіологічний кейс: Хімія проти Природи» (табл. 3.1). Кожен рівень навчальних досягнень деталізовано через конкретні очікувані дії учня.

Таблиця 3.1

Критеріальна матриця оцінювання навчальних досягнень учнів 9 класу за результатами роботи з моделлю симбіозу

Критерій оцінювання	Початковий рівень (1-3 бали)	Середній рівень (4-6 балів)	Достатній рівень (7-9 балів)	Високий рівень (10-12 балів)
Біологічна грамотність (Science)	Учень називає термін «симбіоз», але не може пояснити його механізм на прикладі сої.	Пояснює суть взаємозв'язків між соєю та ризобіями, опираючись на текст підручника.	Аналізує фізіологічні причини «нітратного парадоксу», використовуючи наукові факти.	Пропонує власні гіпотези щодо еволюційної вигоди симбіозу в умовах лімітованих ресурсів середовища.
Математична компетентність (Mathematics)	Допускає помилки у простих обчисленнях врожайності.	Правильно обчислює приріст врожаю в тоннах, але не може перевести його у відсотки.	Здійснює складні розрахунки енергетичної ефективності та фінансової вигоди інокулянтів.	Проводить кореляційний аналіз між масою бульбочок та кінцевим збором білка, робить математичні прогнози.
Екологічне мислення	Усвідомлює, що мінеральні добрива можуть бути шкідливими.	Називає основні шляхи втрат азоту з ґрунту (вимивання, вивітрювання).	Аргументує доцільність використання інгібіторів нітрифікації для сталого розвитку агросфери.	Моделює наслідки антропогенного впливу на кругообіг Нітрогену та обґрунтовує пріоритетність біометоду.
Комунікація та командна робота	Малоактивний у групі, виконує лише механічні завдання.	Бере участь в обговоренні, але не висуває власних ідей під час презентації.	Ефективно співпрацює, чітко презентує один із блоків дослідження групи.	Виступає модератором дискусії, аргументовано захищає висновки групи перед «опонентами».

Технологія формувального оцінювання та рефлексії

У межах реалізації концепції НУШ особлива увага приділяється формувальному оцінюванню, яке допомагає учневі усвідомити свій дефіцит

знань без страху перед «поганою оцінкою». Під час проведення уроку за нашою методикою вчитель застосовує інструмент «Картка самодіагностики дослідника» (табл. 3.2). Це дозволяє реалізувати суб'єкт-суб'єктну взаємодію в освітньому процесі [65].

Таблиця 3.2

Робочий лист саморефлексії учня (приклад)

Питання для самоаналізу	**Моя оцінка (від 1 до 5)**	**Що саме викликало найбільші труднощі?**
Чи зміг я зрозуміти, чому нітрати зупиняють ріст бульбочок сої?		
Наскільки впевнено я користувався калькулятором під час розрахунку врожайності?		
Чи був мій внесок у роботу групи корисним для фінального висновку?		
Який факт із наукового дослідження вразив мене найбільше?		

Діагностика через «Зворотне конструювання»

Одним із найбільш ефективних методів перевірки глибинного розуміння теми є метод «Створення анти-кейсу». Учням, які досягли високого рівня, пропонується завдання: «Уявіть, що ви – агроконсультант, який хоче навмисно знищити симбіотичний апарат сої та виснажити бюджет господарства. Які помилки в системі удобрення ви порекомендуєте зробити фермеру?». Здатність учня логічно обґрунтувати шкідливість надмірних норм амонійної селітри (понад N_{60}) або ігнорування інокуляції [49] є вищим показником сформованості природничої компетентності, ніж просте відтворення тексту.

Оцінювання математичної складової (STEM-інтеграція)

Особливе значення в нашій методиці має оцінювання здатності учня працювати з цифровими даними. Враховуючи, що в дисертації автора наведено дані про надвишку врожаю від інокулянтів на рівні 0,40–0,50 т/га

[49], учень має не просто назвати ці цифри, а пояснити їх через призму похибки вимірювання $НІР_{05}$ = 0,15). Це вимагає від учня 9 класу початкових навичок розуміння статистичної значущості результату, що є важливим елементом наукової грамотності.

Підсумовуючи, слід зазначити, що запропонована система оцінювання на основі кейсових завдань та критеріальних матриць дозволяє вчителю біології отримати багатовимірну картину навчальних досягнень учнів. Вона стимулює школярів до глибокого занурення в емпіричні дані [49], перетворюючи оцінку з вироку на дорожню карту власного інтелектуального розвитку в галузі природничих наук.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного теоретичного та емпіричного дослідження, спрямованого на вирішення проблеми модернізації біологічної освіти в базовій середній школі шляхом впровадження моделі соєво-ризобіальних відносин, виконано всі поставлені завдання та сформульовано такі загальні висновки:

1. На основі ґрунтовного аналізу Державного стандарту базової середньої освіти та чинних модельних навчальних програм з біології встановлено, що сучасна парадигма концепції «Нова українська школа» (НУШ) вимагає переходу від репродуктивного засвоєння знань до формування цілісної природничої компетентності учнів. Виявлено, що традиційний зміст шкільних підручників під час вивчення теми «Надорганізмові біологічні системи» (9 клас) розкриває явище симбіозу переважно на описовому, якісному рівні, що суттєво обмежує можливості для реалізації діяльнісного та STEM-підходів. Доведено, що використання моделі соєво-ризобіального симбіозу дозволяє подолати цю дидактичну прогалину, матеріалізуючи абстрактні поняття кругообігу Нітрогену через залучення кількісних параметрів, статистичних показників та методів математичного моделювання.

2. Теоретично обґрунтовано та розкрито біологічні основи функціонування соєво-ризобіального симбіозу як потужного об’єкта для навчального STEM-моделювання. Використовуючи масив достовірних наукових даних, продемонстровано складність механізмів формування симбіотичного апарату та азотфіксації. Виявлено високий дидактичний потенціал екологічного явища «нітратного парадоксу», сутність якого полягає у тому, що високі концентрації мінерального неорганічного азоту в ґрунті серйозно пригнічують утворення бульбочок і блокують азотфіксацію. Для школярів цей фізіологічний механізм стає основою для розуміння небезпеки надмірного хімічного втручання в біосферу. Також доведено, що розгляд інноваційних біотехнологічних рішень, таких як застосування інгібіторів

нітрифікації (нітрапірину) та комплексних мікробних інокулянтів (азотфіксуючих та фосформобілізуючих бактерій), дозволяє успішно інтегрувати в урок біології технологічну та інженерну складові (Technology та Engineering у структурі STEM).

3. Розроблено та науково обґрунтовано методологію дидактичної транспозиції (адаптації) вузькоспеціалізованих агрономічних даних для формування освітнього контенту. Ця методологія базується на принципах наукової автентичності, спрощення форми подачі статистичного матеріалу, візуального моделювання та проблематизації фактів. Визначено, що найвищу педагогічну цінність мають емпіричні показники динаміки маси бульбочок (наприклад, її збільшення з 0,26 г на хімічному фоні до 0,82 г за умови комплексної інокуляції), а також показники фінальної врожайності зерна сої (наприклад, надвишка 0,40–0,50 т/га від застосування біопрепаратів). Крім того, обґрунтовано систему діагностики навчальних досягнень учнів, яка включає інструменти формувального оцінювання, компетентнісні завдання у форматі PISA та багатокритеріальні матриці (рубрики) для оцінювання міжпредметних знань, математичних розрахунків та екологічного мислення.

4. Спроєктовано та методично деталізовано розгорнутий план-конспект здвоєного STEM-уроку для 9 класу за темою «Агробіологічний кейс: Хімія проти Природи. Дослідження ефективності соєво-ризобіального симбіозу». Доведено ефективність застосування технології проблемного навчання у поєднанні з рольовою дослідницькою роботою (робота експертних груп мікробіологів, екологів та біоекономістів). На основі реальних цифрових показників створено навчальні робочі аркуші, які дозволяють учням самостійно розраховувати економічну рентабельність біологічних методів порівняно з хімічними, аналізувати масштаби непродуктивних втрат азоту та прогнозувати стан агроекосистеми. Такий формат проведення заняття докорінно змінює роль учня, перетворюючи його з пасивного споживача інформації на активного дослідника, який здатен аргументовано доводити переваги екологічно безпечного природокористування.

Підсумовуючи результати роботи, варто зазначити, що інтеграція матеріалів сучасних фахових сільськогосподарських досліджень у зміст шкільної біологічної освіти є не лише можливою, але й критично необхідною. Трансформація статистичних даних щодо продуктивності сої та симбіотичної активності ризобій в інтерактивні навчальні кейси забезпечує виконання ключових завдань Державного стандарту, формує у школярів цілісну наукову картину світу та розвиває дослідницькі навички, необхідні для вирішення глобальних екологічних та продовольчих викликів сучасності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Навчальна програма з біології для 7–9 класів закладів загальної середньої освіти (зі змінами 2023 року). URL: https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/navchalni-programi (дата звернення: 27.04.2026).
2. Козленко О. Г. Моделювання у навчанні біології: від наочності до компетентності. *Біологія і хімія в рідній школі*. 2023. № 2. С. 15–21. DOI: https://doi.org/10.32405/2227-1937-2023-2-15
3. Засєкіна Т. М. STEM-орієнтований підхід у навчанні природничих предметів. Наукові записки Малої академії наук України. 2022. № 1. С. 45–52. DOI: https://doi.org/10.51707/2618-0529-2022-1-05
4. Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) / В. В. Кириченко, С. С. Рябуха, Л. Н. Кобизєва, О. О. Посилаєва, П. В. Чернишенко : монографія / НААН, Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва. Х., 2016. 400 с. URL: https://yuriev.com.ua/assets/files/knigi/soya-monografiya-7.pdf
5. Бабич А. О., Бабич-Побережна А. А. Селекція, виробництво, торгівля і використання сої в світі. Київ. Аграрні науки. 2011б. 548 с.
6. Бахмат О. М. Соя – культура майбутнього, особливості формування високого врожаю: монографія. Кам'янець-Подільський : ПП Мошак М. І. 2009. 208 с.
7. Гадзовський Г. Л., Новицька Н. В., Мартинов О. М. Урожай і якість зерна сої під впливом інокуляції та позакореневого підживлення. *Таврійський науковий вісник.* 2020. № 111. С. 44-48. doi.org/10.32851/2226-0099.2020.111.5.
8. Гнатів П. С., Литвин О. Ф., Іванюк В. Я., Лагуш Н. І., Шестак В. Г., Коцюба Б. І. Створення й апробація програмного забезпечення статистичного моделювання вірогідності результатів агрономічних експериментів. *Вісник ЛНАУ. Агрономія*, 2022, 26: 157-162. Doi.org/10.31734/agronomy2022.26.157
9. Господаренко Г. М. Оптимальні умови середовища та інокулянти для ефективного бобово-ризобіального симбіозу. Симбіотична азотфіксація та

врожай : за заг. ред. Г. М. Господаренка. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2024б. С. 41–61.

10. Федорук І. В. Вплив інокуляції насіння на врожай сої. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки.* Херсон, 2019. № 108. С. 110.
11. Біда О. А. Практико-орієнтовані завдання з біології як засіб формування компетентностей школярів. Педагогічні інновації. 2023. № 3. С. 112–118. DOI: https://doi.org/10.31174/2227-1937-2023-3-12
12. Розрахунки витрат і прибутку по вирощуванню сої в 2024. Агроексперт-Трейд. 2024. URR: https://agroexp.com.ua/uk/zatratyi-i-pribyil-po-vyiraschivaniyu-soi
13. Didur I. M., Tsyhanskyi V. I., Tsyhanska O. I., Malynka L. V., Butenko A .O., Klochkova T. I. 2019. The effect of fertilizer system on soybean productivity in the conditions of right bank forest-steppe. *Ukrainian Journal of Ecology*, 9(1), 76-80.
14. Ohyama T., Tewari K., Ishikawa S., Tanaka K. et al. 2017. Role of Nitrogen on Growth and Seed Yield of Soybean and a New Fertilization Technique to Promote Nitrogen Fixation and Seed Yield. Soybean / Edited by Minobu Kasai. 2017. DOI: 10.5772/66743
15. Hungria M., Mendes I. C. 2015. Nitrogen Fixation with Soybean: Perfect Symbiosis? In Biological Nitrogen Fixation, V. 2 (Ed. De Bruijin FJ.), John Wiley & Sons, Inc., p. 1009–1023.
16. Salvagiotti F., Cassman K. G., Specht J .E., Walters D. T., Weiss A., Dobermann A. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Res.* 2008, 108, 1–13. doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001.
17. Базанова Т. І. Використання математичних методів і моделей на уроках біології як засіб реалізації STEM-освіти. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання*. 2022. Вип. 58. С. 14–21. DOI: https://doi.org/10.31652/2412-1142-2022-58-14-21
18. Tamagno S., Sadras V. O., Haegele J. W., Armstrong P. R. and Ciampitti I.

A. 2018. Interplay between nitrogen fertilizer and biological nitrogen fixation in soybean: Implications on seed yield and biomass allocation. *Scientific Reports*. 8(1):11. doi:10.1038/s41598-018-35672-1.

19. Board J. E., Kahlon C. S. 2011. Soybean yield formation: What controls it and how it can be improved. In Soybean Physiology and Biochemistry (Ed. El-Shemy), InTech, Rijeka, Croatia, 1–36.
20. Suganuma T., Fujikake H., Aida H., Ohtake N., Sueyoshi K., Ohyama T. 2001. Comparison of the growth and nitrogen fixation activity of the hypernodulation soybean mutant NOD1-3 and its parent cv. Williams in field cultivation. *Bull. Facul. Agric. Niigata Univ.* 53, 123–132.
21. Yamashita N.,Tanabata S., Ohtake N., Sueyoshi K., Sato T., Higuchi K. 2019. Effects of Different Chemical Forms of Nitrogen on the Quick and Reversible Inhibition of Soybean Nodule Growth and Nitrogen Fixation Activity. Plant Sci. 2019. Sec. *Plant Pathogen Interactions.* V. 10 – 2019. doi.org/10.3389/fpls.2019.00131
22. Dong S. K., Gong Z. P., Zu W. 2006. Effects of nitrogen nutrition levels on N-accumulation and yields of soybean. *Plant Nutr Fert Sci.* 2010; 16 (1): 65–70.
23. Vadez V., Sinclair T. R. and Serraj R. 2000. Asparagine and ureide accumulation in nodules and shoots as feedback inhibitors of N_2 fixation in soybean. Physiol. Plant 110, 215–223. doi: 10.1034/j.1399-3054.2000.110211.x
24. Gordon A. J., Skøt L., James C. L. and Minchin F. R. 2002. Short-term metabolic response of soybean root nodules to nitrate. *J. Exp. Bot.* 53, 423–428. doi: 10.1093/jexbot/53.368.423
25. Mourtzinis S., Kaur G., Orlowski J. M., Shapiro C. A., Lee C. D. et al. 2018. Soybean response to nitrogen application across the United States: A synthesis-analysis. *Field Crops Research.* V. 215, P. 74-82. doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.035
26. Rotundo J. L., Westgate M. E. 2009. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crops Res.* 2009; 110(2): 147–156.
27. Kalaji H. M., Oukarroum A., Alexandrov V., Kouzmanova M., Brestic M.,

Zivcak M., Samborska I. A., Cetner M. D., Allakhverdiev S. I., Goltsev V. Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by *in vivo* chlorophyll *a* fluorescence measurements. *Plant Physiology and Biochemistry.* Vol. 81, 2014, P. 16–25. doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.029

28. Hoyos-Villegas V., Houx J. H., Singh S. K., Fritschi F. B. 2014. Ground-Based Digital Imaging as a Tool to Assess Soybean Growth and Yield. *Crop Science,* 2014. doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0540
29. Bai H., Purcell L. C. 2019. Evaluation of Soybean Greenness from Ground and Aerial Platforms and the Association with Leaf Nitrogen Concentration in Response to Drought. Crop Physiology & Metabolism. doi.org/10.2135/cropsci2019.03.0159
30. Моргун В. Н., Должинов С. В., Знак Н. Ю. Использование замедленной флоуресценции хлорофила для оценки фотосинтетической продуктивности и устойчивости растений. *Матер. съезда физиологов растений*. Ч. 2. 1992. С. 141.
31. Шабанов Д. А. Діяльнісний підхід у навчанні біології: інтеграція біофізичних методів у шкільний експеримент. *Вісник післядипломної освіти*. 2023. Вип. 23. С. 88–95. DOI: https://doi.org/10.32405/2218-7650-2023-23-88-95
32. Балик Н. Р. STEM-технології на уроках біології: теорія та практика використання. *Інноваційна педагогіка*. 2023. Вип. 55. С. 112–116. DOI: https://doi.org/10.32843/2663-6085/2023/55.22
33. Li S., Wang Z., Hu T., Gao Y., Stewart B., Sparks D. 2009. Nitrogen in dryland soils of China and its management. *Adv. Agron.*, 101: 123–181. doi.org: 10.1016/s0065-2113(08)00803-1.
34. Liu X., Vitousek P., Chang Y., Zhang W., Matson P., Zhang F. 2016. Evidence for a historic change occurring in China. Environ. *Sci. Technol.*, 50: 505–506. doi.org/10.1021/acs.est.5b05972.
35. Ti C., Yan X. 2020. Nitrogen regulation in China's agricultural systems. In: Liu X., Du E. (ed). Atmospheric Reactive Nitrogen in China, Springer, Singapore,

pp. 297–309.

36. Mueller N. D., Lassaletta L., Runck B. C., Billen G., Garnier J., Gerber J. S. 2017. Declining spatial efficiency of global cropland nitrogen allocation. *Global Biogeochem. Cycles,* 31: 245–257. doi.org/10.1002/2016gb005515.

37. Yu C., Huang X., Chen H., Godfray H. C. J., Wright J. S., Hall J. W., Gong P., Ni S., Qiao S., Huang G., Xiao Y., Zhang J., Feng Z., Ju X., Ciais P., Stenseth N. C., Hessen D. O., Sun Z., Yu L., Cai W., Fu H., Huang X., Zhang C., Liu H., Taylor J. 2019. Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*, 567: 516–520. doi.org/10.1038/s41586-019-1001-1.

38. Climate Change and Land. 2020. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers. 2020. Intergovernmental Panel on Climate Change. 36 p. URL: https://climatechange.insightconferences.com/.

39. Zhou X., Wang S., Ma S., Zheng X., Wang Z., Lu C. 2020. Effects of commonly used nitrification inhibitors-dicyandiamide. (DCD), 3, 4-dimethylpyrazole phosphate. (DMPP), and nitrapyrin – on soil nitrogen dynamics and nitrifiers in three typical paddy soils. *Geoderma*, 380: 114637. doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114637.

40. Компанія Dow Chemical. 2012. Оцінка безпеки продукту: Нітрапірин. 6 стор. http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08c1/0901b803808c186f.pdf

41. Degenhardt R. F., Juras L. T., Smith, L. R. A., MacRae A.W., Ashigh, J., McGregor W. R. 2016. Application of Nitrapyrin with Banded Urea, Urea Ammonium Nitrate, and Ammonia Delays Nitrification and Reduces Nitrogen Loss in Canadian Soils. Crop Forage and Turfgrass Management 2(1). DOI:10.2134/cftm2016.03.0027.

42. Господаренко Г. М., Єщенко Н. Б. Окупність мінеральних добрив урожаєм сої на чорноземі опідзоленому правобережного Лісостепу. Зб. наук. праць УНУС. 2012. Вип. 81. Ч. 1. Агрономія. С. 8–14.

43. Lindström K., Mousavi S. A. 2019. Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Microb Biotechnol*. 13(5): 1314–1335. doi: 10.1111/1751-7915.13517

44. Кобилинський І. В. Особливості проведення інокуляції при вирощуванні сої. *Scientific Progress & Innovations Том 27. № 2. Сільське господарство. Рослинництво.* 2024. doi.org/10.31210/spi2024.27.02.04

45. Ben Zineb A., Trabelsi D., Ayachi I., Barhoumi F., Aroca R., Mhamdi R. 2020. Inoculation with elite strains of phosphate-solubilizing bacteria enhances the effectiveness of fertilization with rock phosphates. *Geomicrobiol J.* 37:22–30. https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1658826

46. Din M., Nelofer R., Salman M., Khan F. H., Khan A., Ahmad M., Khan M. 2019. Виробництво Azotobacter, що фіксує азот (SR-4) і Aspergillus niger, що розчиняє фосфор , і їх оцінка на Lagenaria siceraria та Abelmoschus esculentus . *Biotechnol Rep*. 22:e00323. doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00323

47. Коршевнюк Т. В. Діяльнісний підхід у формуванні природничої компетентності учнів основної школи. *Проблеми сучасного підручника*. 2022. Вип. 28. С. 134–142. DOI: https://doi.org/10.32405/2411-1309-2022-28-134-142

48. Грицай Н. Б. Організація навчально-дослідницької діяльності учнів з біології на основі використання результатів фахових наукових експериментів. *Інноватика у вихованні*. 2023. Вип. 17. С. 45–53. DOI: https://doi.org/10.35619/iiu.v1i17.102

49. Коцюба Б. І. Оптимізація системи азотного удобрення сої з використанням інгібітора нітрифікації та інокуляції насіння в умовах Малого Полісся : дис. … д-ра філософії : 201 / Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького. Львів, 2025. 254 с.

50. Lancashire P. D., Bleiholder H., Van den Boom T., Langelüddeke P., Strauss R., Weber E., Witzenberger A. 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. Appl. Biol.* 1991. 119: 561–601. https://www.researchgate.net/profile/Hermann-

Bleiholder/publication/229530290_A_uniform_decimal_code_for_growth_stages_of_crops_and_weeds/links/5e8efe064585150839cae154/A-uniform-decimal-code-for-growth-stages-of-crops-and-weeds.pdf

51. Bouwman A. F. 1996. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 46, 53-70.
52. Bouwman A. F. 1998. Nitrogen oxides and tropical agriculture. *Nature,* 392: 866-867.
53. ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини. [Чинний від 2005-07-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2005. 14 с.
54. ДСТУ 4729:2007. Якість грунту; Визначання нітратного і амонійного азоту в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського. Вид. офіц. [Чинний від 2008-01-01]. К. : Держспоживстандарт України, 2008. 9 с.
55. Матяш Н. Ю. Дидактична транспозиція наукових знань у шкільному курсі біології. *Біологія і хімія в рідній школі*. 2022. № 4. С. 8–13. DOI: https://doi.org/10.32405/2227-1937-2022-4-8
56. Шаповалов В. Б. Методика конструювання проблемних STEM-завдань на основі емпіричних даних. *Наукові записки екологічної лабораторії*. 2023. Вип. 12. С. 55–61. DOI: https://doi.org/10.31652/2412-1142-2023-12-55-61
57. Біда О. А., Стрілько В. В. Проблемне навчання як засіб інтеграції природничих дисциплін у базовій школі. *Педагогічні інновації: ідеї, реалії, перспективи*. 2023. № 2. С. 44–50. DOI: https://doi.org/10.32405/2413-4139-2023-2-44-50
58. Морзе Н. В., Вембер В. П. Формувальне оцінювання: від теорії до практики. *Інформатика та інформаційні технології в навчальних закладах*. 2022. № 1. С. 14–23. DOI: https://doi.org/10.32405/2227-1937-2022-1-14
59. Засєкіна Т. М. Оцінювання навчальних досягнень учнів у системі STEM-освіти: критеріальний підхід. *Наукові записки Малої академії наук України*. 2023. Вип. 2. С. 34–41. DOI: https://doi.org/10.51707/2618-0529-2023-2-04

60. Топузов О. М., Головко М. В. Компетентнісно орієнтовані завдання з природничих дисциплін як інструмент розвитку дослідницьких навичок школярів. *Педагогічна думка*. 2023. № 4. С. 5–12. DOI: https://doi.org/10.32405/2411-1309-2023-4-5-12

61. Коробчук С. Г. Психолого-педагогічні особливості формування дослідницьких навичок старшокласників. *Наукові записки екологічної лабораторії*. 2024. Вип. 14. С. 41–48.

62. Hungria M., Mendes I. C. 2015. Nitrogen Fixation with Soybean: Perfect Symbiosis? In Biological Nitrogen Fixation, V. 2 (Ed. De Bruijin FJ.), John Wiley & Sons, Inc., p. 1009–1023.

63. Сліпчук В. Л. Міжпредметна інтеграція як основа STEM-моделювання екологічних процесів. *Проблеми сучасної педагогіки*. 2022. Вип. 42. С. 88–95.

64. Локшина О. І. Моніторинг якості освіти: зарубіжний досвід та українські реалії. *Педагогіка і психологія*. 2022. № 3. С. 45–52.

65. Савченко О. Я. Формувальне оцінювання в НУШ: від контролю до підтримки дитини. *Початкова школа*. 2023. Вип. 12. С. 5–11.