

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

Хіміко-біологічний факультет
Кафедра ботаніки та зоології

Кваліфікаційна робота

на тему:

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОСТОВИХ ПРОЦЕСІВ
РОСЛИН ЯК ЗАСІБ ФОРМУВАННЯ ПРИРОДНИЧО-НАУКОВОЇ
КОМПЕТЕНТНОСТІ УЧНІВ У НАВЧАЛЬНОМУ ПРЕДМЕТІ
«БІОЛОГІЯ І ЕКОЛОГІЯ (10 КЛАС)»**

Спеціальність: 014.05 Середня освіта

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

Здобувача другого (магістерського)
рівня вищої освіти, ОПП «Середня освіта
(Біологія та здоров'я людини, хімія)
Юнко Марії Богданівни

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:
доктор сільськогосподарських наук, професор,
Пида Світлана Василівна

РЕЦЕНЗЕНТ:
методист відділення хімії та біології
Тернопільського обласного
комунально-територіального відділення МАН
України
Дідушицька Богданна Станіславівна

Робота захищена з оцінкою:

Національна шкала _____

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Тернопіль – 2025 р.

Анотація

Юнко М. Б. Експериментальне дослідження ростових процесів рослин як засіб формування природничо-наукової компетентності учнів у навчальному предметі «Біологія і екологія» (10 клас) / Юнко Марія Богданівна; ТНПУ ім. Володимира Гнатюка, хіміко-біологічний факультет, кафедра ботаніки та зоології; наук. керівник Пида С. В. – Тернопіль, 2025. – 81 с.

У роботі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність використання дослідження ростових процесів рослин під дією мікробних препаратів для формування природничо-наукової компетентності учнів у курсі «Біологія і екологія». На прикладі нуту звичайного (*Cicer arietinum* L.) сортів Буджак, Скарб, Пам'ять та Ярина показано ефективність передпосівної обробки насіння *Mesorhizobium ciceri* штаму ND-64 та препаратом Ризогумін за показниками росту рослин.

Розроблено та апробовано комплекс компетентісно орієнтованих завдань, навчальних матеріалів та елементів дослідницьких робіт для учнів, спрямованих на формування природничо-наукової компетентності.

Педагогічний експеримент показав, що залучення учнів до дослідницької діяльності підвищує рівень їх знань, розвиває дослідницькі вміння, екологічне мислення та навчальну мотивацію.

Ключові слова: природничо-наукова компетентність, дослідницька діяльність, навчання, біологія, нут звичайний, показники росту .

Abstract

Yunko M. B. Experimental study of plant growth processes as a tool of developing students' natural science competence in biology and ecology education 10 grade / Yunko Maria; Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Faculty of Chemistry and Biology, Department of Botany and Zoology; supervisor of scientific work Pyda S. V. – Ternopil, 2025. – 81 p.

The study theoretically substantiates and experimentally confirms the effectiveness of studying plant growth processes under the influence of microbial preparations for the formation of students' natural science competence in the course "Biology and Ecology". Using common chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties Budzhak, Skarb, Pam'yat, and Yaryna as an example, the effectiveness of pre-sowing seed treatment with *Mesorhizobium ciceri* strain ND-64 and the microbial preparation Rhizogumin on plant growth indicators was demonstrated.

A set of competency-based tasks, educational materials, and elements of students' research activities aimed at developing natural science competence was designed and tested.

The pedagogical experiment showed that involving students in research activities increases their level of knowledge, develops research skills and environmental thinking, and enhances learning motivation.

Keywords : research activity, learning, biology, photosynthesis, organo-mineral fertilizers, composite reclamation agent TREVITAN®, pigments, chickpea

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ У ПОСІВАХ НУТУ ЗВИЧАЙНОГО ЗА ПОКАЗНИКАМИ РОСТОВИХ ПРОЦЕСІВ РОСЛИН	10
1.1. Аналіз сучасного стану наукових досліджень щодо ростових процесів рослин за впливу мікробних препаратів	10
1.2. Матеріали дослідження.....	21
1.3. Схема польових дослідів.....	24
1.4. Методи дослідження.....	25
1.5. Вплив мікробних препаратів на ростові процеси нуту звичайного...	26
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РОСТОВИХ ПРОЦЕСІВ РОСЛИН ЯК ЗАСІБ ФОРМУВАННЯ ПРИРОДНИЧО-НАУКОВОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ УЧНІВ У НАВЧАЛЬНОМУ ПРЕДМЕТІ «БІОЛОГІЯ І ЕКОЛОГІЯ»	41
2.1. Теоретико-методичні засади формування природничо-наукової компетентності учнів у курсі біології та екології на рівні стандарту та профільного рівня.....	41
2.2. Вивчення проблеми ростових процесів у курсі біології та екології на рівні стандарту та профільного рівня.....	48
2.3. Методика організації педагогічного експерименту та аналіз його результатів.....	54
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AMF – арбускулярні мікоризні гриби;

БФА – біологічна фіксація азоту;

PGPR – ризобактерії, що стимулюють ріст рослин;

AMF – арбускулярні мікоризні гриби;

ПНК – природничо-наукова компетентність;

ТНПУ – Тернопільський національний педагогічний університет імені
Володимира Гнатюка;

ТО – Тернопільська область.

Позначення дослідних груп:

К – контроль;

БС – бактеріальна суспензія селекціонованого штаму *Mesorhizobium ciceri*
ND-64;

Ризогумін – комплексний мікробіологічний препарат Ризогумін.

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах глобальних екологічних і соціальних викликів особливо актуальним постає питання формування природничо-наукової компетентності учнів. Технологічне суспільство споживання призвело до протиріч між обмеженими ресурсами природи та зростаючими потребами людини [2]. Освітня програма з біології та екології на рівні стандарту проголошує метою навчання формування природничо-наукової компетентності шляхом засвоєння системи інтегрованих знань про закономірності функціонування живих систем та взаємодії людини з довкіллям [3]. Проте, як зазначають дослідники, проблема формування такої компетентності учнів раніше розглядалася переважно в інших природничих предметах та інтегрованих курсах, тоді як у межах шкільного курсу біології і екології вона опрацьована недостатньо [1].

В умовах зміни клімату перспективною культурою для Західного Лісостепу України є нут звичайний (*Cicer arietinum* L.) За останні 130 років ґрунти України втратили близько 30 % гумусу — основного природного джерела азотистих сполук [41]. Тому важливою складовою технології вирощування бобових культур є інокуляція насіння мікробними препаратами на основі селекціонованих штамів специфічних бульбочкових бактерій [53, 58, 94]. Інтродуковані в ризосферу штами ризобій забезпечують рослини біологічно фіксованим нітрогеном, що покращує їх азотне живлення, активізує ріст та розвиток, а також дає можливість зменшити обсяги внесення мінеральних азотних добрив [36].

Щороку завдяки діяльності азотфіксуючих мікроорганізмів із повітря засвоюється від 40 до понад 300 кг молекулярного нітрогену на гектар (130–390 кг – зернобобові культури; 270–550 кг – багаторічні бобові трави) [35, 47]. Препарати на основі зазначених вище мікроорганізмів поліпшують живлення рослин за рахунок кращого засвоєння мінерального азоту з ґрунту та синтезу біологічно активних речовин, які стимулюють ріст вегетативних органів та

сприяють розвитку генеративних і відтак суттєво впливають на продуктивність рослин [20, 48].

Емпіричні дослідження, що стосуються нуту звичайного (*C. arietinum*) й інших бобових культур, підтверджують ефективність різних інокулянтів та їхніх комбінацій. Зокрема, у низці робіт показано, що інокуляція насіння або кореневої системи активними штамми ризобій (наприклад, *Mesorhizobium ciceri*, *Rhizobium* spp.) забезпечує інтенсифікацію нодуляції й азотного живлення, що прямо корелює з нарощуванням надземної біомаси і підвищенням врожайності зерна [71, 82].

Мета дослідження. Теоретично обґрунтувати й експериментально перевірити використання дослідження ростових процесів рослин під дією мікробних препаратів як ефективного засобу формування природничо-наукової компетентності учнів шляхом організації дослідницької діяльності у курсі «Біологія і екологія».

Для реалізації поставленої мети передбачалося вирішити **наступні завдання:**

– здійснити аналіз сучасного стану наукових досліджень щодо ростових процесів рослин за впливу мікробних препаратів;

– з'ясувати теоретико-методичні засади формування природничо-наукової компетентності учнів у курсі біології та екології на рівні стандарту та профільного рівня;

– проаналізувати зміст чинних навчальних програм для 10 класу з метою визначення можливостей інтеграції досліджень ростових процесів у навчальний процес;

– організувати та провести експериментальне дослідження впливу мікробних препаратів на ріст бобових рослин і здійснити морфометричний аналіз показників росту;

– розробити та апробувати комплекс компетентнісно орієнтованих завдань, навчальних матеріалів та елементів дослідницьких робіт для учнів, спрямованих на формування природничо-наукової компетентності;

– оцінити ефективність застосування експериментальних матеріалів і результатів дослідження у формуванні природничо-наукової компетентності учнів.

Об’єкт дослідження: формування природничо-наукової компетентності у процесі дослідницької діяльності учнів у курсі біології та екології.

Предмет дослідження: дослідження ростових процесів рослин нуту звичайного за впливу мікробних препаратів як засіб формування природничо-наукової компетентності учнів у навчальному предметі «Біологія і екологія».

Методи дослідження: У магістерському дослідженні використано теоретичні (аналіз наукової літератури та результатів експериментального дослідження, узагальнення результатів педагогічного та біологічного експериментів, синтез для об’єднання складових дослідження в єдине ціле) та емпіричні (анкетування, експеримент, порівняння) методи. Біологічні дослідження проводили в польових умовах – для встановлення висоти стебла нуту звичайного, облиствлення рослин за дії мікробіологічних препаратів; у лабораторних умовах визначали масу надземних органів нуту звичайного; математично-статистичний – для підтвердження достовірності результатів за коефіцієнтом Стьюдента.

База дослідно-експериментальної роботи: дослідження проводили в лабораторії фізіології рослин і мікробіології (лабораторні) кафедри ботаніки та зоології та на дослідних полях агробіолабораторії (польові дослідження) Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка (ТНПУ). Педагогічний експеримент проводили у Тернопільській загальноосвітній школі I-III ступенів № 24.

Практичне значення отриманих результатів. Матеріали магістерського дослідження можуть бути використані в освітньому процесі в закладах загальної середньої освіти на уроках біології при вивченні процесів росту рослин. В роботі обґрунтовано формування природничо-наукової компетентності у процесі дослідницької діяльності учнів у курсі біології та

екології на основі вивчення ростових процесів нуту звичайного сортів Скарб, Пам'ять, Буджак та Ярина, застосування бактеріальної суспензії *M. ciceri* штаму ND-64 та комплексного мікробіологічного препарату Ризогумін. За результатами лабораторних і польових досліджень встановлено ефективність передпосівної обробки насіння комплексним мікробним препаратом Ризогуміном і бактеріальною суспензією *M. ciceri* штаму ND-64 нуту звичайного сортів Буджак, Ярина, Пам'ять, Скарб за показниками ростових процесів рослин. Результати біологічних досліджень мають також практичне значення для сільського господарства, оскільки запропоновані елементи технології вирощування культури підвищують інтенсивність фізіологічних процесів нуту звичайного. Опрацьована література поглиблює знання про природничо-наукову компетентність у процесі дослідницької діяльності учнів, ефективність використання безпечних мікробіологічних препаратів на основі азотфіксувальних бактерій для інокуляції насіння бобових рослин, значення нуту звичайного в харчовій промисловості, сільському господарстві та медицині.

Апробація роботи. Результати досліджень, що проведено під час педагогічної практики, лабораторних і польових умовах обговорено на засіданнях проблемної групи «Азотфіксація в агрофітоценозах» кафедри ботаніки та зоології (2024-2025 рр.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «*Litteris et Artibus: Нові Горизонти*», (Кременець, 2025) та XIII Міжнародній науково-практичній конференції «*Modern ways of development of science and the latest theories*» (Мадрид, Іспанія, 2023).

Публікації. За результатами досліджень, що представлені у магістерській роботі опубліковано 2 праці:

1. Юнко М., Пида С. Формування природничо-наукової компетентності учнів у курсі біології та екології. / *Litteris et Artibus: Нові горизонти* : збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції. Випуск X. Частина 2. Кременець : ВЦ КОГПА ім. Тараса Шевченка, 2025. С. 181-183.

2. Юнко М. Б, Манчевська О. В. Шуль О. Т. Вплив рекультиванту композиційного TREVITAN® на ростові процеси нуту звичайного (*Cicer arietinum* L.). *Modern ways of development of science and the latest theories*. Abstracts of XIII International Scientific and Practical Conference. (December 11-13, 2023). Madrid, Spain. P. 26–30.
<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2023/11/MODERN-WAYS-OF-DEVELOPMENT-OF-SCIENCE-AND-THE-LATEST-THEORIES.pdf>

Структура та об'єм роботи. Магістерська робота складається із вступу, 2-х розділів, висновків, списку використаної літератури. Матеріали роботи викладені на 81 сторінці комп'ютерного тексту, ілюстровані 6 таблицями та 25 рисунками. Список цитованої літератури містить 100 джерел, з них 47 латиницею.

РОЗДІЛ 1

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОБНИХ ПРЕПАРАТІВ У ПОСІВАХ НУТУ ЗВИЧАЙНОГО ЗА ПОКАЗНИКАМИ РОСТОВИХ ПРОЦЕСІВ РОСЛИН

1.1. Аналіз сучасного стану наукових досліджень щодо ростових процесів рослин за впливу мікробних препаратів

Перспективним, екологічно чистим і безпечним методом підвищення продуктивності бобових культур є застосування мікробних препаратів на основі азотфіксувальних та інших корисних мікроорганізмів. Використання подібних біоінокулянтів сприяє формуванню розвиненого симбіотичного апарату рослин, підвищенню ефективності біологічної фіксації азоту та прискоренню процесів, що забезпечують задоволення потреб рослин у азоті, а отже – відновленню родючості ґрунту та зменшенню залежності від мінеральних азотних добрив [54, 64, 78, 92]. Водночас для досягнення оптимальної продуктивності бобових необхідне раціональне управління запасами азоту: використання ефективних корневих інокулянтів у поєднанні зі стартовою дозою мінерального азоту може забезпечувати вищі показники урожайності, тоді як надмірна кількість доступного ґрунтового азоту має ризик пригнічення встановлення симбіозу [72, 93].

Поділ, ріст і диференціація клітин є взаємозалежними процесами, які відбуваються паралельно протягом усього розвитку рослин. Це добре помітно на ранніх етапах формування епідермісу листка: частина клітин починає спеціалізуватися, тоді як інші продовжують активно ділитися. Водночас клітини, що вступають у диференціацію, здатні впливати на проліферативну активність органу. Наприклад, продихова лінія не лише формує пори, а й забезпечує утворення значної кількості епідермальних клітин, сприяючи загальному росту листкової пластинки [66]. У найзагальнішому значенні ріст – це незворотне збільшення кількості клітин, біомаси чи об'єму рослини. Розрізняють структурний ріст, що пов'язаний із нагромадженням стабільної біомаси (лігноцелюлозні сполуки, мембранні ліпіди, нуклеїнові кислоти,

структурні білки), та експансивний ріст, який полягає в незворотному збільшенні об'єму тканин внаслідок пластичного розтягнення клітинних стінок [61, 87]. Оборотні зміни біомаси можливі лише за рахунок накопичення або витрати запасних чи захисних речовин. Ріст рослин як біологічне явище охоплює сукупність процесів, що призводять до збільшення біомаси й об'єму рослинного організму внаслідок клітинного поділу та розростання в меристематичних зонах; вегетативний ріст включає формування кореневої системи, пагонів і листків з активним фотосинтезом та накопиченням резервних речовин, тоді як репродуктивні фази охоплюють цвітіння, формування плодів і насіння. Інтенсивність росту визначається комплексом абіотичних чинників (вода, світло, температура, родючість ґрунту) та внутрішньо рослинних регуляторів (фітогормони: ауксини, цитокініни, гібереліни, етилен та ін.). У контексті бобових культур особливу роль виконують біотичні взаємодії з ризобіями та іншими корисними мікроорганізмами, оскільки вони прямо впливають на азотне забезпечення та гормональний статус рослин [58, 79].

Бобові культури становлять один із ключових елементів світового аграрного виробництва, займаючи близько 250 млн га та забезпечуючи фіксацію приблизно 90 млн тонн атмосферного азоту щороку [73]. Біологічна фіксація азоту (БФА) розглядається як ефективний екологічний механізм, що має низку переваг у порівнянні з мінеральними джерелами азоту. Зокрема, вона забезпечує підвищення коефіцієнта засвоєння азоту рослинами, мінімізує його вимивання з ґрунту та зменшує ризик забруднення водних екосистем [89]. Важливою особливістю БФА є її позитивний вплив на наступні культури в сівозміні, а також на небобові види у змішаних посівах, що підкреслює її роль у забезпеченні стабільності продуктивності різних агроєкосистем [68].

Біологічна фіксація азоту може відбуватися у вільноживучих бактерій, у асоціації з рослинами або в симбіозі з ними. Різні азотфіксувальні бактерії використовують для покращення забезпечення рослин біологічно фіксований азот. Серед усіх систем фіксації азоту найбільший внесок забезпечує симбіоз бобових рослин і ризобій, який становить 70–80% від глобальної кількості

біологічно фіксованого N на рік та близько 1/3 загального обсягу азоту, необхідного для світового сільського господарства (Рис. 1.1.1). Симбіотичні ризобії здатні фіксувати від 57 до 600 кг/га N щорічно [65]. Загальні річні надходження фіксованого азоту становлять 2,95 млн тонн для бобових і 18,5 тонн для олійних культур [69].

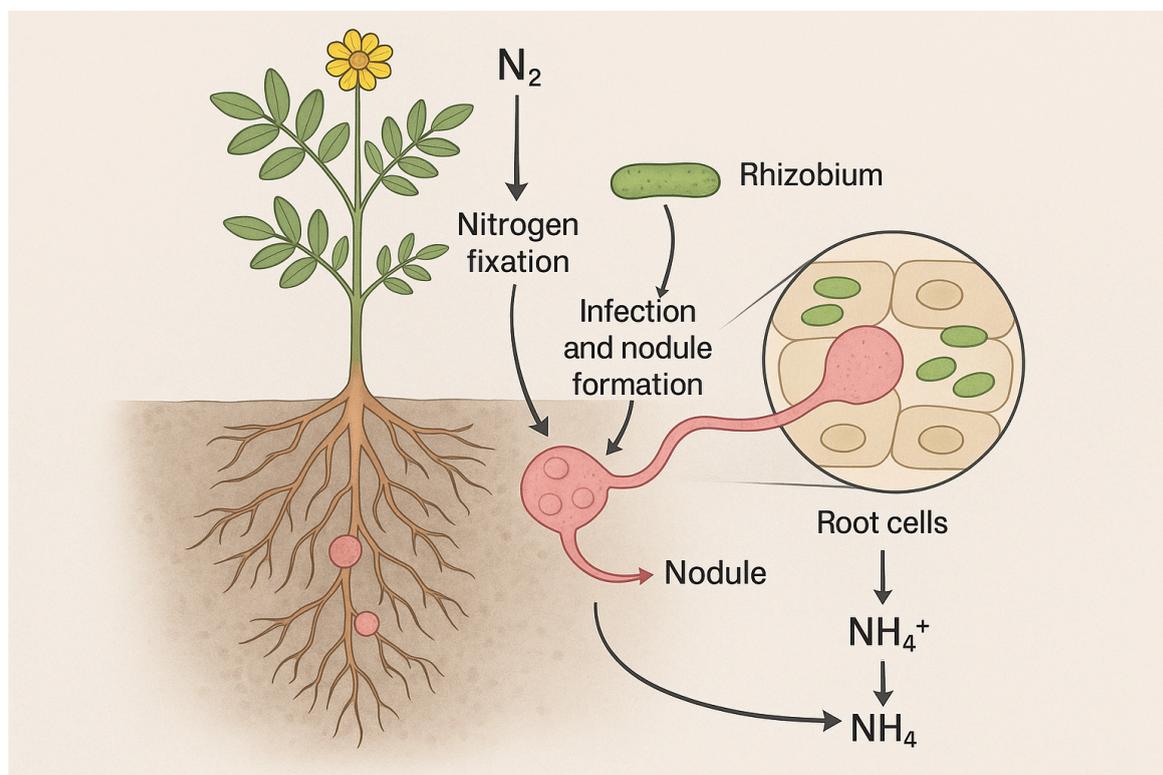


Рис. 1.1.1. Симбіоз бобових рослин із ризобіями та процес біологічної фіксації атмосферного азоту [62].

Водночас ефективність БФА значною мірою залежить від умов середовища, зокрема від забезпеченості мінеральними елементами. Доведено, що бобові, які компенсують потреби в азоті переважно за рахунок симбіотичної фіксації, потребують більших концентрацій фосфору, калію та сірки порівняно з рослинами, які використовують азот ґрунтового походження [97]. Ці елементи впливають на БФА як безпосередньо – через модифікацію утворення, будови та функціонування бульбочок, так і опосередковано, зумовлюючи зміни ростових процесів рослини-господаря [63].

Фосфор є одним із ключових факторів підтримання активності нітрогенази, оскільки цей фермент потребує значних енергетичних витрат у

вигляді АТФ [55]. Крім того, фосфор бере участь у сигнальних процесах, біосинтезі мембран, формуванні та функціонуванні бульбочок. Калій, у свою чергу, впливає на амонійний обмін, перетворення амінокислот, енергетичний метаболізм та транспорт вуглецю, що безпосередньо відображається на інтенсивності фіксації азоту. Duke та співавт. (1980) [63] підкреслюють важливість калію для формування повноцінних бульбочок та високої ферментативної активності симбіотичного комплексу.

Сірка також виконує істотну роль у підтриманні БФА, оскільки вона бере участь у синтезі ключових білкових компонентів бульбочок, таких як леггемоглобін і нітрогеназа. Дослідження Varin et al. (2010) [98] показали, що достатній рівень сірки корелює з підвищеним вмістом цих сполук у бульбочках. Натомість дефіцит сірки призводить до зниження активності БФА у таких культурах, як горох і люцерна, що пов'язують зі зменшенням концентрацій ферредоксину, леггемоглобіну та АТФ. У ширшому контексті встановлено, що всі три елементи – фосфор, калій і сірка – впливають на БФА переважно через регуляцію ростових процесів рослини-господаря [70]. За дефіциту поживних речовин спрацьовує так званий азотний зворотний зв'язок, який пригнічує формування та функціонування бульбочок. Аналогічні механізми виявляються й за інших типів стресу – зокрема під впливом посухи, засолення, важких металів або патогенів [75].

З погляду сучасної мікробної екології важливим об'єктом дослідження є ризосфера – зона активної взаємодії кореня рослини з мікроорганізмами [100]. Мікроорганізми ризосфери виконують подвійну роль, оскільки можуть як стимулювати ріст рослин, так і пригнічувати його. Це зумовлює необхідність глибокого вивчення механізмів їхньої взаємодії з рослиною для оптимізації агротехнологій. Показано, що мікрофлора ризосфери бобових має важливе значення для інфікування коренів бактеріями *Rhizobium spp.*, формування бульбочок та забезпечення високої врожайності культур [67].

Серед ключових макроелементів, необхідних для росту рослин, калій займає третє місце за значущістю. Він бере участь в активації численних

ферментів, синтезі білків і процесах фотосинтезу. У ґрунті калій існує в чотирьох основних формах: водорозчинній, обмінній, необмінній та структурній. Найбільш мобільними та доступними для рослин є водорозчинний і обмінний калій, хоча за умов їх низького вмісту рослини можуть частково використовувати необмінні форми [80].

Залізо, ще один критично важливий елемент, у більшості випадків присутнє у вигляді малорозчинних сполук – передусім гідроксидів. За нейтрального рН його концентрація у ґрунтовому розчині є надзвичайно низькою (порядку 10^{-18} М), що зумовлює потребу мікроорганізмів у синтезі сидерофорів – низькомолекулярних хелаторів, здатних ефективно зв'язувати Fe^{3+} та транспортувати його в клітину [84]. Встановлено, що доступність заліза може впливати на ефективність симбіозу *Bradyrhizobium japonicum* із соєю, зокрема на кількість і функціональність бульбочок. Це підкреслює значення ризобактерій у підвищенні доступності заліза для рослин [76].

Сірка є найменш поширеним макроелементом, проте її роль у функціонуванні рослин є надзвичайно важливою. Вона входить до складу органічних і неорганічних сполук ґрунту, будучи компонентом гумусу, мікробної біомаси та різних мінералів. При цьому лише незначна частина загального запасу сірки представлена сульфатом – основною доступною формою для рослин; понад 95% сірки пов'язано в органічних структурах [95]. Мікроорганізми ризосфери здатні синтезувати широкий спектр біологічно активних речовин, включно з ауксинами, цитокінінами, вітамінами та гібереліноподібними сполуками [88]. Ці метаболіти стимулюють проростання насіння, сприяють розвитку корневих структур, покращують водо- та мінеральне живлення надземних органів, а також підвищують стійкість рослин до абіотичного стресу [56].

Серед мікробних агентів, що використовуються як біопрепарати, вирізняють декілька основних функціональних груп:

1. Симбіотичні азотфіксатори роду *Rhizobium*, *Mesorhizobium*, *Bradyrhizobium* тощо формують бульбочки на коренях бобових, де відбувається

біологічна фіксація атмосферного азоту; цей процес забезпечує надходження в рослину відновлених форм азоту – амонію, який включається в обмінні процеси і синтез білків;

2. Асоціативні азотфіксувальні бактерії (наприклад, *Azotobacter*, *Azospirillum*) також можуть підвищувати азотну забезпеченість у ризосфері;

3. PGPR (plant growth-promoting rhizobacteria / ризобактерії, що стимулюють ріст рослин), зокрема представники родів *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Paenibacillus*, продукують фітогормони (індоліл-3-оцтова кислота та інші), виділяють органічні кислоти, ферменти (фосфатази) та сидерофори, що мобілізують фосфор, калій і мікроелементи для рослини, а також мають антагоністичні властивості щодо патогенів. Арбускулярні мікоризні гриби розширюють абсорбційну здатність рослин за рахунок гіфального апарату, особливо підвищуючи доступність фосфору. Актинобактерії та представники *Streptomyces* продукують широкий спектр вторинних метаболітів, які забезпечують біозахисні функції в ризосфері [58, 94].

Роди *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* та *Azorhizobium* розрізняються за швидкістю росту та здатністю формувати бульбочки в різних умовах. Швидкорослі види об'єднують у рід *Rhizobium*, повільнорослі – у *Bradyrhizobium*. Рід *Azorhizobium* включає швидкозростаючі види, здатні утворювати і стеблові, і кореневі бульбочки на тропічних бобових (наприклад, *Sesbania*), що ростуть у заболочених умовах. Chen et al. (1995) [60] запропонували окремий рід *Mesorhizobium* для штамів, що мають проміжну швидкість росту та філогенетичне положення між *Rhizobium* і *Bradyrhizobium*. Нині таксономія коренебульбочкових бактерій включає 11 родів і 45 видів.

Ефективність біоконтролю рослинних хвороб ризобактеріями залежить від їх здатності заселяти кореневу зону, де присутні ендогенні патогени. Тому колонізація коренів є ключовим чинником у біоконтролі та стимулюванні росту. За останні роки досягнуто значного прогресу у вивченні механізмів колонізації коренів, ролі біотичних і абіотичних факторів, а також бактеріальних ознак, пов'язаних із придушенням патогенів [96].

Відомо, що колонізація кореневої системи корисними мікроорганізмами є необхідною умовою для їх ефективної взаємодії з рослиною. Покращення колонізації можна досягти шляхом збільшення чисельності та рівномірності поширення інтродукованих бактерій або шляхом впливу на ґрунтові фактори, які регулюють їх виживання. На колонізацію впливають бактеріальні характеристики – швидкість росту, поверхневі властивості клітин, рухливість, хемотаксис до корневих ексудатів, продукування вторинних метаболітів та стійкість до стресових умов. Суттєвими є також властивості рослини (генотип, структура й вік коренів) і ґрунтові умови (рН, температура, вологість, наявність субстрату, внесення пестицидів) [59].

Інокулянти родів *Rhizobium* і *Bradyrhizobium* успішно застосовують уже понад століття, їх внесення сприяє закріпленню бактерій у ґрунті та на коренях рослин на рівні, достатньому для виконання їх функцій. Проте ефективність біодобрив у польових умовах є часто непостійною, а інокуляція бобових комерційними штамми не завжди призводить до підвищення врожайності. Основною проблемою є низьке виживання інтродукованих діазотрофів у полі. Критичними є абіотичні фактори ґрунту – текстура, кислотність, температура, вологість та забезпеченість субстратом, а також властивості самого інокулянту [81].

Ще одним чинником нестабільності ефекту інокуляції PGPR є недостатня або надмірна кількість бактеріальних клітин на насінні. Занадто висока чи низька доза може негативно впливати на утворення бульбочок та ріст рослин [90]. Ризосферні мікроорганізми здатні стимулювати ріст рослин через мобілізацію поживних речовин, утворення фітопідтримувальних метаболітів, пригнічення патогенів, детоксикацію забруднювачів, підвищення стійкості до стресів та покращення структури ґрунту. Водночас вони можуть і пригнічувати ріст – через паразитизм або синтез фітотоксичних речовин. Сучасна мета міжнародних досліджень полягає в оптимізації використання природних мікробних ресурсів у сталому землеробстві, щоб зменшити потребу у

мінеральних добривах і пестицидах, а отже – знизити забруднення ґрунтів та вод, енергозатрати й екологічний вплив агрохімічного виробництва.

Важливим аспектом управління біологічним азотом є баланс між стартовими внесеннями мінерального нітрогену і процесом встановлення симбіозу. Дослідження показують: молодим рослинам іноді потрібна незначна стартова доза мінерального азоту для забезпечення вегетативного росту в період колонізації коренів ризобіями, однак надлишок доступного ґрунтового азоту знижує стимул до встановлення симбіозу, оскільки рослина обирає легкодоступні джерела нітрогену із ґрунту замість енергетично витратної фіксації атмосферного азоту [72, 93]. Ця особливість робить необхідним тонке регулювання добривної політики в умовах застосування інокулянтів.

Механізми дії мікроорганізмів у ризосфері багатомірні. Азотфіксуючі бактерії перетворюють атмосферний азот у доступні форми, каталітичним ферментом для цього є нітрогеназа; активність нітрогенази чутлива до концентрації кисню, тому симбіотичні бактерії розвивають спеціальні адаптації для створення відповідного мікросередовища в бульбочці. PGPR продукують фітогормони (ІОК/ауксини, цитокініни, гібереліни), що стимулюють розвиток кореневої системи (поділ клітин, подовження клітин) і тим самим збільшують всмоктувальну поверхню; вони також можуть експресувати АСС-дезаміназу, що знижує рівень етилену в рослині й пом'якшує абіотичні стреси [79, 94]. Крім того, мікроорганізми, які розчиняють фосфати та мобілізують калій, виробляють органічні кислоти і ферменти, що розчиняють нерухомі сполуки мінералів і таким чином підвищують їх доступність для рослини. Багато штамів також продукують антимікробні сполуки (антибіотики, гідролітичні ферменти та ін.), що забезпечують біоконтроль фітопатогенів і зменшують біотичний тиск у ризосфері [57, 58]. Мікроорганізми ризосфери сприяють росту рослин за допомогою низки механізмів: підсилення мінералізації та мобілізації поживних речовин, синтезу фітогормонів (ауксинів, цитокінінів, гіберелінів), вітамінів та амінокислот, а також детоксикації забруднених ґрунтів. Окремі групи мікроорганізмів – такі як ризобії, азотобактери та азоспірили – здатні фіксувати

атмосферний азот і забезпечувати рослини доступним аміаком. Інші бактерії підвищують доступність фосфору, калію та сприяють мобілізації заліза й сірки [96].

Глибоке розуміння механізмів дії ризосферних бактерій, що стимулюють ріст рослин, є фундаментальним для цілеспрямованого маніпулювання ризосферою з метою максимізації процесів, які суттєво впливають на продуктивність агроecosystem (Рис. 1.1.2). Традиційно механізми дії PGPR поділяють на прямі та непрямі, хоча відмінність між ними не завжди є чіткою. У загальному розумінні непрямі механізми реалізуються переважно поза рослиною, тоді як прямі – усередині рослинних тканин і безпосередньо впливають на їхній метаболізм.

Прямі механізми є результатом взаємодії бактерій із регуляторними та захисними метаболічними процесами рослини, оскільки рослина реагує на сигнали, що надходять від мікроорганізмів. Вони охоплюють процеси, які змінюють баланс фітогормонів: або завдяки тому, що бактерії продукують регулятори росту, інтегровані в гормональну систему рослини, або тому, що вони здатні поглинати фітогормони, синтезовані самою рослиною [14, 15]. Такі механізми також включають індукцію метаболічних реакцій, що підвищують адаптивну здатність рослини до різних стресів. Два ключові процеси цієї групи – індукція системної стійкості до рослинних патогенів та підвищення толерантності до абіотичних стресів, зокрема до високої засоленості [22].

Прямі механізми PGPR включають продукцію фітогормонів [14, 15], інгібування синтезу етилену через активність ферменту ACC-дезамінази [13], індукцію системної резистентності рослин [22], збільшення проникності корневих тканин [18], мінералізацію органічної речовини в ризосфері [23], посилення асоціацій із мікоризними грибами [12, 19], а також участь у біоконтролі комах-шкідників завдяки синтезу специфічних метаболітів [28].

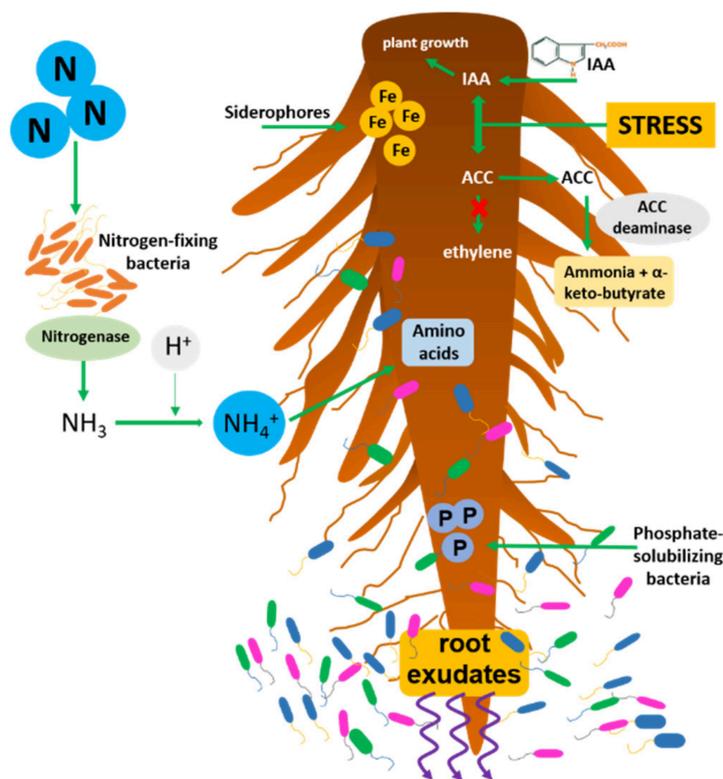


Рис. 1.1.2. Механізми дії ризосферних бактерій у стимуляції росту рослин [99].

Непрямі механізми, навпаки, пов'язані з покращенням умов існування рослини через зміни у ризосфері. До них належать процеси, що забезпечують підвищення доступності поживних елементів, зокрема завдяки вільній фіксації азоту, яка збільшує забезпечення рослин цим елементом [23]. Важливе значення має також виробництво сидерофорів, що підсилює мобілізацію малодоступного заліза та створює конкурентні переваги для PGPR у ризосфері [34]. Значну роль виконує біосолюбілізація фосфатів, що переводить їхні нерозчинні форми у доступні для рослини, а також здатність бактерій гідролізувати органічні молекули, вивільнені фітопатогенами. До непрямих механізмів належить синтез ферментів, які руйнують клітинні стінки патогенних грибів [23], а також утворення ціанистої кислоти, яка є характерною ознакою багатьох представників роду *Pseudomonas* і свідчить про їхню антагоністичну активність [34]. Крім того, PGPR здатні покращувати функціонування симбіозів ризобій і мікоризи, що додатково посилює живлення рослин та їхню стійкість до стресів [32, 10, 24].

Додавання PGPR (наприклад, представників *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Paenibacillus*, *Azospirillum*) часто посилює цей ефект через сумісну дію: продукування фітогормонів, мобілізація фосфору та калію і забезпечення біозахисту [91]. Дослідження Meena et al. (2020) і Bertola et al. (2019) [58, 79] показують, що біопрепарати сприяють вивільненню гормонів росту в ризосферу та стимуляції клітинного поділу, що пояснює збільшення площі листкової поверхні та підвищення фотосинтетичної продуктивності рослин.

У дослідженні Imran et al. (2010) [71] показано, що використання штаму *Ochrobactrum ciceri* Ca-34^T у комбінації з *M. ciceri* TAL-1148 призводило до збільшення кількості бульбочок на коренях нуту на ≈ 42 %, збільшення надземної біомаси на ≈ 31 % та зростання врожайності зерна на ≈ 64 % порівнюючи з контролем. Підтверджено, що комбіновані інокуляції, які поєднують ризобії, асоціативні азотфіксувальні бактерії та арбускулярні мікоризні гриби проявляють синергетичний ефект у підвищенні продуктивності бобових: наприклад, Laranjeira et al. (2021) [74] показали, що консорціум PGPR (представники *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Mesorhizobium*) у поєднанні з арбускулярною мікоризою підтверджував значне збільшення врожаю нуту в умовах дефіциту вологи (урожайність зростала в $1,45\times$ та $1,33\times$ у 2018 і 2019 роках відповідно). У дослідженні Nahusenay et al. (2024) [83] інокуляція штамом *Mesorhizobium* CP-M41 у поєднанні з мінеральним добривом NPSB збільшувала кількість бульбочок на 36,6 % і їхній об'єм на 51,2 % порівняно з контролем, що відповідно відобразилося в підвищенні сухої надземної біомаси та врожайності.

Також відмічені переваги комплексного поєднання ризобій із антагоністичними штамами (*Streptomyces*, *Bacillus*): Balti et al. (2025) [57] повідомляють, що така мультиінокуляція не лише стимулювала ріст нуту й підвищувала засвоєння поживних речовин, а й значно зменшувала ураження фузаріозом (*Fusarium redolens*). Аналогічно, мета-аналізи та огляди свідчать про загальну закономірність: інокуляція ризобіями в комбінації з PGPR і AMF підвищує нодуляцію, активність нітрогенази, забезпечення N та P у тканинах і, як наслідок, продуктивність більшості бобових культур [82, 91].

На мікробіологічному рівні було виокремлено також низку важливих факторів, які впливають на ефективність інокуляції: щільність і життєздатність інокулянту в ризосфері, сумісність штамів у консорціумах, технологія внесення (обробка насіння, ґрунтова інокуляція, фоліарні підживлення), а також агротехнічні практики (внесення пестицидів, механічні й хімічні обробки ґрунту), які можуть знижувати ефективність колонізації [92].

Відповідно, практично всі дослідники підкреслюють необхідність підбору локально адаптованих штамів та оптимізації технологічних режимів застосування для конкретних ґрунтово-кліматичних умов і сортів культур.

Отже, сучасні наукові дані свідчать, що використання мікробних препаратів (ризобіїв, PGPR, AMF, актинобактерій та інших груп) є ефективним засобом для стимулювання ростових процесів бобових культур. Ці ефекти проявляються в посиленні нодуляції та фіксації азоту, мобілізації фосфору й калію, модуляції фітогормонального статусу рослин, підвищенні фотосинтетичної активності, нарощуванні біомаси та збільшенні врожайності, а також у підвищенні стійкості до абіотичних і біотичних стресів. Для практичного запровадження біоінокулянтів рекомендовано інтегрувати мультифункціональні консорціуми мікроорганізмів із оптимізованою агротехнікою (регульовані стартові дози нітрогену, підбір місцево адаптованих штамів, контроль сумісності в консорціумах, оцінка впливу пестицидів), що дозволить досягти стійкого підвищення рентабельності й екологічної стійкості вирощування нуту та інших бобових культур [77, 94].

1.2. Матеріали дослідження

Матеріалами дослідження слугували сорти Буджак, Пам'ять, Скарб та Ярина нуту звичайного, комплексний мікробіологічний препарат Ризогумін та бактеріальна суспензія селекціонованого штаму *M. ciceri* ND-64. Мікробні препарати люб'язно надані працівниками Інституту сільськогосподарської мікробіології і агропромислового виробництва НААН України (м. Чернігів).

У таблицях 1.2.1 та 1.2.2 наведено біоморфологічні особливості сортів Скарб, Ярина, Буджак та Пам'ять нуту звичайного.

Біоморфологічні особливості та господарські ознаки нуту звичайного сортів Скарб та Ярина [30, 31]

Ознака	Прояв ознаки
	сорт Скарб / сорт Ярина
зона вирощування	для Степу та Лісостепу / для Степу, Лісостепу та Полісся
група стиглості	середньостиглий / середньоранньостиглий
висота рослин	55–65 см
висота кріплення нижнього боба	22–24 см / 22–25 см
потенційна врожайність	3,6 т/га / 5,0 т/га
наявність антоціанового забарвлення	відсутнє / наявне
розмір квітки	велика
забарвлення насінини	бежеве / коричневе
форма насінини	від кулястої до кутастої
розмір бобів	крупні, 1,2×2,3 см
вміст білка	30 % / 28 %
маса 1 000 насінин	420–430 г / 390–410 г

Примітка: однаковий прояв ознаки в обох сортах вказано один раз

Біоморфологічні особливості та господарські ознаки нуту звичайного сортів Буджак та Пам'ять [31]

Ознака	Прояв ознаки
	сорт Буджак / сорт Пам'ять
зона вирощування	Степ
група стиглості	середньостиглий
висота рослин	60-65 см, / 55-50 см

Ознака	Прояв ознаки
	сорт Буджак / сорт Пам'ять
висота кріплення нижнього боба	20-22 см
потенційна врожайність	2,0 т/га /1,74 т/га
наявність антоціанового забарвлення	відсутнє
розмір квітки	велика / середнього розміру
забарвлення насінини	бежеве / жовто-рожеве
форма насінини	проміжна / округле
розмір бобів	крупні, 1,3 x2, 4 см, /1,2x2,3 см
вміст білка	27-28 % / 28 %
маса 1 000 насінин	420 г / 280-300 г.

Примітка: однаковий прояв ознаки в обох сортів вказано один раз

Насіння нуту звичайного сортів Буджак, Пам'ять, Скарб і Ярина було надане О. В. Бушуляном із Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннізнавства та сортовивчення (м. Одеса). За даними досліджень [37], селекціонований штам *M. ciceri* ND-64 характеризується високою ефективністю як мікросимбіонт нуту звичайного, що зумовлено його вірулентністю, здатністю до фіксації атмосферного азоту та конкурентоспроможністю в ризосфері. Ризогумін є комплексним мікробним препаратом, призначеним для бактеризації насіння нуту звичайного з метою покращення азотного живлення рослин і підвищення їх продуктивності. До складу препарату входять суспензія бульбочкових бактерій нуту *M. ciceri*, а також фізіологічно активні сполуки біологічного походження (ауксини, цитокініни, амінокислоти, гумінові кислоти), мікроелементи у хелатній формі та сполуки макроелементів у стартових концентраціях. Застосування Ризогуміну забезпечує підвищення урожайності зерна нуту на 30–50 % за вирощування культури на нових площах і на 20–25 % за наявності щільної аборигенної популяції бульбочкових бактерій у ґрунті [8]. Мікробні препарати

було отримано в Інституті сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН України (м. Чернігів).

1.3. Схеми польових дослідів

Польові досліді проводили упродовж вегетаційного періоду 2025 року на ділянках агробіологічної лабораторії Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка (ТНПУ) у трьох варіантах та чотирьох повтореннях. Ґрунт дослідних ділянок – чорнозем типовий важкосуглинистий. Насіння нуту звичайного варіанту контроль (К) перед сівбою зволожували дистильованою водою з розрахунку 2 % від його сухої маси, а дослідних – рідкими формами бактеріальної суспензії селекціонованого штаму *M. ciceri* ND-64 (БС) та Ризогуміну згідно норм виробника. Технологія вирощування нуту звичайного була типовою для зони Лісостепу України (кількісна норма висіву – 400 тис. насінин на 1 га, широкорядний спосіб сівби (45 см), глибина загортання насіння – 3-4 см, насіння висівали у другій половині квітня) (Рис. 1.3.1).



Рис. 1.3.1. Маркування поля для сівби нуту звичайного на ділянках агробіолабораторії ТНПУ.

1.4. Методи дослідження

Дослідження фізіологічних показників рослин нуту звичайного здійснювали в лабораторії експериментальної біології, фізіології рослин і мікробіології, ділянках агробіології ТНПУ імені Володимира Гнатюка. Констатувальний експеримент проводили в Тернопільській загальноосвітній школі I-III ступенів № 24 під час проходження педагогічної практики. Параметри ростових процесів, зокрема, висоту стебла вимірювали за допомогою лінійки, рівень облиствлення встановлювали шляхом підрахунку кількості листків на одній рослині, а біомасу надземних органів – зважуванням на електронних вагах згідно з методичними рекомендаціями, наведеними З. М. Грицаєнко та співавторами [17]. У кожному варіанті досліду відбирали 80–100 характерних рослин для проведення повторень (Рис. 1.3.2).

Інтенсивність росту рослин (R) нуту звичайного упродовж вегетаційного періоду розраховували за формулою [50]:

$$R = (W1 - W0) \times 100 / W0,$$

де: W0 – початкові розміри рослини; W1 – розміри рослини на певний час. Приріст параметрів визначали як відсоток від початкового показника. Схема проведення досліджень представлена на Рис. 1.3.3.

Обробка статистичних даних здійснювалась за допомогою комп'ютерної програми *Microsoft Excel*.



Рис. 1.3.2. Рослини нуту звичайного у фазах бутонізації та зеленого бобу.



Рис. 1.3.3. Схема дослідження ростових процесів нуту звичайного.

1.4. Вплив мікробних препаратів на ростові процеси нуту звичайного

Ріст є інтегральним фізіологічним процесом рослинного організму та безпосередньо визначає його продуктивність. На інтенсивність ростових процесів впливають зовнішні фактори, внутрішні регуляторні системи та генетично закладений потенціал рослини. Серед зовнішніх чинників одним із ключових є мінеральне живлення, адже воно забезпечує поглинання й засвоєння з ґрунту макро- та мікроелементів, необхідних для нормального функціонування рослин. Для оптимального росту важливим є збалансований вміст поживних речовин, особливо нітрогену — основного елемента живлення [50].

За багаторічними фенологічними спостереженнями встановлено, що оптимальна висота рослин нуту звичайного в умовах півдня України становить 50–60 см [29]. У свою чергу, дослідження в умовах Західного Лісостепу показали, що під впливом мікробних препаратів висота стебла рослин різних сортів нуту у фазі повної стиглості бобів під час збирання врожаю варіювала від 85,2 см (сорт Буджак) до 107,1 см (сорт Пам'ять) (Рис. 1.4.1 – 1.4.4).

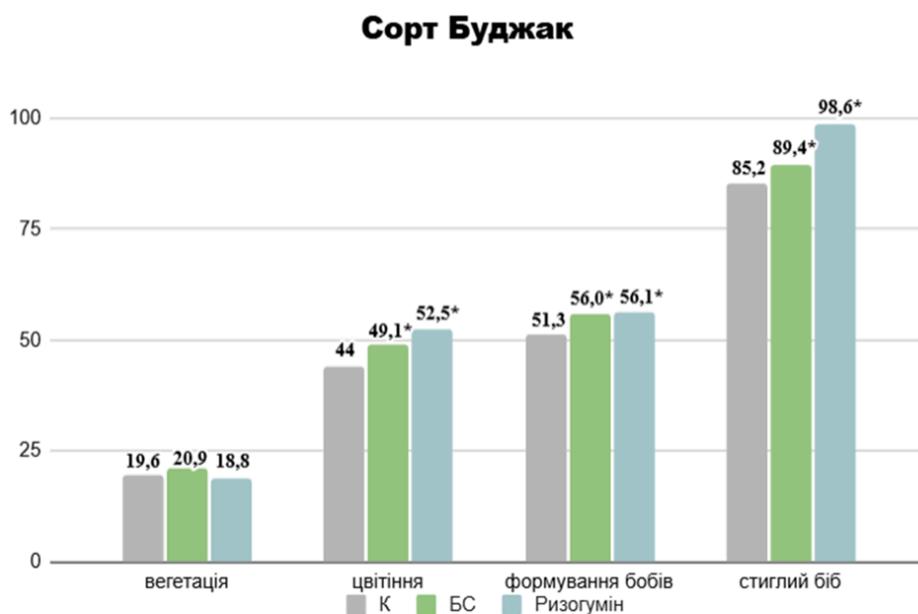


Рис. 1.4.1. Вплив мікробних препаратів на динаміку висоти стебла нуту звичайного сорту Буджак; * – відмінності порівняно з контролем вірогідні при $P \leq 0,05$.

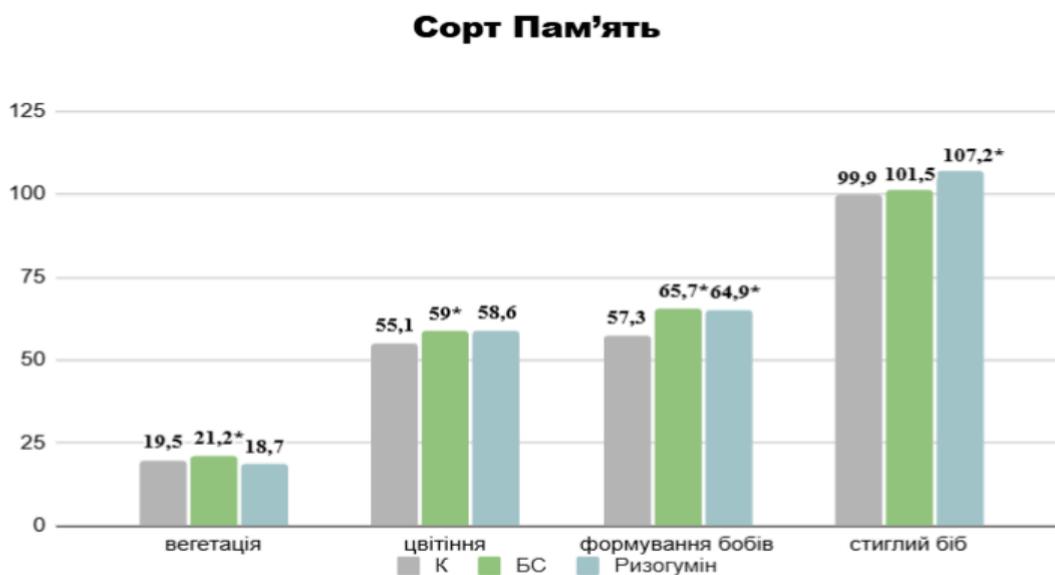


Рис. 1.4.2. Вплив мікробних препаратів на динаміку висоти стебла нуту звичайного сорту Пам'ять; * – відмінності порівняно з контролем вірогідні при $P \leq 0,05$.

Сорт Скарб

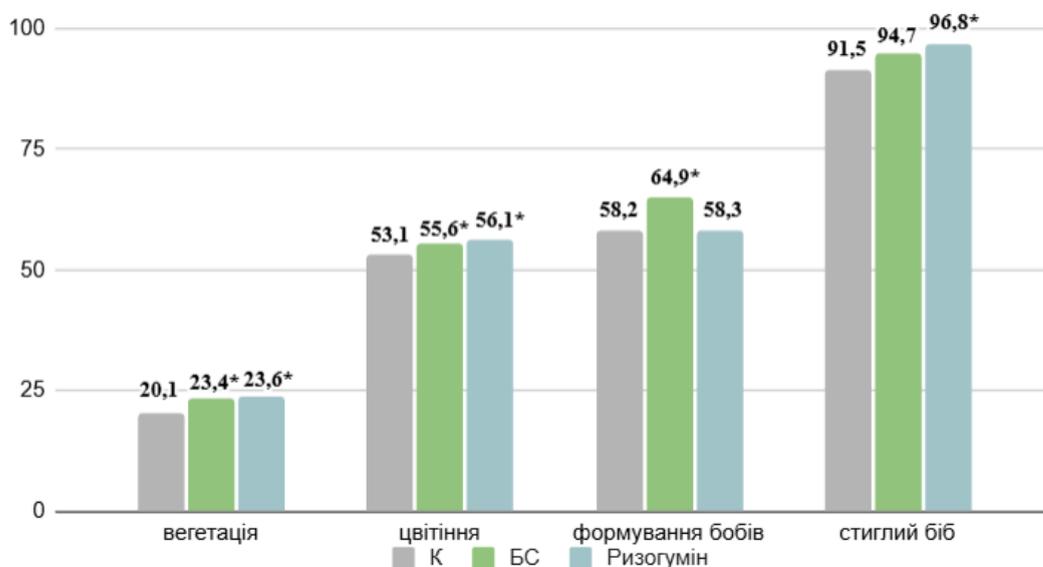


Рис. 1.4.3. Вплив мікробних препаратів на динаміку висоти стебла нуту звичайного сорту Скарб; * – відмінності порівняно з контролем вірогідні при $P \leq 0,05$.

Сорт Ярина

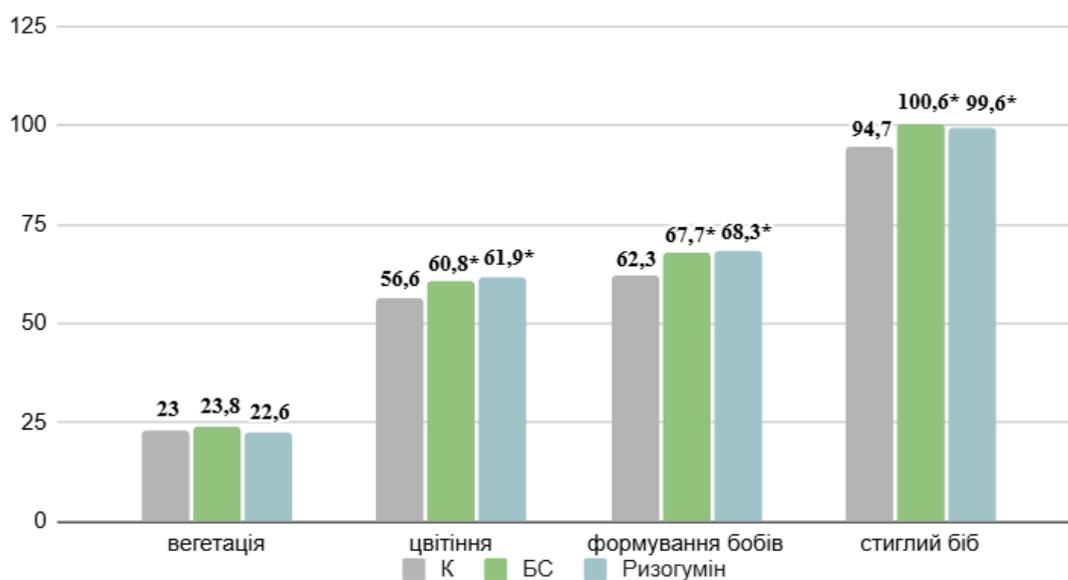


Рис. 1.4.4. Вплив мікробних препаратів на динаміку висоти стебла нуту звичайного сорту Ярина; * – відмінності порівняно з контролем вірогідні при $P \leq 0,05$.

За даними установи–оригінатора, середня висота рослин сортів Скарб і Ярина становить 55–65 см, сорту Буджак — 60–65 см, а сорту Пам'ять — 50–55 см [30, 31]. У дослідженнях, проведених у умовах Західного Лісостепу за спонтанної інокуляції місцевими популяціями бульбочкових бактерій (К) та за використання інтродукованих штамів *M. ciceri* (БС і Ризогумін), висота рослин виявилася значно більшою. Це пояснюється поліпшенням азотного живлення внаслідок біологічної фіксації молекулярного нітрогену нутоворизобіальними системами, дією біологічно активних речовин у складі препарату Ризогумін, а також впливом ґрунтово-кліматичних умов регіону. Упродовж вегетації рослини сортів Буджак і Ярина, інокуювані БС або Ризогуміном, за висотою стебла не поступалися контролю, а у фазі цвітіння їхній травостій був статистично вірогідно вищим: на 11,6 % і 7,4 % за обробки БС та на 19,3 % і 9,4 % – за застосування Ризогуміну. У фазі формування бобів збільшення висоти стебла становило відповідно 9,2 % і 8,7 % (БС) та 9,4 % і 9,6 % (Ризогумін). У фазі стиглого бобу приріст висоти був на рівні 4,9 % і 6,2 % (БС) та 15,7 % і 5,2 % (Ризогумін). Подібні тенденції простежено і для рослин сорту Пам'ять. За передпосівної інокуляції насіння БС висота стебла рослин була достовірно більшою на 8,7 % у фазі вегетації, на 7,1 % – у фазі цвітіння та на 14,6 % – у період формування бобів. За застосування Ризогуміну відмічено збільшення висоти на 6,3 % під час цвітіння, на 13,3 % — у фазі формування бобів та на 7,3 % — у фазі стиглого бобу. Для сорту Скарб у фазі активного росту та розвитку за інокуляції БС та Ризогуміном висота стебла підвищилася на 16,4 % та 17,4 % відповідно. Під час цвітіння приріст становив 4,7 % і 5,6 %. Статистично достовірні зміни було встановлено у фазі формування бобів за обробки БС (приріст 11,5 %) та у фазі стиглого бобу — за використання Ризогуміну (приріст 5,8 %). Одним із ключових показників, що відображає характер ростових процесів рослин, є інтенсивність росту (R). Встановлено, що рослини нуту звичайного досліджуваних сортів найактивніше нарощують стебло до фази цвітіння, що узгоджується з літературними даними [50]. Упродовж вегетаційного періоду найвищі значення R у ґрунтово-кліматичних умовах

Західного Лісостепу спостерігалися у рослин сорту Пам'ять; дещо нижчі – у сорту Скарб, тоді як сорти Буджак і Ярина характеризувалися проміжними значеннями, що зумовлено їх генетичними та сортовими особливостями (Рис. 1.4.5 - 1.4.8). Порівняльний аналіз інтенсивності росту стебла (R) у період «вегетація – цвітіння» дає змогу розташувати сорти нуту звичайного в такій послідовності:

- у контролі (К): Пам'ять > Скарб > Ярина > Буджак;
- за інокуляції БС: Пам'ять > Ярина > Скарб > Буджак;
- за застосування Ризогуміну: Пам'ять > Буджак > Ярина > Скарб.

Аналіз інтенсивності ростових процесів стебла сортів нуту звичайного у період «вегетація – формування бобів» підтвердив раніше встановлену закономірність. Винятком став варіант із застосуванням Ризогуміну, за якого рослини сорту Ярина демонстрували дещо вищий показник R порівняно з сортом Буджак. Під час порівняння параметрів інтенсивності росту у період «вегетація – стиглий біб» сорти нуту можна розташувати в такій послідовності:

- К: Пам'ять > Скарб > Буджак > Ярина;
- БС: Пам'ять > Буджак > Ярина > Скарб;
- Ризогумін: Пам'ять > Буджак > Ярина > Скарб.

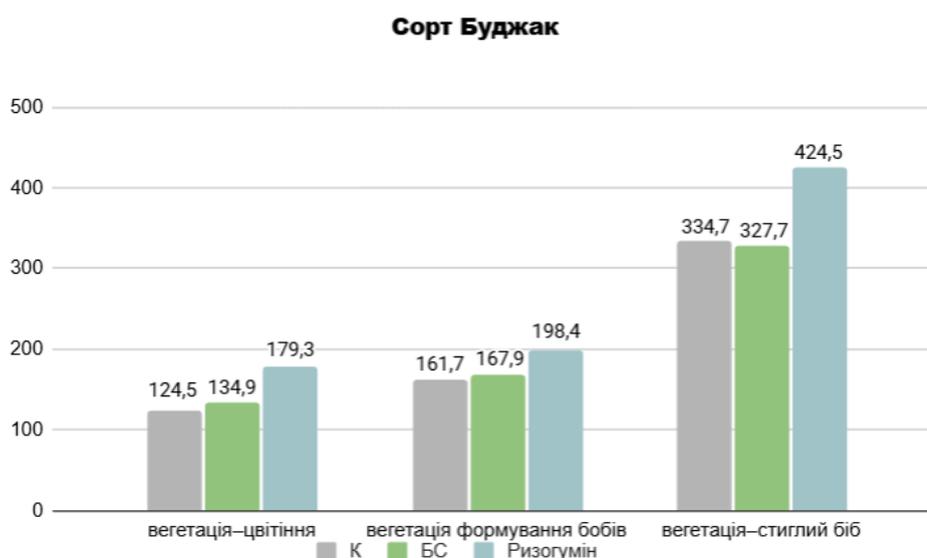


Рис. 1.4.5. Інтенсивність росту стебла нуту звичайного сорту Буджак за впливу мікробних препаратів, %.

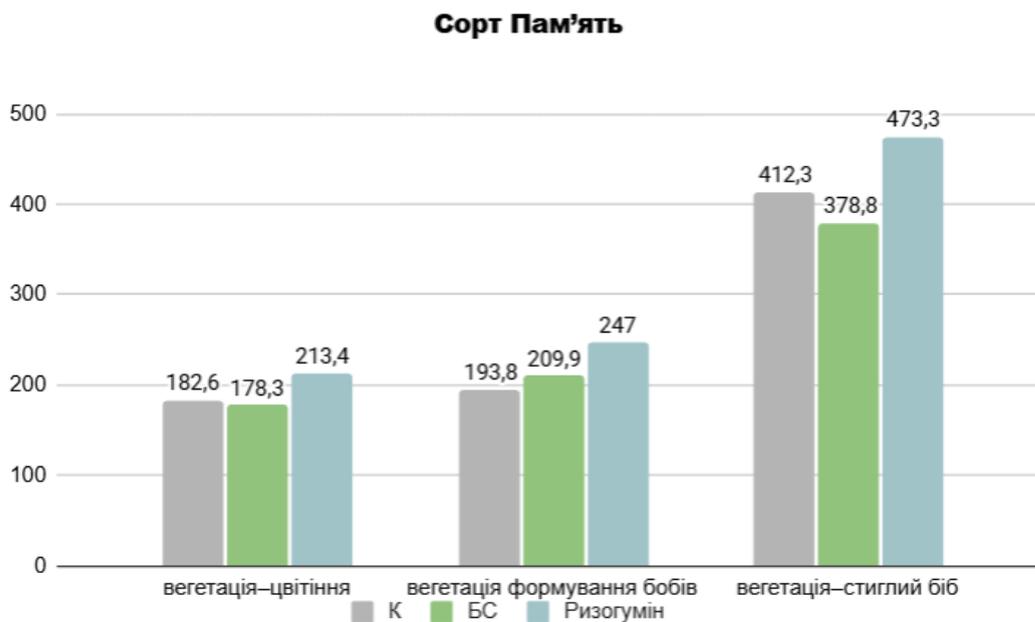


Рис. 1.4.6. Інтенсивність росту стебла нуту звичайного сорту Пам'ять за впливу мікробних препаратів, %.

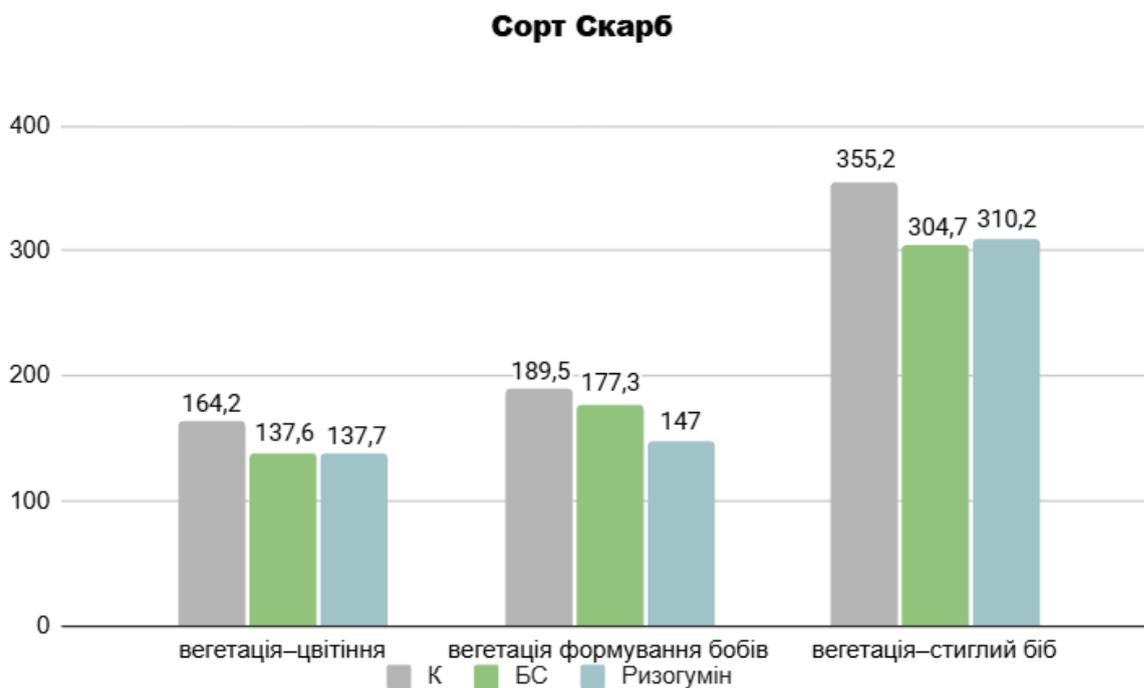


Рис. 1.4.7. Інтенсивність росту стебла нуту звичайного сорту Скарб за впливу мікробних препаратів, %.

Сорт Ярина

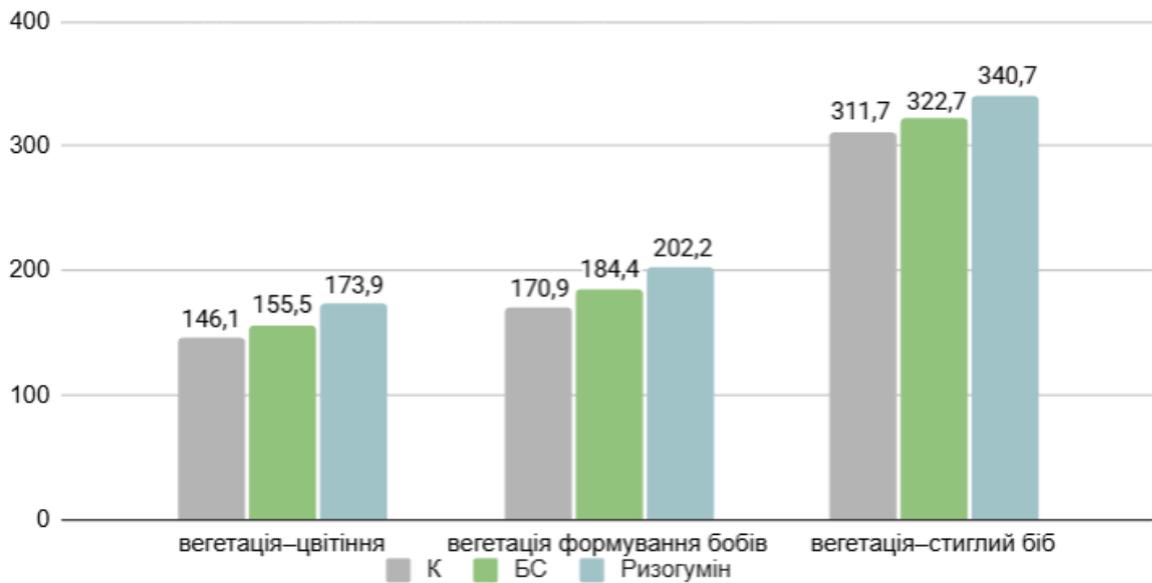


Рис. 1.4.8. Інтенсивність росту стебла нуту звичайного сорту Ярина за впливу мікробних препаратів, %.

Слід підкреслити, що за передпосівної інокуляції насіння комплексним мікробним препаратом Ризогумін найвищі значення R у періоди «вегетація – цвітіння» та «вегетація – стиглий біб» зафіксовано у сортів Пам'ять, Буджак та Ярина. Для сорту Скарб інтенсивність росту упродовж цих міжфазних періодів майже не відрізнялася в обох варіантах інокуляції.

Висота рослин нуту та ступінь облиствлення є важливими морфологічними характеристиками, що впливають на формування продуктивності посівів. Оскільки нут звичайний здатний до гілкування [30, 31], важливим завданням було оцінити вплив передпосівної обробки насіння мікробними препаратами на формування пагонів у кущі. Результати досліджень свідчать, що загалом рослини нуту звичайного утворюють у середньому 2–3 пагони першого порядку (Рис. 1.4.9 –1.4.12).

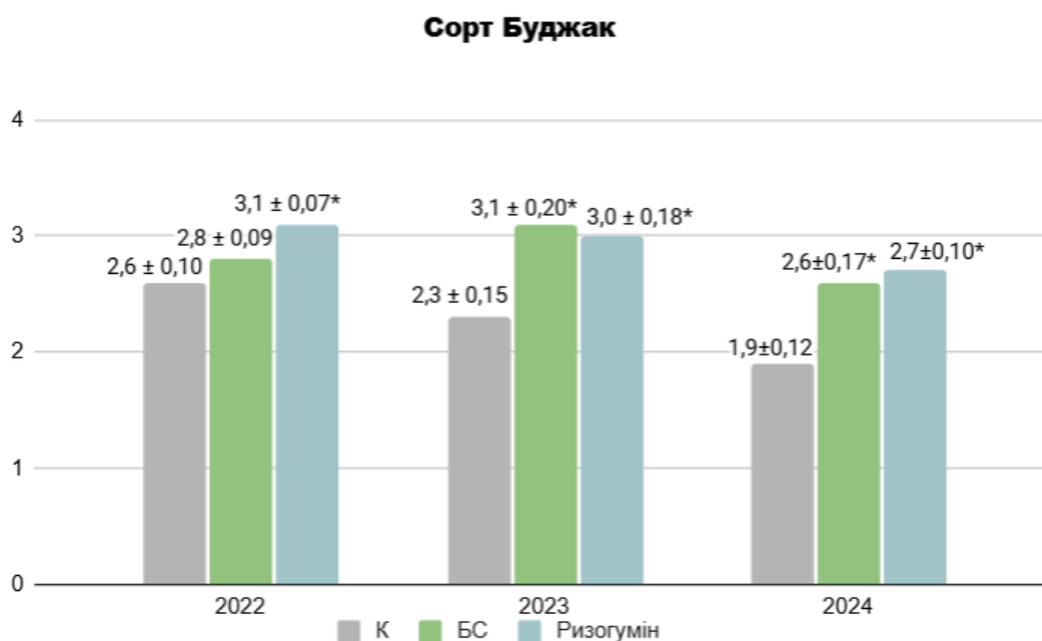


Рис. 1.4.9. Вплив мікробних препаратів на галуження стебла рослин стебла нуту звичайного сорту Буджак, фаза формування бобів, кількість пагонів 1-го порядку у кущі, шт.

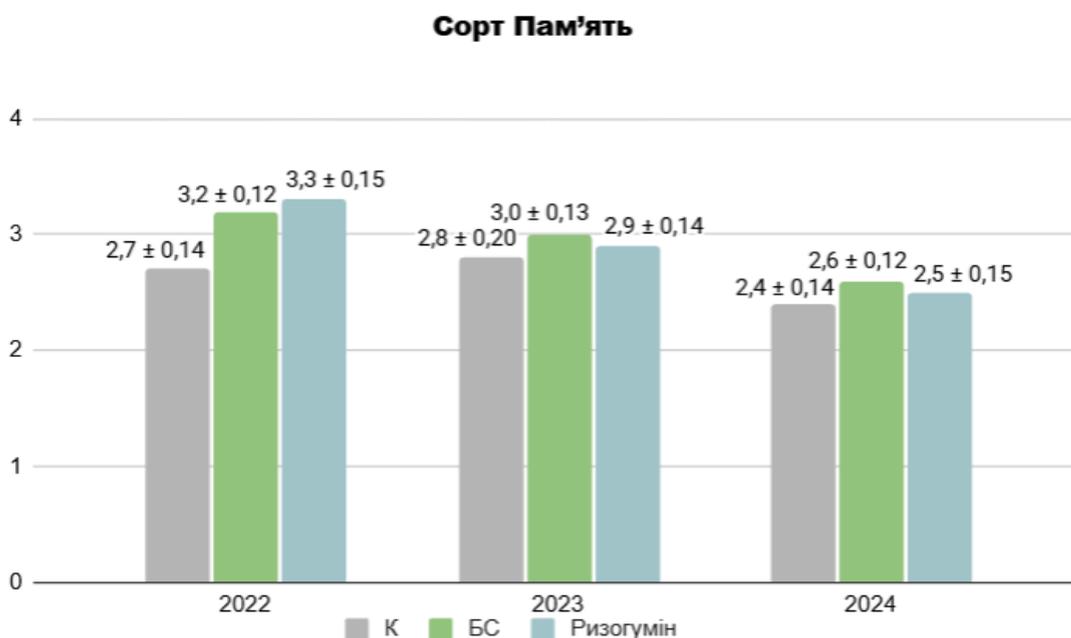


Рис. 1.4.10. Вплив мікробних препаратів на галуження стебла рослин стебла нуту звичайного сорту Пам'ять, фаза формування бобів, кількість пагонів 1-го порядку у кущі, шт.

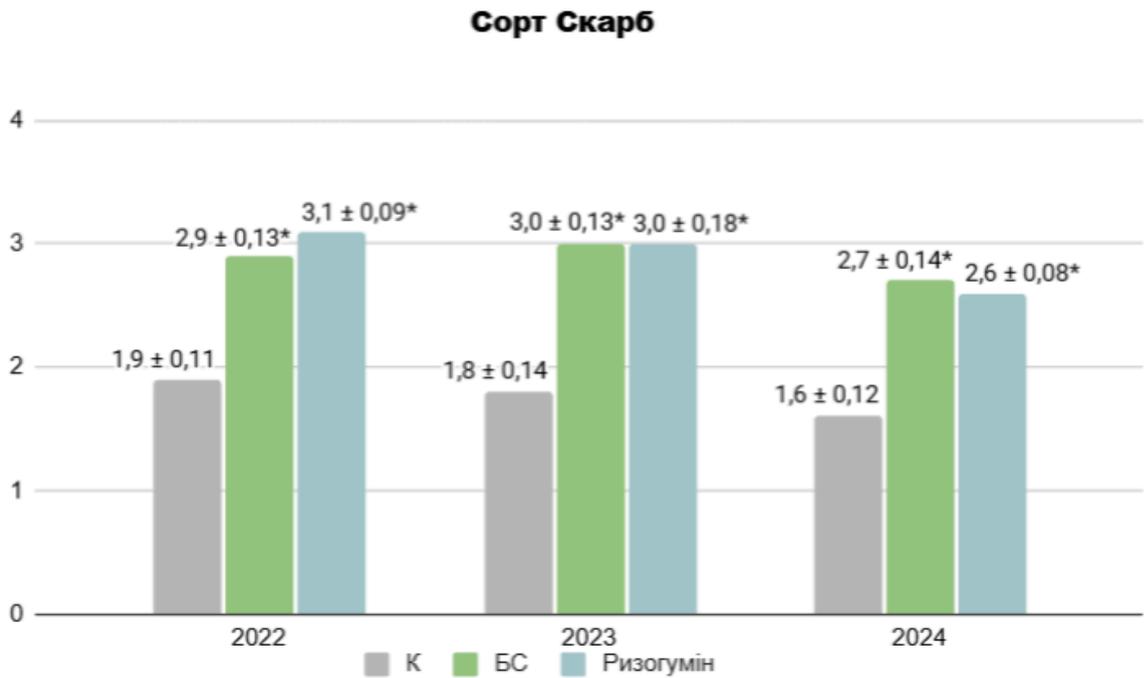


Рис. 1.4.11. Вплив мікробних препаратів на галуження стебла рослин стебла нуту звичайного сорту Пам'ять, фаза формування бобів, кількість пагонів 1-го порядку у куці, шт.



Рис. 1.4.12. Вплив мікробних препаратів на галуження стебла рослин стебла нуту звичайного сорту Ярина, фаза формування бобів, кількість пагонів 1-го порядку у куці, шт.

Формування куща нуту значною мірою залежить від дії мікробних препаратів та погодних умов травня–червня, коли відбувається активний ріст рослин. За застосування препарату БС кількість пагонів першого порядку у кущі збільшувалася в середньому на 11,5 % у сорту Пам'ять, на 21,7 % — у сорту Буджак, на 31,6 % — у сорту Ярина та на 61,1 % — у сорту Скарб. Під впливом Ризогуміну приріст становив відповідно 11,5 % (Пам'ять), 26,1 % (Буджак), 42,1 % (Ярина) та 61,1 % (Скарб). Загалом упродовж періоду дослідження для всіх сортів відзначено практично однакову середню кількість пагонів першого порядку в кущі за обох варіантів інокуляції.

Важливою характеристикою росту, що також визначає продуктивність рослин, є їх облиствлення. Оптимальна кількість листків повинна відповідати інтенсивності росту стебла: надмірне листя призводить до взаємного затінення, тоді як його нестача знижує фотосинтетичну ефективність. Дослідження засвідчили, що використання мікробних препаратів істотно впливає на показники облиствлення нуту звичайного протягом усього періоду вегетації (Рис. 1.4.13 –1.4.16).

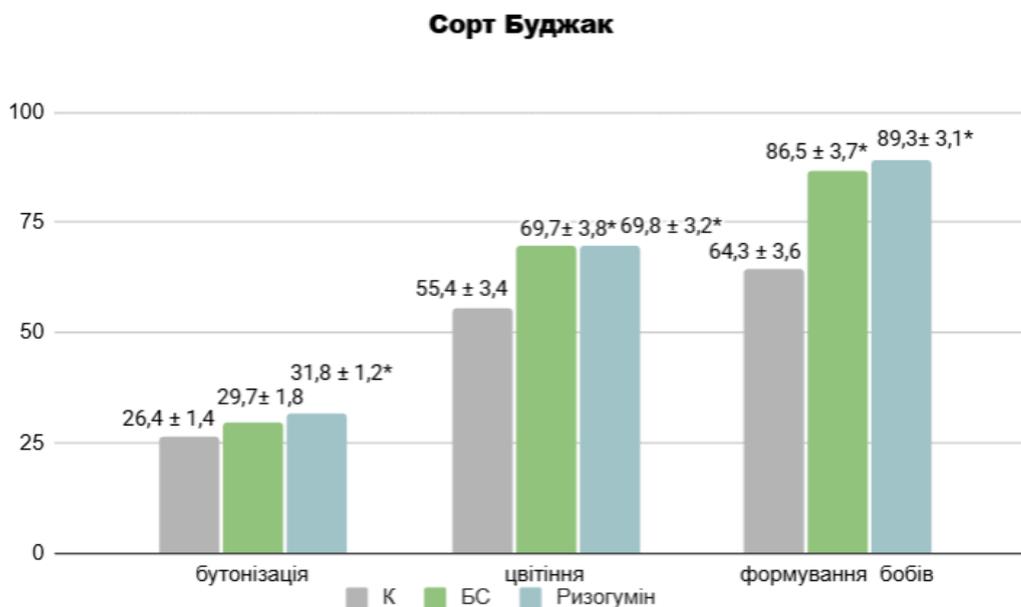


Рис.1.4.13. Вплив мікробних препаратів на динаміку облиствлення рослин нуту звичайного сорту Буджак, кількість листків на рослині, шт.; $M \pm m$.

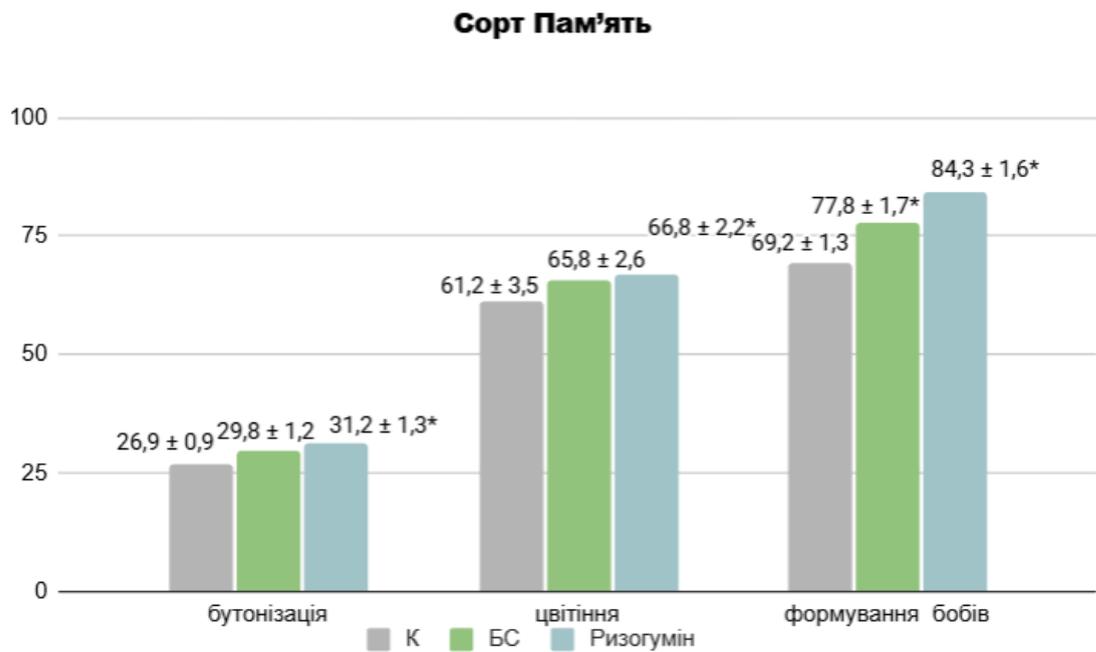


Рис. 1.4.14. Вплив мікробних препаратів на динаміку облиствлення рослин нуту звичайного сорту Пам'ять, кількість листків на рослині, шт.; $M \pm m$.

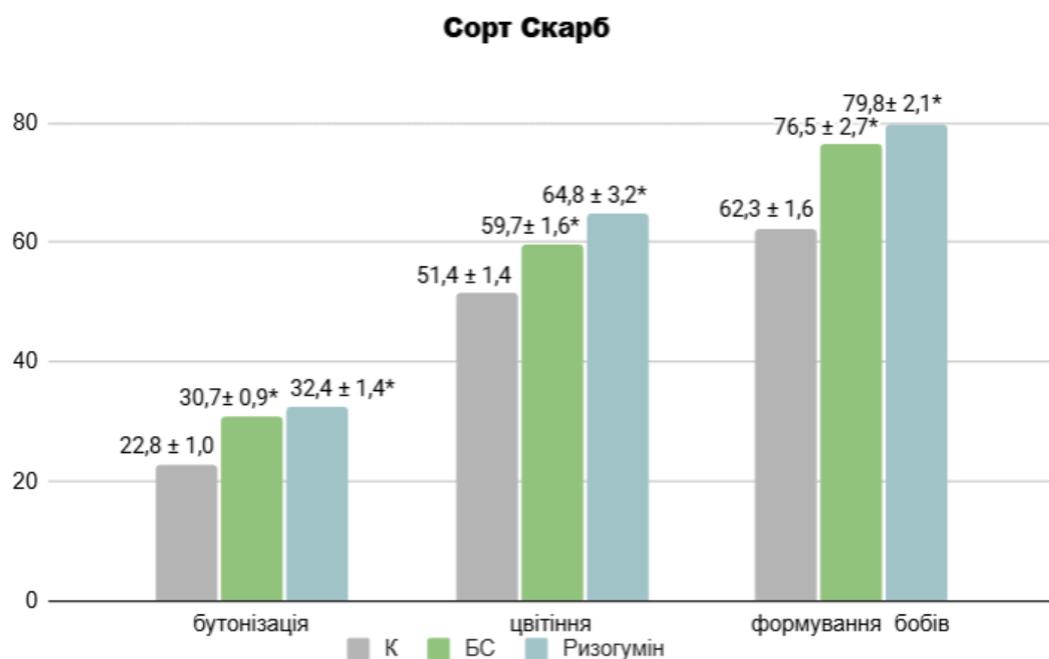


Рис.1.4.15. Вплив мікробних препаратів на динаміку облиствлення рослин нуту звичайного сорту Скарб, кількість листків на рослині, шт.; $M \pm m$.

Сорт Ярина

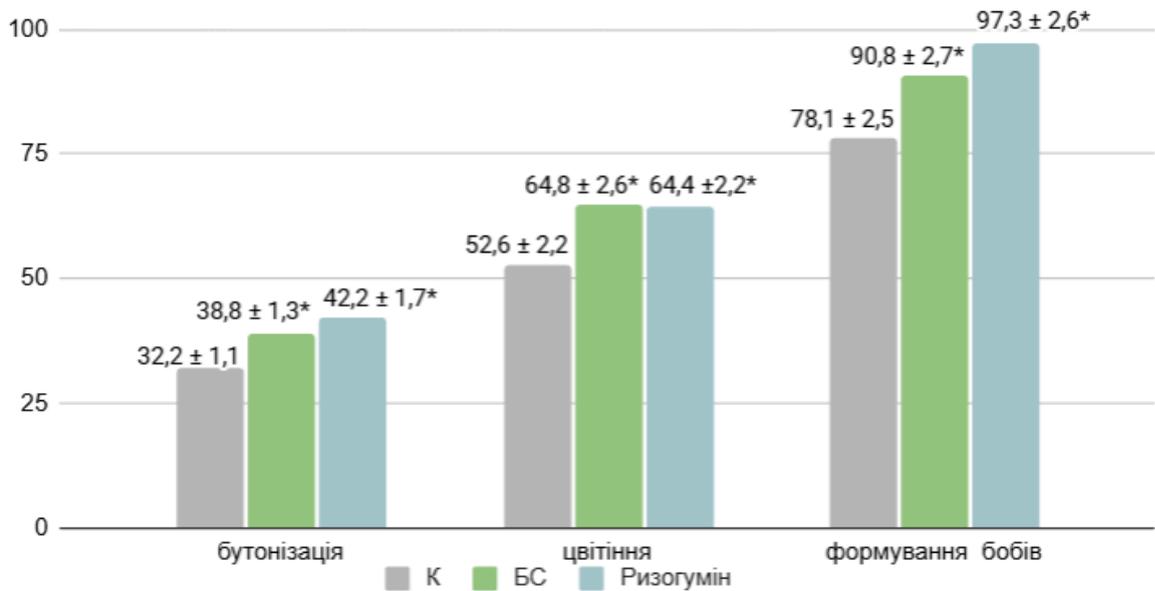


Рис.1.4.16. Вплив мікробних препаратів на динаміку облиствлення рослин нуту звичайного сорту Ярина, кількість листків на рослині, шт.; $M \pm m$.

У фазі бутонізації зафіксовано статистично достовірне зростання кількості листків у рослин сортів Буджак і Пам'ять — відповідно на 20,4 % і 16,0 % — за умови передпосівної обробки насіння Ризогуміном. Препарати БС і Ризогумін істотно впливали й на облиственість рослин сортів Скарб і Ярина: кількість листків під їх дією зросла на 34,6 % і 42,1 % у сорту Скарб та на 20,5 % і 31,1 % у сорту Ярина. У фазах цвітіння та формування бобів також відмічено підвищення кількості листків у сортів Буджак, Скарб, Ярина та Пам'ять за застосування БС і Ризогуміну: відповідно на 25,8 % і 26,0 %, 16,1 % і 26,1 %, 23,2 % і 22,4 %, 7,5 % і 7,8 %. Кількість листків на рослині безпосередньо залежить від висоти стебла та інтенсивності гілкування. Посилення облиственості у сортів нуту за дії мікробних препаратів пов'язане з покращеним азотним живленням, збільшенням висоти стебла та більшою кількістю пагонів у рослин дослідних варіантів.

Одним із ключових показників ефективності симбіозу є формування надземної маси бобових рослин [46]. Встановлено, що передпосівна обробка насіння мікробними препаратами, завдяки поліпшенню забезпечення нуту

азотом через біологічну фіксацію молекулярного нітрогену, активізувала роботу апікальної меристеми, посилювала ріст стебла, сприяла формуванню більшої кількості пагонів першого порядку та кращому облиствленню, що загалом забезпечувало інтенсивніше наростання надземних органів.

У фазі бутонізації статистично достовірне збільшення сирової маси надземних органів зафіксовано в усіх досліджуваних сортів за дії Ризогуміну та у сорту Пам'ять — за впливу БС (Рис. 1.4.18). Це пов'язано з тим, що до складу препарату, окрім бульбочкових бактерій нуту, входять амінокислоти, фітогормони (ауксини, цитокініни), гумінові речовини, макроелементи у стартових дозах та мікроелементи у хелатованій формі, які стимулювали ріст до моменту активного функціонування симбіотичних систем, сформованих інтродукованими штамми ризобій [28]. Подібні тенденції відзначено й у фазі цвітіння.

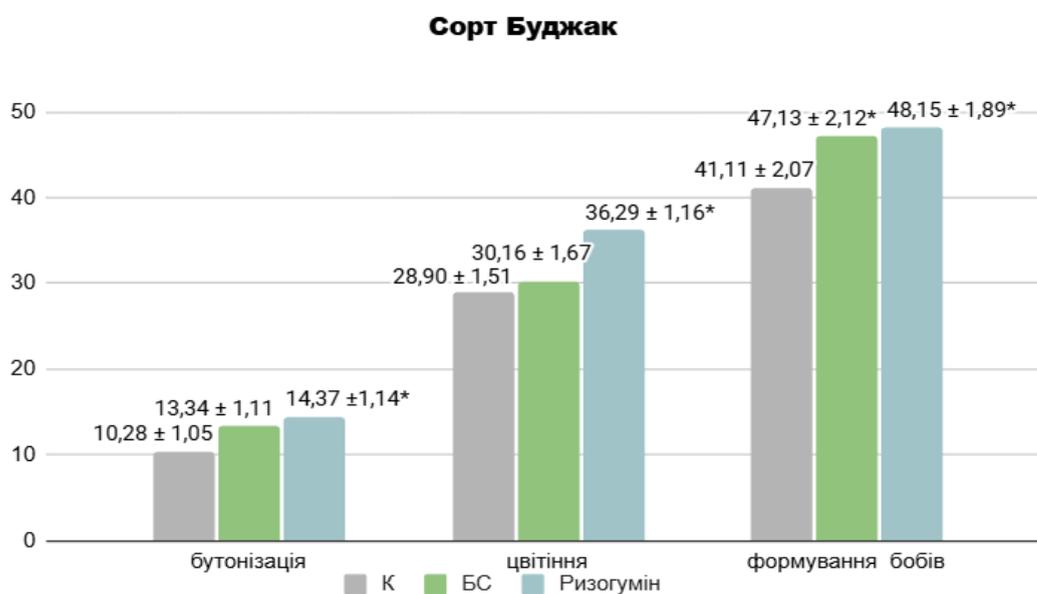


Рис.1.4.17. Вплив мікробних препаратів на динаміку формування сирової маси надземних органів рослин нуту звичайного сорту Буджак, сира маса надземних органів рослини, $M \pm m$.

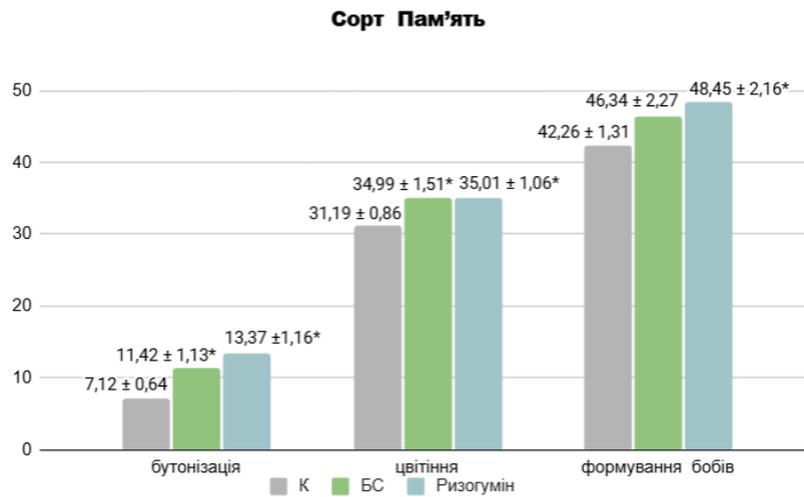


Рис. 1.4.18. Вплив мікробних препаратів на динаміку формування сирії маси надземних органів рослин нуту звичайного сорту Пам'ять, сира маса надземних органів рослини, $M \pm m$.

За інокуляції препаратом БС у цій фазі рослини сорту Скарб демонстрували істотно вищі значення цього показника порівняно з контролем. У період формування бобів передпосівна обробка насіння БС і Ризогуміном сприяла збільшенню сирії маси надземних органів нуту звичайного у сортів Буджак, Пам'ять, Скарб та Ярина відповідно на 14,6 і 17,1 %, 9,6 і 14,6 %, 13,6 і 20,7 %, 10,6 і 19,2 % (Рис. 1.4.19 -1.4.20).

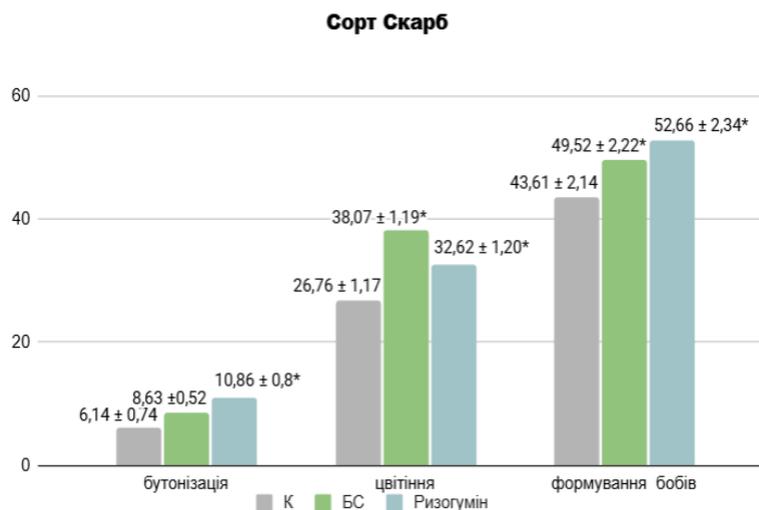


Рис.1.4.19. Вплив мікробних препаратів на динаміку формування сирії маси надземних органів рослин нуту звичайного сорту Скарб, сира маса надземних органів рослини, $M \pm m$.

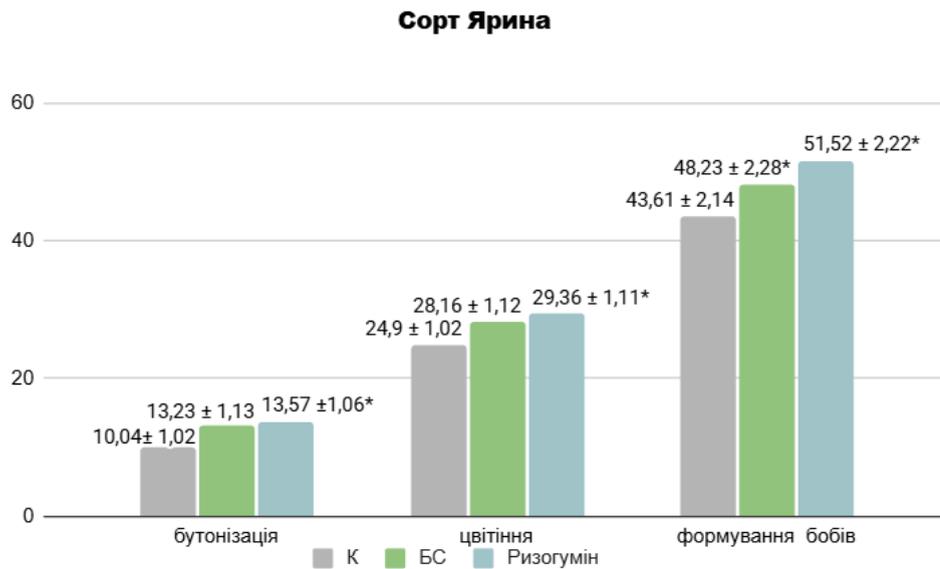


Рис.1.4.20. Вплив мікробних препаратів на динаміку формування сирої маси надземних органів рослин нуту звичайного сорту Ярина, сира маса надземних органів рослини, $M \pm m$.

Отже, передпосівна інокуляція насіння бактеріальною суспензією штаму *M. ciceri* ND-64 та комплексним мікробним препаратом Ризогумін сприяли активнішому росту стебла, кращому формуванню кущів, підвищенню облиствлення та наростанню надземної маси рослин нуту звичайного сортів Буджак, Скарб, Пам'ять і Ярина за вирощування в ґрунтово-кліматичних умовах Західного Лісостепу України.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РОСТОВИХ ПРОЦЕСІВ РОСЛИН ЯК ЗАСІБ ФОРМУВАННЯ ПРИРОДНИЧО-НАУКОВОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ УЧНІВ У ШКІЛЬНОМУ ПРЕДМЕТІ «БІОЛОГІЯ ТА ЕКОЛОГІЯ»

2.1. Теоретико-методичні засади формування природничо-наукової компетентності учнів у курсі біології та екології на рівні стандарту та профільного рівня

У сучасній системі загальної середньої освіти природничо-наукова складова посідає ключове місце, оскільки саме вона забезпечує формування в учнів цілісного уявлення про світ природи, науково обґрунтованого світогляду та відповідального ставлення до довкілля. Природнича освіта сприяє розвитку критичного і творчого мислення, формуванню ціннісних орієнтацій, соціальної активності й уміння приймати рішення на основі наукових даних. У руслі компетентнісного підходу її кінцевим результатом виступає сформована природничо-наукова компетентність учня, необхідність розвитку якої визначається положеннями чинних нормативно-правових актів. На важливість цього завдання наголошують Закон України «Про освіту» (2017) [25], Закон України «Про повну загальну середню освіту» (2020) [26], концепція «Нова українська школа» (2016) [45], а також «Державний стандарт базової і повної загальної середньої освіти» (2020) [21].

Зокрема у «Державному стандарті базової середньої освіти» зазначено, що природнича освітня галузь має забезпечити становлення особистості учня, який «розуміє фундаментальні закономірності живої і неживої природи, володіє навичками дослідження природних об'єктів, здатний усвідомлювати цілісність природничо-наукової картини світу, критично оцінювати вплив діяльності людини на довкілля й діяти відповідально у взаємодії з природним середовищем» [21].

Питання сутності та механізмів розвитку природничо-наукової компетентності активно досліджуються сучасними українськими науковцями, зокрема Г. Білецькою, В. Білик, Л. Величко, Т. Гладюк, М. Мельничук, Н.

Непорожньою та ін. [6, 7, 16, 40, 44]. Вагомий потенціал у формуванні відповідних компетентностей має навчальний предмет «Біологія», оскільки його зміст забезпечує інтеграцію базових природничих знань і дозволяє поєднувати біологічні закономірності з фізичними, хімічними та екологічними процесами. Такий міжпредметний синтез сприяє формуванню в старшокласників цілісної моделі природного світу, що підкреслюють у своїх працях О. Гринюк, І. Коренева, Т. Коршевнік, С. Рудишин, О. Шпак [33].

Наукова й методична значущість проблеми зумовлює її широке відображення в дослідженнях А. Бальохи, С. Гончаренка, В. Ільченка, С. Касярум, Л. Моторної, Л. Непорожньої, С. Семерікова, А. Степанюк [4, 44, 49]. На підставі узагальнення наукових джерел природничо-наукова освіта розглядається як цілеспрямований процес і результат оволодіння учнем системою природничих знань, практичних умінь і навичок, досвідом дослідницької діяльності та сформованих ціннісних орієнтацій. У межах цього процесу відбувається розвиток природничо-наукового мислення, екологічної культури, наукового світогляду та відповідального ставлення до довкілля [7].

Формування природничо-наукової компетентності, як і будь-який педагогічний процес, ґрунтується на положеннях загальнодидактичних і спеціальних принципів навчання. У філософській традиції принцип трактується як фундаментальне положення, що лежить в основі теорії або практичної діяльності. В освітньому процесі принципи виконують функцію методологічних орієнтирів, спрямовуючи вибір змісту, форм, методів і прийомів навчання [51]. У формуванні природничо-наукової компетентності ключовими виступають принципи науковості, системності, наступності, наочності, доступності навчального матеріалу, активності й свідомості здобувачів, а також принцип зв'язку теорії з практикою.

Концептуальні засади формування цілісності природничих знань учнів розроблені представниками відділу інтеграції змісту освіти [27]. Вони визначають, що ефективність цього процесу забезпечує:

- наявність у змісті навчальних предметів наскрізних понять, що виконують функцію онтодидактичного стрижня;
- чітко сформульовані державні вимоги до рівня сформованості природничих знань і вмінь;
- інтегративність змісту фізики, хімії, біології та географії;
- опора на єдине природничо-освітнє середовище, до якого входять матеріально-технічні ресурси ЗЗСО (кабінети, лабораторії, навчально-дослідні ділянки тощо);
- цілеспрямованість навчального процесу на формування природничо-наукової картини світу та розвиток ключових компетентностей, передусім природничо-наукової [27].

Згідно з Державним стандартом, формування природничо-наукової компетентності забезпечується вивченням фізики, астрономії, біології, хімії та географії [21]. Ефективність цього процесу визначається низкою факторів: внутрішніми (парадигмальні зміни в педагогічній науці, інноваційні освітні технології, методична підготовка вчителя) та зовнішніми (державна політика, соціокультурні умови, національні традиції, домінуючі цінності). Взаємодія цих факторів визначає рівень готовності учнів до саморозвитку, інтелектуальної мобільності та здатності застосовувати інтегровані природничі знання в реальних життєвих ситуаціях.

Аналіз сучасного стану природничої освіти засвідчує актуальність проблеми. За результатами міжнародного дослідження PISA-2022, середній показник українських учнів у сфері природничих наук знизився на 19 балів порівняно з 2018 роком і становить 450 балів, що на 35 балів нижче за середній показник Організації економічного співробітництва і розвитку (485 балів) [53]. Така тенденція вказує на необхідність оновлення змісту, методів і технологій навчання природничих дисциплін.

Науковий дискурс також засвідчує відсутність єдиного трактування поняття «природничо-наукова компетентність». Л. Непорожня визначає її як інтегровану систему знань, умінь, здібностей і ціннісних ставлень, які учень

актуалізує в реальних життєвих ситуаціях [44]. О. Ляшенко додає до структури компетентності метапредметний компонент, пов'язаний із застосуванням міждисциплінарних знань [38]. М. Мельничук акцентує увагу на формуванні уявлень про природу через практичну й дослідницьку діяльність учнів [40].

Узагальнюючи різні підходи, природничо-наукову компетентність розглядають як систему, що включає три взаємопов'язані компоненти:

1. Знаннєвий – охоплює засвоєння наукових понять, закономірностей і методів природничих наук, а також епістемних знань про способи отримання наукової інформації;

2. Діяльнісний – характеризує здатність застосовувати природничі знання у практичних, експериментальних і дослідницьких ситуаціях;

3. Ціннісний – виражає мотивацію до пізнання природи, сформованість відповідального ставлення до довкілля, здатність до рефлексії та оцінювання наслідків людської діяльності.

Формування природничо-наукової компетентності (ПНК) на етапі старшої школи має свою специфіку, що обумовлена як віковими особливостями старшокласників, так і функціональною роллю 10 класу у структурі профільної середньої освіти. У цей період навчання біології та екології характеризується зростанням рівня академічності, посиленням дослідницької складової й орієнтацією на підготовку здобувачів освіти до подальшої професійної траєкторії. Відповідно до «Державного стандарту базової і повної загальної середньої освіти» (2020), саме старша школа забезпечує умови для поглибленого засвоєння природничих дисциплін та формування здатності учнів використовувати наукові знання для інтерпретації реальних життєвих ситуацій, ухвалення рішень і розуміння взаємодії людини з природою [21].

Однією з ключових характеристик цього етапу є зростання академічної складності навчального матеріалу. У 10 класах зміст біології та екології значно розширюється за рахунок тем, пов'язаних із молекулярними механізмами життєдіяльності, біотехнологією, генетикою, фізіологією, екосистемним аналізом, екологічним моніторингом тощо. Таке ускладнення вимагає від учнів

сформованої здатності працювати з абстрактними поняттями, оперувати науковою термінологією та аналізувати складні природні процеси на різних рівнях організації живого [27, 44].

Важливою особливістю старшої школи є домінування дослідницької спрямованості навчання. Саме в 10 класах учні опановують повноцінний цикл наукового дослідження: постановку проблеми й формулювання гіпотези, планування експерименту, роботу з лабораторним обладнанням, обробку числових даних, статистичний аналіз і наукову презентацію результатів. Такий формат навчання сприяє розвитку операційно-технологічного, аналітичного та рефлексивного компонентів природничо-наукової компетентності [44], а також відповідає вимогам сучасної наукової освіти й концепції STEM [85, 86].

Невід’ємним компонентом формування ПНК у 10 класах є зростання рівня самостійності учнів. На цьому етапі навчання відбувається перехід від репродуктивних методів до самостійного планування навчальної діяльності, критичного аналізу інформації, роботи з науковими текстами та відкритими даними, виконання довготривалих проєктів. Учитель виступає вже не лише джерелом інформації, а й науковим консультантом, наставником і тьютором, що спрямовує дослідницький пошук учня [44, 85]. Такі зміни відповідають віковим особливостям старшокласників, які характеризуються розвитком логічного мислення, становленням ціннісних орієнтацій і здатністю до саморегуляції навчання.

Важливим зовнішнім чинником є орієнтація на підготовку до ЗНО/НМТ та вступу до ЗВО, яка потребує від старшокласників високого рівня сформованості як предметних знань, так і компетентнісних умінь. Підготовка до підсумкової атестації стимулює систематизацію матеріалу, роботу з тестовими й ситуаційними завданнями, виконання міні-досліджень, що моделюють реальні проблеми біології й екології. Результати PISA-2022 показують, що українським учням необхідний вищий рівень умінь аналізувати наукову інформацію, застосовувати дані у нових контекстах і аргументувати висновки на основі

доказів [53]. Відтак, навчання у 10 класах має бути спрямоване на розвиток scientific literacy – природничо-наукової грамотності, яка є складовою ПНК.

Особливу роль у старшій школі виконує лабораторна та проектна діяльність, можливості якої значно розширюються порівняно з основною школою. На профільному рівні передбачено виконання поглиблених лабораторних робіт, дослідів тривалої дії, дослідницьких практикумів, впровадження міждисциплінарних проєктів, використання цифрових сенсорів, віртуальних лабораторій та баз даних. Цей формат навчання сприяє формуванню умінь інтерпретувати дані, працювати з науковими інструментами й застосовувати методи, наближені до університетських [27, 85].

У той самий час, рівень стандарту має інші акценти. Тут реалізується формування базової ПНК, зосередженої на опануванні загальних біологічних закономірностей, екологічних зв'язків, основ наукового методу та екологічної культури. Лабораторні роботи мають спрощений характер і спрямовані на формування мінімально необхідних умінь: спостерігати, вимірювати, робити висновки, оцінювати вплив людської діяльності на природу [21].

Таким чином, формування природничо-наукової компетентності у 10 класах має комплексний характер і визначається поєднанням таких факторів, як академічна поглибленість змісту, домінування дослідницької діяльності, розвиток самостійності учнів, підготовка до зовнішнього оцінювання та розширення експериментальних можливостей навчання. Профільний і стандартний рівні реалізують різні моделі формування ПНК: перший – орієнтований на підготовку до наукової та професійної діяльності, другий – на забезпечення фундаментальної природничої грамотності. Поєднання цих моделей дозволяє створити гнучку систему природничої освіти, що відповідає потребам учнів та викликам сучасного суспільства [27, 44, 53].

Природничо-наукова компетентність у старшокласників є однією з ключових складових сучасної профільної освітньої моделі, оскільки забезпечує здатність учнів мислити системно, використовувати науковий метод і застосовувати знання з біології, хімії й екології в реальному житті. Відповідно

до підходів, рекомендованих у нормативно-методичних документах, формування ПНК передбачає поєднання пізнавально-продуктивної, комунікативної та поведінкової діяльності учнів. Пізнавально-продуктивна діяльність полягає у засвоєнні системи природничо-наукових знань, умінні формулювати та тестувати гіпотези, ставити цілі експериментів, інтерпретувати дані. Комунікативна модель роботи сприяє обміну ідеями й спільному аналізу, а поведінкова – реалізації екологічно відповідальних дій [33].

Практичні форми навчання виконують і вирішальну роль у становленні ПНК. Наприклад, навчально-практичні заняття з біології, побудовані на дослідницькій діяльності, сприяють розвитку науково-дослідницьких компетенцій – учні вчаться планувати експерименти, проводити спостереження, записувати результати, аналізувати їх і формулювати висновки. Це відображено в дослідженні А. М. Фроленко (2023) [52], яка вивчала формування таких компетенцій в учнів під час занять із загальної біології.

Одним із ефективних засобів формування ПНК є використання інформаційно-комунікаційних технологій. Наприклад, застосування ІКТ на уроках хімії старшої школи дозволяє учням моделювати процеси, аналізувати системи та систематично взаємодіяти з науковою інформацією, що розвиває їхню здатність до абстрактного мислення, прогнозування та самоаналізу [39]. Ще одним підходом є впровадження інтерактивних технологій навчання. Використання інтерактивних методів на уроках біології – наприклад, дискусій, проблемних завдань, рольових ігор – сприяє активізації пізнавальної діяльності учнів, розвитку їх допитливості, умінню працювати з інформацією та здійснювати науковий аналіз [9].

Важливо також звернути увагу на системні педагогічні експерименти, спрямовані на формування ПНК. Зокрема, Міністерство освіти і науки України затвердило експеримент «Система формування природничо-наукової компетентності учнів в умовах академічного ліцею» на 2022–2026 роки, що показує практичне визнання значущості цієї компетентності у профільній старшій школі. Крім того, сучасні методичні рекомендації підкреслюють

важливість середовищ, які стимулюють дослідницьку і творчу діяльність. Наприклад, інструктивно-методичні рекомендації для шкіл відзначають, що метою курсу «Біологія / Біологія і екологія» є формування в учнів уміння досліджувати живу природу, володіти методами наукового пізнання, а також відповідального ставлення до природи [9]. У старшій школі особливо перспективною є організація дослідницьких та міні-проектів, пов'язаних із ростовими процесами рослин і впливом мікробних або інших біологічних агентів. Такі проекти мають кілька важливих переваг: вони вимагають застосування гіпотезного підходу, експериментальної методології та аналізу даних; вони охоплюють знання з біології, екології та навіть хімії; вони дають практичний зміст – дослідження можуть мати екологічне або аграрне значення; робота з живими рослинами забезпечує емоційне залучення учнів; і, нарешті, аналіз результатів сприяє розвитку критичного мислення і наукового стилю мислення [27, 44].

Підсумовуючи, можна констатувати, що поєднання практико-дослідницьких форм (лабораторні заняття, польові дослідження, довготривалі експерименти), ІКТ-інструментів та проектної діяльності забезпечує системне формування ПНК у старшокласників. Такий підхід сприяє не лише глибшому розумінню наукових концепцій, а й вихованню екологічної відповідальності та наукового світогляду – саме тієї компетентності, яка є критичною для громадян XXI століття.

2.2. Вивчення проблеми ростових процесів у курсі біології та екології на рівні стандарту та профільного рівня

Аналіз чинних навчальних програм з біології та екології для 10 класів засвідчує, що проблема ростових процесів рослин посідає важливе місце у змісті шкільної біологічної освіти як на рівні стандарту, так і на профільному рівні. Зокрема, у програмах передбачено вивчення фундаментальних понять, пов'язаних із ростом і розвитком організмів, онтогенезом, обміном речовин, дією екологічних факторів, взаємодією організмів у природі, а також роллю мікроорганізмів у функціонуванні екосистем і агроекосистем [42, 43]. Подані в

таблицях (Табл. 2.2.1; 2.2.2) матеріали демонструють, що тематика ростових процесів рослин має міжтематичний і міждисциплінарний характер та інтегрується з низкою розділів курсу біології й екології. Це створює передумови для реалізації компетентнісного підходу, оскільки дає змогу поєднати теоретичні знання з практичною та дослідницькою діяльністю учнів. Вивчення росту рослин не обмежується засвоєнням визначень чи окремих біологічних фактів, а передбачає аналіз причинно-наслідкових зв'язків між фізіологічними процесами, умовами середовища та результативними показниками росту і розвитку.

Таблиця 2.2.1.

Інтеграція проблеми ростових процесів і дії мікробних препаратів у зміст шкільного курсу біології та екології (10 клас) профільного рівня [42]

Тема	Очікувані результати	Можливості інтеграції
Фактори середовища та їх вплив на організм	Знання екологічних факторів; уміння встановлювати залежності між інтенсивністю факторів і станом організмів; аналізувати адаптації та екологічні взаємодії	Пояснення впливу біотичних (мікроорганізми) та абіотичних (вода, температура, елементи мінерального живлення) факторів на ріст і продуктивність рослин; розгляд симбіозу «бобові–ризобії» як форми мутуалізму
Взаємодія організмів у природі (симбіоз, мутуалізм)	Розуміння різних типів взаємодій; уміння наводити приклади симбіозу; аналізувати його роль у природі та агроecosистемах	Розгляд нодуляції бобових як прикладу симбіозу; аналіз ролі PGPR, AMF і <i>Rhizobium</i> у формуванні стійкості та продуктивності рослин; пов'язання з екосистемними послугами ґрунтових мікроорганізмів

Тема	Очікувані результати	Можливості інтеграції
Біотехнології в сучасному сільському господарстві	Знає сутність мікробіологічних і клітинних біотехнологій; уміє оцінювати переваги й ризику біотехнологічних методів	Аналіз мікробних інокулянтів як біопрепаратів; ознайомлення з технологіями вирощування бобових із застосуванням <i>Rhizobium</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Azotobacter</i> ; порівняння ефективності різних штамів
Ґрунт як екосистема: ґрунтові організми та їх роль	Розуміння будови й функцій ґрунту; знання про угруповання мікроорганізмів у ґрунті; уміння аналізувати роль ґрунтових біоценозів	Вивчення впливу ґрунтових бактерій на доступність азоту, фосфору і калію; дослідження впливу біопрепаратів на родючість; встановлення зв'язку між структурою ґрунтової мікробіоти та ростом рослин
Метаболізм: фотосинтез, дихання, мінеральне живлення	Знає процеси фотосинтезу й дихання; пояснює роль мінеральних елементів; аналізує фактори, що впливають на продуктивність	Вимірювання вмісту хлорофілу в рослин різних варіантів досліду; оцінка ефективності засвоєння азоту й фосфору; пояснення ролі мікробних препаратів у збільшенні фотосинтетичної активності
Практичні та дослідницькі роботи	Виконання біологічних досліджень; уміння вимірювати, фіксувати та інтерпретувати дані; робота з лабораторними приладами	Проведення шкільного експерименту «Вплив мікробних препаратів на ріст бобових культур»; ведення дослідницького щоденника; побудова графіків росту; статистична обробка результатів

Тема	Очікувані результати	Можливості інтеграції
Проектна діяльність у біології та екології	Вміння планувати, захищати і презентувати проекти; застосовувати міждисциплінарні знання	Можливість створення довготривалого STEM-проекту: моніторинг росту рослин; оцінювання ефективності різних мікробних препаратів; підготовка учнівських наукових робіт (МАН)

Особливо широкі можливості для поглибленого вивчення ростових процесів рослин закладені у програмі профільного рівня. Теми «Метаболізм: фотосинтез, дихання, мінеральне живлення», «Фактори середовища та їх вплив на організм», «Взаємодія організмів у природі (симбіоз, мутуалізм)» дозволяють розглядати ріст як інтегральний фізіологічний процес, що залежить від взаємодії внутрішніх регуляторних механізмів і зовнішніх чинників. У цьому контексті експериментальні дослідження росту рослин під дією мікробних препаратів є методично доцільними, оскільки наочно демонструють роль азотного живлення, фітогормональної регуляції та симбіотичних взаємодій у формуванні біомаси рослин.

Вивчення взаємодії організмів у природі, зокрема симбіозу та мутуалізму, створює можливості для аналізу нодуляції бобових рослин як класичного прикладу взаємовигідної взаємодії між рослинами та азотфіксувальними бактеріями роду *Rhizobium* і *Mesorhizobium*. Такий підхід дає змогу поєднати знання з ботаніки, мікробіології та екології, а також сформуванню в учнів уявлення про біологічну фіксацію азоту як важливу ланку біогеохімічного кругообігу. Розгляд діяльності PGPR та арбускулярних мікоризних грибів у курсі екології поглиблює розуміння ролі ґрунтових мікроорганізмів у підтриманні родючості ґрунтів і стабільності агроєкосистем.

Теми шкільного курсу «Біологія і екологія» (10 клас, рівень стандарту), що безпосередньо пов'язані з ростовими процесами рослин і можуть інтегруватися з експериментальним дослідженням [43]

Тема	Очікувані результати	Можливості інтеграції
Життєдіяльність організмів: обмін речовин, енергії та зростання	Пояснює сутність процесів росту, значення енергії та речовин; аналізує фактори, що впливають на життєдіяльність рослин	Вивчення впливу азотфіксуючих та фосфатмобілізуючих бактерій на інтенсивність росту; вимірювання морфометричних параметрів рослин (висота, корінь, кількість бульбочок)
Екологічні фактори та їхній вплив на організми	Пояснює дію факторів середовища на організми; розпізнає адаптації; аналізує залежності «фактор–відповідь»	Розгляд мікробних інокулянтів як біотичного фактора; вивчення впливу дефіциту елементів живлення та дії мікробних препаратів на стійкість рослин
Взаємодія організмів у природі: симбіоз, мутуалізм, конкуренція	Наводить приклади симбіотичних взаємодій; пояснює значення симбіозу для організмів	Аналіз симбіозу «бобові - <i>Rhizobium</i> »; демонстрація бульбочок на коренях як результату біологічної фіксації азоту; оцінювання ролі PGPR у підвищенні біопродуктивності
Організми та середовище існування. Рослини	Описує умови життя рослин; характеризує пристосування до середовища; аналізує функції органів	Дослідження, як мікробні препарати впливають на кореневу систему; спостереження ростових адаптацій рослин у відповідь на живлення

Тема	Очікувані результати	Можливості інтеграції
Біорізноманіття : бактерії, гриби, рослини	Розпізнає групи організмів; пояснює роль мікроорганізмів у природі й житті людини	Розгляд PGPR, AMF, Rhizobium як екологічно важливих груп; ознайомлення з їх роллю у ґрунтових екосистемах та агроекосистемах
Проектна діяльність	Планує, виконує і презентує проекти; проводить спостереження та вимірювання; обробляє дані	Використання вашого досліду як основи STEM-проєкту; аналіз ростових кривих; робота з реальними даними; створення міні-дослідження або МАН-роботи

На рівні стандарту вивчення ростових процесів рослин має більш узагальнений характер, проте навіть у цьому випадку програма містить теми, які можуть бути наповнені експериментальним і прикладним змістом. Так, у межах тем «Життєдіяльність організмів: обмін речовин, енергії та зростання» і «Екологічні фактори та їхній вплив на організми» доцільним є аналіз впливу біотичних факторів, зокрема мікроорганізмів, на інтенсивність росту рослин. Розгляд мікробних інокулянтів як біотичного чинника дозволяє продемонструвати учням механізми адаптації рослин до дефіциту поживних елементів та стресових умов середовища.

Таким чином, результати аналізу змісту навчальних програм і представлені в таблицях можливості інтеграції свідчать, що проблема ростових процесів рослин органічно вписується в структуру шкільного курсу біології та екології. Реалізація експериментальних досліджень росту рослин, зокрема за впливу мікробних препаратів, дозволяє перейти від репродуктивного засвоєння знань до діяльнісного навчання, що є ключовою умовою формування природничо-наукової компетентності учнів.

2.3. Організація педагогічного дослідження

Педагогічне дослідження було організоване у формі формувального експерименту, спрямованого на перевірку ефективності авторської методики формування природничо-наукової компетентності учнів старшої школи засобами експериментальної діяльності.

Дослідження проводилося на базі Тернопільської загальноосвітньої школи І–ІІІ ступенів № 24 за участю учнів 10 класу (15 осіб), які навчаються за навчальним предметом «Біологія і екологія» рівень стандарту. Вибір цієї вікової групи зумовлений відповідністю змісту навчальної програми можливостям інтеграції експериментальної діяльності, пов'язаної з вивченням ростових процесів рослин.

Логіка проведення дослідження передбачала поетапну організацію діагностики. На початковому етапі, до впровадження експериментальної діяльності із застосуванням інокулянтів, було проведено початкове анкетування (пре-анкетування) з метою визначення вихідного рівня сформованості знань, умінь і ставлень учнів. Після завершення дослідницького етапу здійснювалося підсумкове анкетування (пост-анкетування), що дало змогу оцінити зміни в рівні природничо-наукової компетентності учнів унаслідок формувального впливу.

Використані анкети були побудовані з урахуванням компетентнісного підходу та забезпечували комплексну оцінку як предметних знань з біології та екології, так і дослідницьких та екологічно орієнтованих компетентностей. Структура обох анкет охоплювала чотири ключові блоки: теоретичні знання, розуміння наукового методу, екологічне мислення та мотиваційно-ціннісні орієнтації учнів, а також окремий блок відкритих запитань, спрямований на виявлення рівня рефлексії та здатності учнів до формулювання власних припущень і висновків.

Анкета для первинного оцінювання рівня теоретичних знань та дослідницьких умінь учнів (пре-анкетування)

Блок 1. Перевірка теоретичних знань

1. Інокуляція насіння — це:

А) обробка насіння мікроорганізмами для покращення росту; В) прогрівання насіння перед посівом; С) обробка насіння пестицидами; D) вимочування насіння у воді.

2. Нодуляція — це процес:

А) утворення квіток; В) утворення бульбочок на коренях бобових рослин; С) формування плодів; D) розмноження бактерій у ґрунті

3. Бульбочкові бактерії (ризобії) виконують функцію:

А) поглинають надлишок води; В) фіксують атмосферний азот; С) захищають листки від хвороб; D) сприяють фотосинтезу

4. Ростові процеси рослин — це:

А) збільшення маси та розмірів рослини; В) зміна форми листка; С) зміна кольору ґрунту; D) дозрівання насіння

5. До морфометричних показників належать:

А) рН ґрунту; В) висота рослини, кількість листків, пагонів; С) колір листків; D) вміст води в листках

6. Чому бобові рослини часто ростуть швидше після інокуляції?

А) бактерії забезпечують рослину азотом; В) бактерії підвищують температуру ґрунту; С) інокуляція пришвидшує проростання; D) інокуляція зменшує шкідників

7. Який фактор найбільше впливає на проростання насіння?

А) маса рослини; В) освітлення; С) вологість; D) кількість пагонів

8. Якщо рослина повільно росте, але листки зелені, найімовірніша причина:

А) нестача світла; В) дефіцит води; С) грибкове ураження; D) неправильна інокуляція

9. Якщо рослини дослідної групи (оброблені інокулятом) вищі, ніж контрольні, це означає:

А) випадковість; В) вплив чинника, який досліджується; С) помилку у вимірюваннях; D) надлишок азоту

10. Кореневі бульбочки — це:

А) пошкодження кореня; В) органи, де живуть азотфіксувальні бактерії; С) місце накопичення води; D) грибкове ураження

11. Найважливіший елемент, який рослина отримує завдяки ризобіям:

А) фосфор; В) азот; С) кальцій; D) калій

12. Контрольна група потрібна для:

А) порівняння ефекту досліджуваного чинника; В) пришвидшення росту; С) усунення помилок у записах; D) покращення якості ґрунту

13. Що належить до етапів наукового методу? (декілька відповідей):

А) формулювання гіпотези; В) вимірювання та спостереження; С) аналіз даних; D) складання розкладу уроків;

14. Чому важливо проводити вимірювання регулярно?

А) щоб мати динаміку змін; В) щоб рослини не зів'яли; С) щоб швидше утворилися квіти; D) щоб уникнути появи бур'янів

Блок 2. Ставлення та мотивація (за шкалою 1–5)

1. Мені цікаво вирощувати рослини;

2. Я люблю проводити дослідження;

3. Мені подобається працювати з реальними науковими даними;

18. Я хочу покращити свої дослідницькі навички;

19. Я хочу розуміти, як працює симбіоз «рослина — бактерія»;

20. Мені подобається працювати в команді;

Блок 3. Екологічне мислення

21. Чому важливо зменшувати використання азотних добрив?

А) вони можуть забруднювати ґрунт і воду; В) вони зменшують урожай; С) вони змінюють форму листків; D) вони сприяють хворобам рослин

22. Біопрепарати на основі ризобій цінні тому, що:

А) підвищують урожайність; В) є екологічними; С) зменшують потребу в добривах; D) всі відповіді правильні

23. Чи можуть біопрепарати частково замінити хімічні добрива в майбутньому?

А) так; В) ні; С) частково; D) важко відповісти

Блок 4. Очікування та гіпотези

24. Як ти вважаєш, які рослини ростимуть швидше?

А) контрольні; В) оброблені інокулятом; С) однаково; D) не знаю

25. Який морфометричний показник зміниться найбільше?

А) висота; В) кількість листків; С) кількість пагонів; D) маса надземної частини

26. Напиши свою гіпотезу для цього дослідження.

27. Які труднощі можуть виникнути під час досліду?

Результати проведеного пре-анкетування засвідчили, що учні 10 класу мають базові уявлення про біологічні основи ростових процесів рослин та роль азотфіксувальних бактерій, однак їхні знання є фрагментарними та потребують систематизації. Середня частка правильних відповідей становить близько 69–70%, що загалом відповідає середньому рівню теоретичної готовності до участі в експериментальній діяльності. Найкраще учні орієнтуються у питаннях, пов'язаних із поняттям ростових процесів, морфометричними показниками та функцією корневих бульбочок (понад 80% правильних відповідей). Водночас виявлено недостатнє розуміння етапів наукового методу, чинників проростання насіння та впливу інокуляції на рослину, що підтверджує потребу у спеціальній підготовці перед початком дослідницької роботи.

**Результати первинної діагностики рівня сформованості
природничо-наукової компетентності учнів (пре-анкетування)**

Номер питання	A	B	C	D	% правильних відповідей
1	10	2	2	1	66,6%
2	3	9	2	1	60%
3	1	11	2	1	73,3%
4	12	1	1	1	80%
5	1	13	1	0	86,6%
6	9	2	3	1	60%
7	0	5	8	2	53,3%
8	9	5	1	0	60%
9	2	11	1	1	73,3%
10	0	14	1	0	93,3%
11	1	13	1	0	86,6%
12	10	1	2	2	66,6%
13	✓ 11	✓ 13	✓ 10	–	
14	12	1	1	1	80%
Мотиваційно-ціннісний блок (за шкалою 1-5)					
Питання				Середній бал	
15 Мені цікаво вирощувати рослини				3,9	
16 Я люблю проводити досліди				4,2	
17 Подобається працювати з науковими даними				3,4	
18 Хочу покращити дослідницькі навички				4,5	
19 Хочу розуміти симбіоз «рослина — бактерія»				3,7	
20 Люблю працювати в команді				4,1	

Екологічне мислення					
Питання	A	B	C	D	% правильних відповідей
21	12	1	1	1	80%
22	3	1	2	8	53,3%
23	5	1	7	2	46,6%
Очікування та гіпотези					
Питання	A	B	C	D	% правильних відповідей
24	2	10	1	2	66,6%
25	✓ 11	✓ 13	✓ 10	✓ 10	
26	Узагальнені відповіді: «Після інокуляції рослини будуть рости швидше, бо бактерії дають їм азот»; «Коренева система буде розвиватися краще, тому що утворюються бульбочки»; «Рослини можуть бути більшими, бо симбіоз покращує живлення»;				
27	нерівномірне освітлення; забування про регулярні вимірювання; різна вологість ґрунту; помилки при маркуванні горщиків; пошкодження рослин під час догляду.				

Мотиваційно-ціннісний блок показав високий рівень внутрішньої зацікавленості учнів у проведенні експериментів: середні бали варіювали від 3.4 до 4.5, що свідчить про позитивне ставлення до практичної та дослідницької діяльності. Особливо високим виявився запит на розвиток власних наукових

умінь (4.5) та готовність працювати в команді (4.1). Це створює сприятливе середовище для організації колективних форм дослідницької роботи.

Блок екологічного мислення засвідчив достатньо сформоване розуміння екологічної цінності біопрепаратів: 80% учнів усвідомлюють ризики надмірного використання азотних добрив, а більшість респондентів визнає перспективність застосування мікробних інокулянтів у майбутньому. Учні також відзначили, що найбільш імовірним ефектом застосування інокулянтів буде збільшення висоти рослин, що узгоджується з науковими даними.

У блоці «Очікування та гіпотези» більшість учнів прогнозували перевагу дослідних рослин над контрольними, що свідчить про наявність попередніх уявлень про позитивний вплив мікробних препаратів. Водночас аналіз відповідей щодо ймовірних труднощів — таких як нерівномірне освітлення (5 учнів), забування про регулярні вимірювання (7 учнів), різна вологість ґрунту (4 учні), помилки в маркуванні (3 учні) та ризик механічного пошкодження рослин (2 учні) — засвідчив, що учні усвідомлюють організаційні та процедурні аспекти експерименту. Це свідчить про наявність критичного мислення та розуміння практичних викликів, пов'язаних з проведенням дослідів.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що учні демонструють достатній рівень теоретичної, мотиваційної та операційної готовності до участі в педагогічному експерименті, водночас виявлені прогалини у знаннях ідентифікують напрями, які потребують корекції на етапі підготовчого інструктажу. Отримані дані підтверджують доцільність упровадження авторської методики для підвищення рівня природничо-наукової компетентності старшокласників.

Проведення експериментальної частини — вирощування контрольних та інокульованих рослин із подальшими регулярними вимірюваннями морфометричних показників — стало центральним елементом методики. Саме систематична практична діяльність забезпечила перенесення знань у практичну площину й сприяла формуванню в учнів умінь спостерігати, порівнювати, аналізувати та робити висновки. Залучення школярів до повного циклу

наукового дослідження дозволило наблизити навчальний процес до реальної наукової практики.

Анкета для перевірки рівня засвоєння навчального матеріалу учнями після проведення експерименту (пост-анкетування)

Блок 1. Розуміння проведеного експерименту

1. Яку головну мету мав проведений експеримент?

- А) Визначити різницю у швидкості проростання різних культур.
- Б) З'ясувати, як інокуляція впливає на ріст бобових рослин.
- В) Порівняти ефективність мінеральних добрив.
- Г) Встановити оптимальну норму поливу.

2. Чому для досліду ми використовували рослини одного виду, одного віку та зі схожою масою насіння?

- А) Тому що так простіше спостерігати.
- Б) Щоб мінімізувати вплив випадкових чинників і забезпечити коректне порівняння.
- В) Тому що так було зручніше.
- Г) Щоб збільшити кількість рослин.

3. Навіщо у досліді була створена контрольна група?

- А) Для резервних рослин.
- Б) Щоб порівняти дію інокуляції з умовами без обробки.
- В) Щоб було більше варіантів.
- Г) Для визначення маси ґрунту.

Блок 2. Знання про симбіоз та інокуляцію

4. Яку роль відігравали бактерії *Mesorhizobium ciceri* у нашому експерименті?

- А) Прискорювали фотосинтез.
- Б) Забезпечували рослину азотом через формування корневих бульбочок.
- В) Підвищували випаровування води.
- Г) Збільшували температуру ґрунту.

5. Чому факт утворення корневих бульбочок свідчить про ефективність інокуляції?

- А) Це означає, що корінь добре розвинений.
- Б) Це ознака того, що між рослиною і бактеріями виник симбіоз та відбувається азотфіксація.
- В) Це ознака старіння рослини.
- Г) Це наслідок нестачі води.

6. Який із наведених показників найчастіше вказує на успішну інокуляцію?

- А) Пожовтіння листків.
- Б) Збільшення висоти рослин та кількості листків.
- В) Зменшення кількості пагонів.
- Г) Викривлення стебла.

Блок 3. Аналіз результатів експерименту

7. Чому вимірювання рослин проводили регулярно (кожні 5–7 днів)?

- А) Щоб підтримувати інтерес учнів.
- Б) Щоб отримати динаміку росту і виявити закономірності впливу інокуляції.
- В) Щоб мати більше числових даних.
- Г) Щоб не переплутати рослини.

8. Якщо середня висота рослин дослідної групи більша, ніж у контрольної — що це означає?

- А) Інокуляція мала позитивний вплив на ріст.
- Б) Контроль був неправильним.
- В) Рослини випадково вирости швидше.
- Г) ґрунт був неоднаковий.

9. У якому випадку результати експерименту можна вважати достовірними?

- А) Коли всі рослини мають однаковий розмір.
- Б) Коли умови були контрольовані, а відмінність між групами є стабільною та повторюваною.
- В) Коли результати збігаються з очікуваннями вчителя.
- Г) Коли рослини виглядають «красивіше».

10. Який морфометричний показник найточніше демонструє динаміку росту рослин?

- А) Одноразове вимірювання висоти.
- Б) Лише фінальна висота у кінці досліджу.
- В) Серія послідовних вимірювань висоти протягом кількох тижнів.
- Г) Суб'єктивна оцінка зовнішнього вигляду.

Блок 4. Поглиблене розуміння процесів

11. Якщо інокульовані рослини мають більше бульбочок, але ростуть лише трохи швидше, це означає:

- А) Інокуляція не подіяла.
- Б) Інокуляція була ефективною, але ріст обмежували інші фактори (світло, вологість тощо).
- В) Контрольні рослини були заражені.

Г) У вимірюваннях була допущена помилка.

12. Чому важливо не змінювати інтенсивність поливу під час експерименту?

А) Щоб економити час.

Б) Щоб усі рослини мали однакові умови, окрім інокуляції, і результати були коректними.

В) Щоб пришвидшити ріст.

Г) Щоб уникнути грибкових хвороб.

13. Який підсумковий висновок найточніше відображає результати експерименту?

А) Інокуляція суттєво прискорила ріст рослин.

Б) Інокуляція мала частковий ефект.

В) Інокуляція не вплинула на ріст.

Г) Результати не дають можливості зробити чіткий висновок.

Блок 5. Відкриті питання

14. Які нові знання про симбіоз бобових рослин і бактерій ви отримали під час виконання експерименту?

15. Чому, на вашу думку, інокуляція може зменшити потребу в азотних добривах?

16. Який етап експерименту був для вас найскладнішим? Поясніть, чому.

17. Як би ви покращили організацію експериментальної роботи наступного разу?

Результати підсумкової діагностики (пост-анкетування) після виконання експериментальної роботи

№ питання	Правильна відповідь	Кількість правильних	% правильних відповідей
1	Б	13	86,7%
2	Б	12	80,0%
3	Б	12	80,0%
4	Б	14	93,3%
5	Б	13	86,7%
6	Б	11	73,3%
7	Б	12	80,0%
8	А	12	80,0%
9	Б	11	73,3%
10	В	14	93,3%
11	Б	10	66,7%
12	Б	12	80,0%
13	А/Б	9	60,0%
14	Найбільш поширені відповіді: роль бактерій у фіксації азоту; значення корневих бульбочок; взаємовигідність симбіозу; вплив інокуляції на ріст рослин.		
15	бактерії забезпечують рослину азотом; менше потреби у хімічних добривах; екологічність методу.		
16	регулярність вимірювань; визначення бульбочок; точна фіксація даних; підтримання однакових умов.		
17	збільшити кількість рослин; робити фотофіксацію; частіше проводити вимірювання; посилити контроль за поливом.		

Результати пост-анкетування учнів після проведення експерименту засвідчили достатньо високий рівень засвоєння навчального матеріалу та формування дослідницьких умінь. У блоці питань, що стосувався розуміння структури та мети експерименту, правильні відповіді надали 80–86,7% учнів, що свідчить про сформоване уявлення про роль контрольної групи, важливість однакових умов та цілей дослідження. Найвищі показники отримано в блоці, присвяченому симбіозу та інокуляції: 86,7–93,3% респондентів коректно визначили роль *M. ciceri*, значення корневих бульбочок та основні ознаки ефективної інокуляції. Це підтверджує, що практична робота з рослинами сприяла глибшому засвоєнню біологічних механізмів.

У питанні аналізу результатів експерименту учні продемонстрували здатність інтерпретувати морфометричні показники, пояснювати відмінності між дослідною та контрольною групами та оцінювати достовірність даних: частка правильних відповідей у цьому блоці становила 73,3–93,3%. Це свідчить про формування ключових елементів дослідницької компетентності – уміння вимірювати, порівнювати та робити висновки.

Найнижчі результати спостерігалися у блоці поглибленого аналізу біологічних процесів (60–80%), що пов'язано з високим рівнем абстракції запитань та потребою враховувати комплексність факторів, які впливають на ріст рослин. Проте навіть ці показники свідчать про достатній рівень сформованості причинно-наслідкового мислення. Аналіз відкритих відповідей засвідчив, що учні усвідомили не лише біологічні механізми симбіозу, а й екологічну доцільність застосування інокулянтів та важливість точності вимірювань.

Узагальнення результатів педагогічного експерименту

Порівняльний аналіз результатів пре- та пост-анкетування засвідчив, що проведений експеримент суттєво вплинув на формування природничо-наукової компетентності учнів. Зокрема, завдяки систематичним спостереженням, роботі з реальними біологічними об'єктами та інтерпретації отриманих даних школярі продемонстрували не лише зростання рівня предметних знань, а й розвиток

умінь аналізувати, порівнювати, робити висновки та встановлювати причинно-наслідкові зв'язки.

Практична діяльність, пов'язана з інокуляцією та дослідженням ростових процесів рослин, виявилася ефективним інструментом формування таких ключових компонентів природничо-наукової компетентності, як: здатність застосовувати науковий метод, володіння базовими дослідницькими процедурами, розуміння ролі експерименту в науковому пізнанні, уміння працювати з морфометричними показниками та інтерпретувати результати біологічних спостережень.

Доцільність проведення експерименту підтверджується також тим, що учні виявили підвищений рівень мотивації та інтересу до навчання, охоче брали участь у вимірюваннях і фіксації результатів, демонстрували відповідальність за виконання завдань. Це свідчить, що експериментальні методи навчання сприяють активізації пізнавальної діяльності та підвищенню навчальної самостійності.

Проведення такого виду досліджень є надзвичайно важливим для сучасної біологічної освіти, оскільки дозволяє реалізувати компетентнісний підхід, який вимагає не стільки відтворення фактів, скільки вміння застосовувати знання у практичних ситуаціях. Робота з інокулянтами, спостереження за динамікою росту рослин та аналіз екологічних переваг біопрепаратів створюють для учнів умови, максимально наближені до реального наукового досвіду, що відповідає сучасним підходам STEM-освіти та вимогам Нової української школи.

Таким чином, отримані результати підтверджують не лише ефективність запропонованої методики, але й необхідність включення подібних експериментів у навчальний процес. Вони сприяють розвитку наукового мислення, формуванню екологічно відповідальної поведінки, підвищенню інтересу до природничих наук і забезпечують учням можливість відчувати себе суб'єктами наукової діяльності.

ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного дослідження теоретично обґрунтовано значення ростових процесів рослин як об'єкта біологічного пізнання та засобу формування природничо-наукової компетентності учнів. Аналіз наукових джерел засвідчив, що мікробні препарати істотно впливають на ріст бобових культур, що робить їх ефективним навчальним об'єктом для шкільних досліджень.

2. Передпосівна обробка насіння нуту звичайного сортів Буджак, Пам'ять, Скарб та Ярина бактеріальною суспензією штаму *Mesorhizobium ciceri* ND-64 та комплексним мікробним препаратом Ризогумін суттєво впливала на ростові процеси стебла, сприяла формуванню 2-3-х стебельних кущів з пагонами першого порядку та облиствленню рослин. За висотою стебла досліджувані сорти у ґрунтово-кліматичних умовах Західного Лісостепу були вищими порівнюючи з аналогічними показниками установи-оригінатора.

3. За впливу Ризогуміну визначено найвищий показник інтенсивності росту рослин у сортів Пам'ять, Буджак та Ярина у період вегетація – цвітіння та вегетація – стиглий біб. У сорту Скарб за обробки насіння обома препаратами ці показники майже не відрізнялися упродовж зазначених вище періодів. Мікробні препарати сприяли формуванню сирі маси надземних органів нуту звичайного упродовж онтогенезу. У фазі бутонізації суттєвіше на зазначений вище показник впливала обробка насіння перед сівбою Ризогуміном.

4. З'ясовано теоретико-методичні засади формування природничо-наукової компетентності учнів у курсі біології та екології на рівні стандарту та профільного рівня. Аналіз змісту чинної навчальної програми для 10-го класу показав можливість інтеграції досліджень ростових процесів у навчальний процес.

5. Розроблено та апробовано комплекс компетентнісно орієнтованих завдань, навчальних матеріалів та елементів дослідницьких робіт для учнів, спрямованих на формування природничо-наукової компетентності.

6. Аналіз результатів педагогічного експерименту показав, що залучення школярів до систематичного спостереження, вимірювання та аналізу ростових процесів підвищує рівень їх природничо-наукової компетентності. Учні показали кращі результати у вмінні формулювати гіпотези, працювати з експериментальними даними, робити висновки, застосовувати знання в нових ситуаціях.

7. Результати дослідження ефективності застосування мікробних препаратів у технології вирощування нуту звичайного за параметрами ростових процесів дали можливість створити якісний навчальний матеріал для організації дослідницької діяльності учнів. Розроблений методичний комплекс, інтегрований у навчальний курс «Біологія і екологія», виявився ефективним для розвитку дослідницьких умінь та мотивації до вивчення біології.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аграрії разом. Сорт Ярина (нут звичайний). URL: <https://agrarii-razom.com.ua/culture-variety/yarina>
2. Адаменко Т. Зміна агрокліматичних умов та їх вплив на зернове господарство. Агроном. 2006. № 3. С. 12 – 15.
3. Алексєєв О. О. Вплив екологічних факторів на розвиток і продуктивність бобово-ризобіального симбіозу. Сільське господарство та лісівництво. Екологія та охорона навколишнього середовища. 2016. №4. С. 187 – 196.
4. Бальоха А. С. Природознавча компетентність як складова професійної підготовки майбутнього вчителя початкових класів. Глобальні виклики педагогічної освіти в університетському просторі : Матеріали III Міжнародного конгресу, 2017. С. 138–139.
5. Бичкова Ю. В., Марченко Т. Ю., Боровик В. О. Ефективність симбіотичної азотфіксації в агроценозах України. Гончарівські читання: мат. Міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 94-річчю з дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора Гончарова Миколи Дем'яновича. 2023. Суми. С.73 – 75.
6. Білецька Г. А. Теоретичні і методичні засади природничо-наукової підготовки майбутніх екологів у вищих навчальних закладах : дис. д.-ра пед. наук : спец. 13.00.04 / Г.А Білецька. – Вінниця : Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, 2015. – 548 с.
7. Білик В. Г. Теоретичні і методичні засади природничо-наукової підготовки майбутніх психологів у закладах вищої освіти : дис. д.-ра пед. наук : спец. 13.00.04 / В.Г. Білик. – Київ : Національний педагогічний університет імені М.П. Драгоманова, 2015. – 590 с.
8. Біопрепарати для рослинництва. URL: <https://ismav.com.ua/produkcija/biopreparati-dlya-roslinnictva/>

9. Височан Д. О. Формування природничо-наукової компетентності вихованців через використання інтерактивних технологій навчання біології. 2015. Урок.ОСВІТА.UA. 57 с.
10. Волкогон В. В., Коломієць Л. П., Пиріг О. В. Вплив мікробних препаратів на формування фотосинтетичного апарату рослин люпину жовтого при дії вірусної інфекції. Зернові культури. 2012. № 3. С. 45–49.
<https://journal-grain-crops.com/uk/arhiv/view/59646a9ea0944.pdf>
11. Волкогон В. В. Мікробіологія у сучасному аграрному виробництві. Сільськогосподарська мікробіологія: міжвід. темат. наук. зб. Чернігів, 2005. Вип. 1 – 2. С. 6 – 29.
12. Воропай Ю. В., Гепенко О. В. Вплив норм висіву та способів сівби на фотосинтетичний потенціал рослин нуту в Східному Лісостепу України. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Сільськогосподарські науки. 2024. Вип. 2 (43). С. 30 – 35.
<https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-2.4>.
13. Воропай Ю. В., Чигрин О. В., Дерев'янка І. О. Вплив елементів технології вирощування на вміст хлорофілу в рослинах нуту. Таврійський науковий вісник. 2024. № 135. Частина 1. С. 40 – 45.
14. Гаврилянчик О., Трач С. Нут – перспективна зернобобова культура для України. Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції: збірник наук. праць міжнар. наук.-практ. конф. Ч. 1. Тернопіль : Крок, 2018. 313 с.
15. Гадзало Я. М., Кириченко В. В., Дзюбецький Б. В. Стратегія інноваційного розвитку селекції і насінництва зернових культур в Україні. Київ – Харків – Дніпро, 2016. 32 с.
16. Гладюк Т. В. Природничо-наукова компетентність майбутніх вчителів початкових класів. Професійні компетенції та компетентності вчителя. Тернопіль : Вид-во ТНПУ ім. В. Гнатюка, 2006. С. 152–155.
17. Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунту. Київ : Нічлава, 2003. 320 с.

18. ДСТУ 4770.4:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук заліза в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. [Чинний від 2009–01–01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 10 с.
19. ДСТУ 7861:2015. Якість ґрунту. Визначення обмінних кальцію, магнію, натрію і калію в ґрунті за Шолленбергером у модифікації ННЦ ІГА імені О. Н. Соколовського. [Чинний від 2016-07-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2016. III, 9 с. : табл.
20. Данильченко О. М., Бутенко А. О., Радченко М. В., Продуктивність сочевиці залежно від інокуляції насіння та мінерального живлення в умовах Північно-Східного Лісостепу України. Вісник Уманського національного університету садівництва. 2020. № 2. С. 19 – 22. <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2020-2-19-22>.
21. Державний стандарт базової середньої освіти : Постанова Кабінету Міністрів України № 898 від 30.09.2020 р. Міністерство освіти і науки України. URL: <https://mon.gov.ua/ua/osvita/zagalna-serednya-osvita/nova-ukrayinskashkola/derzhavnij-standart-bazovoyi-serednoyi-osviti>
22. Дубровский В. І., Швартау В. В., Михальська Л. М. Фотосинтез і врожай: проблеми, досягнення, перспективи досліджень. Садівництво. 2020. Вип. 75. С. 251 – 256. URL: <https://doi.org/10.35205/0558-1125-2020-75-251-256>
23. Дідович С. В., Кулініч Р. О. Високопродуктивні рослинно-мікробні системи в агроценоз бобових. Корми та кормовиробництво. 2013. № 76. С. 184 – 187.
24. Дідур І. М. Вплив передпосівної обробки насіння та позакореневих підживлень на динаміку формування площі листової поверхні рослин сої. Сільське господарство. Рослинництво, сучасний стан. 2022. №27. С. 5 – 14. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2022-4-1>.
25. Закон України «Про освіту». 2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text>

26. Закон України «Про повну загальну середню освіту». 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/463-20#Text>
27. Ільченко В. Р. Теоретичні та методичні засади інтеграції природничо-наукової освіти основної школи : посібник / В.Р. Ільченко, К.Ж. Гуз та ін. Київ : Видавничий дім «Сам», 2017. 320 с.
28. Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. URL: <https://ismav.com.ua/>.
29. Каленська С. М. Формування врожаю нуту під впливом елементів технології вирощування. Вісник ПДАА. 2012. № 2. С. 21–25
30. Каталог сортів та гібридів селекційно-генетичного інституту нац. центру насіннєзнавства та сортовивчення. Одеса, 2023. 128 с.
31. Колесніков М. О., Кадиров Т. Р. Рекомендації по вирощуванню нуту в умовах півдня України. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. 44 с.
32. Колісник С. І., Кобак С. Я., Іванюк С. В. Використання мікробних препаратів при вирощуванні зернобобових культур. Посібник українського хлібороба. 2013. Том 2. С. 74–76.
33. Коршевніук Т. В. Опанування мовою науки та фактологічним матеріалом в компетентнісному навчанні біології учнівства гімназії. Підготовка майбутніх учителів фізики, хімії, біології та природничих наук у контексті вимог НУШ: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. 23-24 травня 2024 р., м. Тернопіль. 370 с.
34. Коць С. Я., Михалків Л. М., Воробей Н. А. Ефективність інокуляції люцерни новими штамми *Sinorhizobium meliloti* за різного вологозабезпечення ґрунту. Збірник наукових праць СГІ-НЦНС. 2015. № 26. С. 178 – 188.
35. Коць С. Я., Михалків Л. М. Фізіологія симбіозу та азотне живлення люцерни. К. : Логос, 2005. 300 с.
36. Кучер А. В., Кучер Л. Ю. Економічна оцінка агрохімічних заходів управління якістю продукції. Економіка підприємства: сучасні проблеми

- теорії та практики: матер. V міжнар. наук.-практ. конф. Одеса: Атлант, 2016. С. 34 – 35.
37. Логоша О. В., Халеп Ю. М., Воробей Ю. О. Економічна та біоенергетична ефективність бактеризації нуту штамом *Mesorhizobium ciceri* nd-64. Сільськогосподарська мікробіологія. 2020. Вип. 31. С. 64 – 71. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.31.64-71>.
38. Ляшенко О. І. Компетентність як об'єкт оцінювання навчальних досягнень учнів. Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка. Серія : Педагогічна. 2014. Вип. 20. С. 36-39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkp_ped_2014_20_14
39. Макеев С. Ю., Грановська Т. Я., Сидоренко О. В. Формування природничо-наукової компетентності засобами ІКТ на уроках хімії у старшій школі. Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Теорія та методика навчання природничих наук. 2021. № 1. С. 63–77.
40. Мельничук М. Розвиток природничо-наукової компетентності у здобувачів освіти початкової та середньої школи. *Asta Paedagogica Volynienses*. 2023. № 2. С. 45–49.
41. Міндовкілля і ґрунти: земля пішла на милість аграріям. Екополітика. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/mindovkillya-i-grunti-zemlya-pishla-na-milist-agrariyam/>
42. Навчальна програма з біології і екології для 10–11 класів (профільний рівень). Навчальна програма для закладів загальної середньої освіти: затверджена Наказом Міністерства освіти і науки України № 1407 від 23 жовтня 2017 р. URL: <https://osvita.ua/school/program/program-10-11/58916/>
43. Навчальна програма з біології і екології для 10–11 класів (рівень стандарту). Навчальна програма для закладів загальної середньої освіти: затверджена Наказом Міністерства освіти і науки України № 1407 від 23 жовтня 2017 р. URL: <https://osvita.ua/school/program/program-10-11/58915/>

44. Непорожня Л. В. Формування природничо-наукової компетентності старшокласників у процесі навчання фізики : методичний посібник. К. : ТОВ «КОНВІ ПРІНТ», 2018. 204 с
45. Нова українська школа. Концептуальні засади реформування середньої школи. Київ: МОН України, 2016. 40 с. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/nova-ukrainska-shkolacompressed.pdf>
46. Патица В. П., Коць С. Я., Волкогон В. В. Біологічний азот. Київ, 2003. 424 с.
47. Петриченко В. Ф. Актуальні проблеми кормовиробництва в Україні. Вісник аграрної науки. 2010. № 10. С. 18 – 21.
48. Пустова З. В. Вплив бактеріальної обробки насіння на продуктивність квасолі звичайної. Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області. 2011. С. 146 – 152.
49. Степанюк А. В. Формування цілісних знань школярів про живу природу: монографія. Тернопіль : Вид-во «Вектор», 2012. 228 с.
50. Терек О. І., Пацула О. І. Ріст і розвиток рослин : навч. посіб. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2011. 328 с.
51. Український педагогічний словник. Київ : Либідь, 1997. 374 с.
52. Фроленко А. М. Формування науково-дослідницьких компетенцій під час навчально-практичних занять із загальної біології : кваліфікаційна робота / науковий керівник – к. б. н., доц. Е. О. Євтушенко. Кривий Ріг, 2023. 83 с.
53. PISA-2022. Результати. (Том I). Стан навчання та рівності в освіті: Міжнародний звіт за результатами міжнародного дослідження якості освіти PISA-2022 (переклад українською мовою) / перекл. Л. Овсяннікова; наук. ред. В. Терещенко; Український центр оцінювання якості освіти. Київ : УЦОЯО, 2024. 518 с.
54. Ahmad M., Naseer I., Hussain A., Zahid Mumtaz M., Mustafa A., Hilger T. H., Ahmad Zahir Z., Minggang X. Appraising Endophyte–Plant Symbiosis for Improved Growth, Nodulation, Nitrogen Fixation and Abiotic Stress

- Tolerance: An Experimental Investigation with Chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Agronomy*. 2019. Vol. 9. P. 621. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100621>
55. Al-Niemi T. S., Kahn M. L., McDermott T. R. P Metabolism in the Bean-Rhizobium tropici Symbiosis. *Plant Physiology*. 1997. Vol. 113. P. 1233–1242
56. Arkhipova T., Prinsen E., Veselov S., Martinenko E., Melent'ev A., Kudoyarova G. Cytokinin producing bacteria enhance plant growth in drying soil. *Plant Soil*. 2007. Vol. 292. P. 305-315. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9233-5>
57. Balti S., Mabrouk Y., Souihi M., Hemissi I., Amri I., Humm E., Khan N., Hirsch A. M. Combined inoculation of rhizobacteria with *Mesorhizobium* promotes growth, nutrient contents, and protects chickpea against *Fusarium redolens*. *AIMS microbiology*. 2025. Vol. 11. P. 318–337. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2025015>
58. Bertola M., Mattarozzi M., Sanangelantoni A. M., Careri M., Visioli G. PGPB colonizing three-year biochar-amended soil: Towards biochar-mediated biofertilization. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2019. Vol. 19. P. 841-850. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00083-2>
59. Boelens J., Vande Woestyne M., Verstraete W. Ecological importance of motility for the plant growth-promoting rhizopseudomonas strain ANP15. *Soil Biology and Biochemistry*. 1994. Vol. 26. P. 269–277. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90167-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90167-8)
60. Chen W. X., Wang E. T., Wang S., Li Y., Chen X., Li Y. Characterization of *Rhizobium tianshanense* sp. nov., a moderately and slow growing root nodule bacterium isolated from an arid saline environment in Xinjiang, People's Republic of China. *Int J Syst Bacteriol*. 1995. Vol. 45. P. 153–159.
61. Cosgrove D. J. Wall extensibility: its nature, measurement and relationship to plant cell growth. *The New phytologist*. 1993. Vol. 124. P. 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03795.x>

62. de Carvalho-Niebel F., Fournier J., Becker A., Marín Arancibia M. Cellular insights into legume root infection by rhizobia. *Current opinion in plant biology*. 2024. Vol. 81. P. 102597. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2024.102597>
63. Duke S. H., Callings M., Solenlaske R. M. Effect of K-fertilization on N-fixation, node enzyme of nitrogen metabolism in alfalfa. *Crop Science*. 1980. Vol. 20. P. 213-219.
64. Dzida K., Zawislak G., Jarosz Z., Pitura K., Neugebauerova J. Effect of natural fertilization on the yield, biological value, and qualitative and quantitative composition of essential oil in common basil (*Ocimum basilicum* L.). *Acta Agrobotanica*. 2023. P. 76. <https://doi.org/10.5586/aa/173137>
65. Elkan G. Taxonomy of the Rhizobia. *Canadian Journal of Microbiology*. 1992. Vol. 38. P. 446-450. <https://doi.org/10.1139/m92-075>
66. Geisler M., Nadeau J., Sack F. D. Oriented asymmetric divisions that generate the stomatal spacing pattern in arabidopsis are disrupted by the too many mouths mutation. *The Plant cell*. 2000. Vol. 12. P. 2075–2086. <https://doi.org/10.1105/tpc.12.11.2075>
67. Glick B. R. The Enhancement of Plant Growth by Free Living Bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*. 1995. Vol. 41. P. 109-117. <http://dx.doi.org/10.1139/m95-015>
68. Graham P. H., Vance C. P. Nitrogen fixation in perspective: an overview of research and extension needs. *Field Crop Res*. 2000. Vol. 65. P. 93–106. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00080-5)
69. Herridge D. F., Peoples M. B., Boddey R. M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant Soil*. 2008. Vol. 311. P. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9668-3>
70. Høgh-Jensen H. The effect of potassium deficiency on growth and N₂-fixation in *Trifolium repens*. *Physiologia Plantarum*. 2003. Vol. 119. P. 440-449
71. Imran A., Hafeez F. Y., Frühling A., Schumann P., Malik K. A., Stackebrandt E. *Ochrobactrum ciceri* sp. nov., isolated from nodules of *Cicer arietinum*.

- International journal of systematic and evolutionary microbiology*. 2010. Vol. 60. P. 1548–1553. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.013987-0>
72. Jinwen H., Afshar R. K., Chen C. Lentil response to nitrogen application and rhizobia inoculation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2016. Vol. 47. P. 2458-2464. <http://doi.one/10.1729/Journal.28938>
73. Kinzig A. P., Socolow R. H. Human impacts on the nitrogen cycle. *Phys. Today*. 1994. Vol. 47. P. 24–31. <https://doi.org/10.1063/1.881423>
74. Laranjeira S., Fernandes-Silva A., Reis S., Torcato C., Raimundo F., Ferreira L., Carnide V., Marques G. Inoculation of plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi improve chickpea performance under water deficit conditions. *Applied Soil Ecology*. 2021. P. 164. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103927>
75. Lea P. J., Sodek L., Parry M. A., Shewry R., Halford N. G. Asparagine in plants. *Ann Appl Biol*. 2007. Vol. 150. P. 1–26. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00104.x>
76. Leong J. Annull. *Rev. Phlytopaithol*. 1096. Vol. 24. P. 187-209.
77. Mahto R. K., Singh R. K., Kumar A., Kumar S., Yadav R., Dey D., Hamwieh A., Kumar R. Symbiotic nitrogen fixation for sustainable chickpea yield and prospects for genome editing in changing climatic situations. *Frontiers in plant science*. 2025. Vol. 16. P. 1621191. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1621191>
78. Makhoulouf H., Mouawad C., Shaban N. T., Aad J., Sassine L., Samaha H. Evaluation of the growth promoting effect of native microbial community under field conditions. *Acta Agrobotanica*. 2023. P. 76. <https://doi.org/10.5586/aa/168485>
79. Meena R., Meena M., Pravesh K. S., Chetan K Effect of fertility levels and bio-fertilizers on growth and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2020. Vol. 9. P. 3098-3103. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.902.357>

80. Memon A., Dionne R., Short L., Maralani S. Psychological factors in the use of photospreads. *Journal of Police Science & Administration*. 1988. Vol. 16. P. 62–69.
81. Morgan K., Hachana A., Yiu C., Souissi A., Ziska L. Locally adapted rhizobia strains for Sahelian nutritional security. *Sustainable Microbiology*. 2025. Vol. 2. qvaf023. <https://doi.org/10.1093/sumbio/qvaf023>
82. Nabati J., Nezami A., Yousefi A., Oskoueian E., Oskoueian A., Ahmadi-Lahijani M. J. Biofertilizers containing plant growth promoting rhizobacteria enhance nutrient uptake and improve the growth and yield of chickpea plants in an arid environment. *Scientific reports*. 2025. Vol. 15. P. 8331. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93070-w>
83. Nahusenay G., Wolde G., Tena W., Tamiru T. Chickpea (*Cicer arietinum* L.) growth, nodulation, and yield as affected by varieties, *Mesorhizobium* strains, and NPSB fertilizer in Southern Ethiopia. *Frontiers in plant science*. 2024. Vol. 15. P. 1372082. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1372082>
84. Neilands J. B. Microbial iron compounds. *Annual review of biochemistry*. 1981. Vol. 50. P. 715–731. <https://doi.org/10.1146/annurev.bi.50.070181.003435>
85. Nikitchenko L. Practical status of preparation of future biology teachers for organizing research activities of basic secondary education students. Scientific notes of Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University Section Theory and methods of teaching natural sciences. 2025. P. 104-112. <https://doi.org/10.31652/2786-5754-2025-9-104-112>
86. Ovchatova A. STEM-education: advantages and challenges in Ukrainian realities. *Humanities science current issues*. 2021. Vol. 2. P. 278-284. <https://doi.org/10.24919/2308-4863/41-2-42>
87. Pantin F., Simonneau T., Muller B. Coming of leaf age: control of growth by hydraulics and metabolics during leaf ontogeny. *The New phytologist*. 2012. Vol. 196. P. 349–366. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04273.x>

88. Patten C. L., Glick B. R. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Canadian journal of microbiology*. 1996. Vol. 42. P. 207–220. <https://doi.org/10.1139/m96-032>
89. Peoples M. B., Herridge D. E., Ladha J. K. Biological nitrogen fixation: An efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant Soil*. 1995. Vol. 174. P. 3–28. <https://doi.org/10.1007/bf00032239>
90. Plazinski J., Rolfe B. G. Interaction of azospirillum and *Rhizobium* strains leading to inhibition of nodulation. *Applied and environmental microbiology*. 1985. Vol. 49. P. 990–993. <https://doi.org/10.1128/aem.49.4.990-993.1985>
91. Ríos-Ruiz W. F., Castro-Tuanama R., Valdez-Nuñez R. A., Torres-Bernal L., Jave-Concepción H. G., Daza-Pérez A. C., Barrera-Lozano M., Archentti-Reátegui F. Co-Inoculation of Phosphate-Solubilizing Bacteria and Rhizobia Increases Phosphorus Availability and Promotes the Development of Forage Legumes. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. P. 2493. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112493>
92. Saeed Q., Xiukang W., Haider F. U., Kučerik J., Mumtaz M. Z., Holatko J., Naseem M., Kintl A., Ejaz M., Naveed M., Brtnicky M., Mustafa A. Rhizosphere Bacteria in Plant Growth Promotion, Biocontrol, and Bioremediation of Contaminated Sites: A Comprehensive Review of Effects and Mechanisms. *International journal of molecular sciences*. 2021. Vol. 22. P. 10529. <https://doi.org/10.3390/ijms221910529>
93. Salvagiotti F., Cassman K. G., Specht J. E., Walters D. T., Weiss A., Dobermann A. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*. 2008. Vol. 108. P. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>
94. Santoyo G., Guzmán-Guzmán P., Parra-Cota F. I., Santos-Villalobos S., Orozco-Mosqueda M. C., Glick B. R. Plant Growth Stimulation by Microbial Consortia. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. P. 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020219>

95. Scherer H. W. Sulfur in Soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2009. Vol. 172. P. 326-335. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900037>
96. Sindhu S. S., Rakshiya Y. S., Malik D. K. Rhizosphere bacteria and their role in biological control of plant diseases. In: Sayyed RZ, Patil AS (eds) *Biotechnology emerging trends*. Scientific Publishers. Jodhpur, India. 2009. P. 17–52.
97. Sulieman S., Ha C. V., Schulze J., Tran L. S. Growth and nodulation of symbiotic *Medicago truncatula* at different levels of phosphorus availability. *Journal of experimental botany*. 2013. Vol. 64. P. 2701–2712. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert122>
98. Varin S., Cliquet J. B., Personeni E., Avicé J. C., Lemauviel-Lavenant S. How does sulphur availability modify N acquisition of white clover (*Trifolium repens* L.)?. *Journal of experimental botany*. 2010. Vol. 61. P. 225–234. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp303>
99. Vocciante M., Grifoni M., Fusini D., Petruzzelli G., Franchi E. The Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) in Mitigating Plant's Environmental Stresses. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 1231. <https://doi.org/10.3390/app12031231>
100. Weyens N., van der Lelie D., Taghavi S., Vangronsveld J. Phytoremediation: plant-endophyte partnerships take the challenge. *Current opinion in biotechnology*. 2009. Vol. 20. P. 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.02.012>