

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ АГРОБІОЛОГІЧНИЙ**

ПОГОДЖЕНО

Декан агробіологічного факультету

_____ проф. В.П. Коваленко
« ____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри ґрунтознавства
та охорони ґрунтів

_____ доц. Р.П. Богданович
« ____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«ПРОДУКТИВНІСТЬ КОРМОВИХ БОБІВ ЗА РІЗНОГО АЗОТНОГО
ЖИВЛЕННЯ»**

Спеціальність 201 –Агрономія”
Освітня програма —Агрохімія і ґрунтознавство”
Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

проф., д. с.-г. наук
(науковий ступінь та вчене звання) _____
(підпис)

В.О. ЗАБАЛУЄВ
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

проф., д. с.-г. наук
(науковий ступінь та вчене звання) _____
(підпис)

О.Л. ТОНХА
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Виконав

(підпис)

Е.А. ФРАНЧУК
(ім'я ПРІЗВИЩЕ здобувача)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
АГРОБІОЛОГІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри ґрунтознавства
та охорони ґрунтів**

_____ доц. Р.П. Богданович
« ____ » _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Франчуку Едуарду Андрійовичу

Спеціальність 201 –Агрономія ”

Освітня програма —Агрохімія і ґрунтознавство”

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **«Продуктивність кормових бобів за різного азотного живлення»**

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ 2025.11.08
(рік, місяць, число)

Керівник роботи: д.с-г.н., проф. Тонха О.Л.

Вихідні дані до магістерської роботи: стаціонарний дослід з вивчення різних форм і норм азотного живлення на показники ґрунтів і урожайність бобів кормових за проектом Ecotwins та фінансується Horizon EU, який закладено в ВП НУБІП України «Агрономічна дослідна станція».

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Оцінити вплив органічних і мінеральних добрив і норм азотного живлення на вміст мінеральних сполук азоту і чисельність бактерій, які беруть участь в трансформації сполук азоту в чорноземі типовому карбонатному.
2. Оцінити вплив органічних і мінеральних добрив і норм азотного живлення на наростання біомаси і урожайність бобів кормових.

Дата видачі завдання — _____ ” _____ 2025 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

О.Л. ТОНХА
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис)

Е.А. ФРАНЧУК
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота за темою «Продуктивність кормових бобів за різного азотного живлення» становить: 46 сторінок друкованого тексту, 10 таблиць, 70 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – агрохімічні показники і біологічна активність чорнозему типового, ріст і розвиток кормових бобів.

Метою досліджень є виявлення залежностей формування урожайності зерна бобів кормових від впливу різних форм органічних і мінеральних форм азоту.

Об'єкт досліджень – процеси росту, розвитку та формування індивідуальної та зернової продуктивності рослин бобів кормових залежно від впливу різних форм органічних і мінеральних форм азоту. Предмет досліджень – рослини бобів кормових та їх реакція на вплив різних форм органічних і мінеральних форм азоту.

Методи досліджень: візуальний – для встановлення фенологічних змін росту рослин бобів кормових; кількісний – для визначення густоти рослин, польової схожості насіння та виживаності рослин; метод суцільного збирання – для визначення урожаю зерна бобів кормових; статистичний: дисперсійний – для визначення вірогідності отриманих результатів досліджень.

Встановлено, що органічні добрива (компост та вермікомпост) підвищують рН ґрунту порівняно з контрольними варіантами. На ранньому етапі (30 діб) перевагу мали мінеральні джерела азоту завдяки швидкій доступності N, що забезпечувало інтенсивний стартовий ріст. Найвищі показники отримано за використання вермікомпосту після вирощування кормових бобів, підвищення становило 13-22% порівняно з початковим періодом. Найвища чисельність амоніфікуючих бактерій отримано за використання ТЗ — N₅₀ (компост), перевищення порівняно з контролем становило 129 (шар 0-1 см) і 64% (15-30 см). Також високі показники отримано за використання вермікомпосту, перевищення становило 95 і 52%. Найвищу урожайність зерна порівняно з контролем отримано за використання компосту, показники на 22% більші.

Найвищий умовно чистий дохід отримано за застосування 50 кг/га мінерального азоту і становила 33700 грн/га, застосування компосту зменшило 1950 грн/га прибуток, але за впливом на ґрунт має позитивний ефект.

Робота виконувалась за підтримки Horizon Europe Framework Programme (HORIZON) under the grant agreement No101079308 conducted as part of the ECOTWINS (Research Capacity Building and Upskilling and Upgrading the Research Team in NUBiP (Ukraine) on Agroecological Intensification for Crop Production) project.

Мікробіологічні дослідження були частиною науково-дослідної тематики № держреєстрації 0123U102166 «Управління біологічною активністю і органічною речовиною для підвищення продуктивності чорноземів Лісостепу України за зміни клімату».

ВСТУП

Боби кормові є важливим резервом збільшення виробництва рослинного білка в Україні. Оптимізація азотного живлення кормових бобів є комплексним завданням, що вимагає інтегрованого підходу, який враховує взаємодію між різними джерелами азоту, процесами біологічної фіксації, ґрунтовими умовами та факторами навколишнього середовища. Ключовими принципами успішної оптимізації є максимальне використання природної здатності кормових бобів до біологічної фіксації азоту (БФА) через вірний вибір штамів ризобій, інокуляцію та створення сприятливих умов для симбіозу. Також використання стартових доз мінерального азоту (20-40 кг N/га) для стимуляції раннього росту без пригнічення БФА. Можливим шляхом є застосування компосту, вермікомпосту та інших органічних добрив для покращення властивостей ґрунту та забезпечення пролонгованого вивільнення поживних речовин. Адаптація стратегій азотного живлення до конкретних ґрунтово-кліматичних умов, систем землеробства та економічних факторів. Мінімізація негативного впливу на навколишнє середовище через оптимізацію норм та строків внесення добрив, запобігання втратам азоту.

Подальші дослідження повинні зосередитись на розробці нових біопрепаратів та форм добрив, селекції сортів з підвищеною ефективністю використання азоту, адаптації систем управління до змін клімату та інтеграції сучасних технологій для точного управління азотним живленням. Лише комплексний, науково обґрунтований підхід дозволить повністю реалізувати потенціал кормових бобів як високопродуктивної, екологічно сталої та економічно вигідної культури в сучасних системах землеробства.

Тому сучасним напрямком підвищення урожайності зерна бобів кормових, є впровадження у виробництво ефективних конкурентоспроможних, з високим рівнем окупності енергії, адаптованих до умов середовища технологій вирощування, які базуються на підборі інтенсивних сортів, науково обґрунтованому розміщенні у сівозміні, раціональній системі удобрення, що поєднує використання бактеріальних препаратів і мінеральних добрив, догляди за

посівами, своєчасному виконанні всього комплексу технологічних прийомів (*Bekele та ін. (2025)*). Такі технології будуть вигідними через призму економічних й енергетичних показників і привабливими для виробництва.

Отже дослідження з оцінки продуктивності кормових бобів за використання невеликих норм азотних добрив, як у органічній, так і мінеральній формі на показники родючості ґрунту мають велике значення в агроекологічних практиках.

Робота виконувалась за підтримки Horizon Europe Framework Programme (HORIZON) under the grant agreement No101079308 conducted as part of the ECOTWINS (Research Capacity Building and Upskilling and Upgrading the Research Team in NUBiP (Ukraine) on Agroecological Intensification for Crop Production) project.

Мікробіологічні дослідження були частиною науково-дослідної тематики № держреєстрації 0123U102166 «Управління біологічною активністю і органічною речовиною для підвищення продуктивності чорноземів Лісостепу України за зміни клімату».

РОЗДІЛ 1. НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ БОБІВ КОРМОВИХ ЗАЛЕЖНО НОРМ І ФОРМ АЗОТНИХ ДОБРИВ

(огляд літературних джерел)

1.1. Проблематика азотного живлення за вирощування кормових бобів

Кормові боби (*Vicia faba L.*) належать до найдавніших і найцінніших зернобобових культур, що вирощуються у помірній зоні Європи, Азії та Північної Африки. Вони поєднують високу продуктивність білка (до 30–34 % у насінні) з добрими кормовими якістьми зеленої маси, а також здатністю до симбіотичної фіксації атмосферного азоту, завдяки чому істотно знижують потребу у мінеральних добривах (*Jensen et al., 2010*).

У 2021 році світове виробництво кормових бобів досягло 6 мільйонів тонн, при цьому Китай є провідним виробником, за ним слідують Ефіопія та Великобританія. У зерні фаби міститься до 34 % сирого білка та до 6 % жиру, що робить її цінним інгредієнтом для кормів (*Etemadi et al., 2019*).

Ця культура характеризується високою продуктивністю, адаптивністю до різних ґрунтово-кліматичних умов та унікальною здатністю до біологічної фіксації атмосферного азоту, що робить її ключовим елементом сталих систем землеробства. На відміну від більшості інших зернобобових кормові боби формують глибоку кореневу систему, що покращує структуру ґрунту й залишає після себе значну кількість органічної речовини. Після збирання бобів в ґрунті може залишатися 40–80 кг N·га⁻¹ у доступних формах (*Simon-Miquel et al., 2024*).

Крім безпосередньої кормової та білкової цінності боби мають агроекологічне значення – вони підвищують ефективність використання азоту в сівозмінах і зменшують викиди N₂O, коли частину мінеральних добрив замінюють біологічно фіксованим N (*De Notaris et al., 2023*).

Азотне живлення є одним з найбільш критичних факторів, що визначають продуктивність кормових бобів. Парадоксальність ситуації полягає в тому, що будучи азотфіксуючою культурою, кормові боби водночас демонструють значну реакцію на внесення азотних добрив, особливо на ранніх етапах розвитку. Дослідження показують, що необхідність у сталих сільськогосподарських

практиках спричинила поновлений інтерес до бобових культур, таких як кормові боби, як агентів для збільшення різноманітності в системах вирощування культур та забезпечення органічного джерела азоту.

Складність взаємодії між мінеральним азотним живленням та процесами біологічної фіксації азоту створює унікальні виклики для оптимізації систем удобрення. Біологічна фіксація азоту в бобових є результатом симбіозу, який вони встановлюють з діазотрофними ґрунтовими бактеріями (ризобіями), розміщеними в спеціалізованих структурах, переважно на їх коренях, які називаються бульбочками. При цьому надмірне застосування мінеральних азотних добрив може пригнічувати активність бульбочкових бактерій, знижуючи ефективність природної азотфіксації.

Біологічна фіксація азоту (БФА) є фундаментальним процесом, що забезпечує перетворення атмосферного азоту в доступні для рослин форми через активність ферменту нітрогенази. Фіксація азоту бобовими, такими як кормові боби, є дешевим способом фіксації атмосферного азоту в доступну для рослин форму. Кормові боби формують симбіотичні відносини переважно з бактеріями *Rhizobium leguminosarum biovar viciae*, які належать до комплексу *Rhizobium leguminosarum*.

Кормові боби та горох переважно інокулюються комплексом *Rhizobium leguminosarum (Rlc) sv. viciae*, тоді як інші симбіовари *R. leguminosarum* інші важливі бобові культури, включаючи білу конюшину та квасолі звичайну. Ця специфічність взаємодії між рослиною-господарем та штамом ризобій має критичне значення для ефективності азотфіксації.

Процес формування симбіозу включає складну сигнальну взаємодію між рослиною та бактеріями. Ефективність нодуляції та врожайність сухої речовини залежить від сумісності між сортом кормових бобів та штамом ризобій та їх взаємодії з біофізичними умовами ґрунту. Рослини виділяють флавоноїди, які індукують експресію nod-генів у ризобіях, що призводить до синтезу Nod-факторів. Ці сигнальні молекули викликають морфологічні зміни в корневих волосках та ініціюють формування інфекційних ниток.

Симбіоз *Vicia faba* із бактеріями роду *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* забезпечує щорічне залучення 70–210 кг N·га⁻¹, залежно від сорту, ґрунтових умов і агротехніки (Jensen et al., 2010). Механізм BNF базується на утворенні бульбочок, у яких бактероїди відновлюють N₂ до NH₄⁺ за рахунок енергії рослини. Фіксований азот використовується не лише для росту фаби, а й накопичується у ґрунті у вигляді органічних сполук (Klippenstein et al., 2022).

Від ефективності симбіозу залежать ключові показники: вміст білка, урожайність зеленої маси й насіння, а також «азотна спадщина» для наступних культур (Jensen et al., 2010). Доведено, що інтенсивність BNF зменшується при високих концентраціях мінерального N у ґрунті — рослина споживає готовий азот, і процес утворення бульбочок сповільнюється (Liu et al., 2019). Однак невеликі «стартові» дози азоту (20–30 кг N·га⁻¹) на початку вегетації, особливо на бідних ґрунтах, здатні стимулювати початковий ріст і розвиток кореневої системи без помітного пригнічення BNF (Luo et al., 2021).

Таке тип живлення забезпечує рослину необхідним N до моменту, коли симбіоз ще не набрав повної сили, і тому вважається технологічно доцільним (Jensen et al., 2010).

Ріст і розвиток фаби тісно пов'язані з балансом між симбіотичним і мінеральним живленням. При дефіциті N знижується інтенсивність фотосинтезу, формування листової поверхні та кількість бульбочок. Надлишок N, навпаки, веде до вегетативного «жирування» і зменшення генеративних органів (De Notaris et al., 2023).

У польових дослідях у Данії встановлено, що найвища врожайність зеленої маси досягалась при внесенні N у діапазоні 60–90 кг·га⁻¹ у поєднанні з інокуляцією ризобіями (Jensen et al., 2010). Внесення N понад 120 кг·га⁻¹ не збільшувало урожай, а іноді навіть зменшувало його через гальмування симбіозу (Liu et al., 2019).

Кількість азоту, фіксованого кормовими бобами (БФА), може бути значною. Кількість БФА в надземній біомасі становила в середньому 255 кг N/га в органічних та 334 кг N/га в інтенсивних системах. Ці значення мають суттєвий

внесок БФА в азотний баланс агроєкосистем. Важливо відзначити, що стандартні методи оцінки можуть недооцінювати реальний внесок БФА. Дослідження показало, що БФА була б недооцінена на 50 та 100 кг N/га відповідно при використанні стандартних літературних значень %Ndfa. Це підкреслює необхідність врахування специфічних умов управління при оцінці внеску БФА.

Для кормового використання оптимальні середні норми N (30–60 кг·га⁻¹) забезпечують приріст зеленої маси на 15–25 % порівняно з контролем без добрив (Cazzato *et al.*, 2012). При цьому частка біологічно фіксованого азоту залишається високою (понад 50 %), а якість корму (вміст білка, перетравність) поліпшується (Etemadi *et al.*, 2019).

У дослідях з озимою та ярою формами бобів було виявлено, що озимі кормові боби акумулюють більше біомаси й азоту в залишках, тоді як яра реагують виразніше на підживлення N (Neugschwandtner *et al.*, 2023). Таким чином, тип форми та тривалість вегетації визначають оптимальну стратегію азотного живлення.

1.2. Вплив інокуляції та макро і мікроелементів на продуктивність кормових бобів

Інокуляція насіння ефективними штамми *Rhizobium leguminosarum* — найдоступніший спосіб підвищити активність BNF і врожайність (De Notaris *et al.*, 2023). За результатами досліджень Чинчук та ін. (2021) встановлено, що різні сорти кормових бобів по різному реагують на застосування інокулянтів. Так, максимальну сиру масу ризобій на ділянках без застосування Ризоактиву сформував сорт квасолі звичайної Отрада – 0,297 г/рослину активних бульбочок. Інокуляція насіння досліджуваних сортів квасолі звичайної Ризоактивом збільшила сиру масу активних бульбочок у фазі цвітіння на 0,016–0,042 г/рослину. Більша маса бульбочок, порівняно з сортом Буковинка, сформувалася на кореневій системі квасолі Рось, Отрада та Ната. Максимальну сиру масу ризобій на ділянках без застосування Ризоактиву сформував сорт квасолі Отрада – 0,297 г/рослину активних бульбочок. Інокуляція насіння досліджуваних сортів

квасолі Ризоактивом збільшила сиру масу активних бульбочок у фазі цвітіння на 0,016–0,042 г/рослину. Найвищий рівень врожаю зерна квасолі забезпечили сорти Отрада (2,60 т/га), Ната (2,50 т/га) та Рось (2,40 т/га) за інокуляції насіння Ризоактивом.

У Скандинавії інокуляція штамом *R. leguminosarum* *bv. viciae* підвищила урожайність насіння на 12–25 % та збільшила кількість активних бульбочок на 30 % порівняно з контролем (Fogelberg et al., 2023).

Температурний режим істотно впливає на активність нітрогенази та формування бульбочок. Оптимальна температура для нодуляції кормових бобів становить 15-25°C, при цьому екстремальні температури можуть значно знижувати ефективність азотфіксації. Тривалі періоди посухи спричиняють зменшення популяцій ризобій у ґрунті, що часто асоціюється з поганою нодуляцією бобових протягом сухих сезонів.

Вологість ґрунту є критичним фактором для виживання ризобій та функціонування бульбочок. Дослідження показали, що зрошення призвело до збільшення врожайності на 54% та підвищення азотфіксації (до 105%), тоді як удобрення фосфатом та сульфатом калію, з мікроелементами або без них, не мало значного впливу. Це підкреслює важливість водозабезпечення для максимізації потенціалу БФА.

За даними Klippenstein та ін.(2022) за використання змішаного добрива NPSB (18,9% N, 37,7% P₂O₅, 6,95% S, 0,1% B) в нормі 125 кг/га забезпечило найвищу врожайність зерна (4857,2 кг/га). Економічний аналіз продемонстрував, що ця норма також забезпечила найвищі чисті вигоди та граничну норму прибутку.

Дослідження впливу азотного живлення в різних агроєкологічних умовах показують значну варіабельність оптимальних норм. У районах з добре розвиненою нодуляцією, кормові боби з нормами азоту 30-60 кг/га продукували 0.94-0.98 т/га врожайності насіння, накопичення азоту становило 160,2-167,8 кг/га та видиму ефективність відновлення азоту 25,7% до 31,2%.

Додавання сірки у дозі 30–40 кг·га⁻¹ збільшувало вміст білка та кількість зафіксованого азоту через активацію сірковмісних ферментів (*Cazzato et al., 2012*). Аналогічно, фосфор (40–60 кг P₂O₅·га⁻¹) є необхідним для енергетичного забезпечення нітрогенази, тому його дефіцит знижує ефективність VNF (*Klippenstein et al., 2022*). Окремі дослідження відзначають роль кобальту та молібдену, які входять до складу нітрогеназних комплексів і можуть покращувати утворення бульбочок (*Omer et al., 2020*).

Інтегрований підхід до азотного живлення, що поєднує органічні та мінеральні джерела азоту, демонструє синергетичний ефект на продуктивність кормових бобів. Дослідження показало, що чай з вермікомпосту в поєднанні з 50% мінеральних NPK добрив досяг найвищого значного збільшення висоти рослин та кількості гілок у всіх сортах протягом двох сезонів.

Комбіноване застосування має такий ефект: швидке забезпечення доступним азотом на початкових етапах росту від мінеральної компоненти; пролонговане вивільнення азоту з органічної фракції; покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту; підвищення ефективності використання поживних речовин; зменшення втрат азоту через вимивання та денітрифікацію (*Tsige ma in. (2022)*).

1.3 Інтеркропінг і комбіноване азотне живлення

Смугове або рядкове вирощування кормових бобів разом із злаковими (пшениця, ячмінь, овес) має взаємодоповнення в поглинанні азоту та світла. У таких системах боби зберігають високу нодуляційну (інокуляційну) активність навіть за помірних доз N, тоді як чисті посіви частіше її втрачають (*Luo et al., 2021*).

Крім того, інтеркропінг зменшує втрати N через вимивання та підвищує стабільність урожайності (*De Notaris et al., 2023*). Комбіноване живлення (50 % органічного + 50 % мінерального азоту) підвищувало ефективність використання N до 70 % і сприяло збереженню активності ризобій (*Jensen et al., 2010*). Такі

системи рекомендовані для господарств, які мають доступ до гною чи сидератів та бажають знизити мінеральне навантаження (*Cazzato et al., 2012*).

Підвищення дози N збільшує загальну кількість білка на одиницю площі, але може зменшувати його частку у зерні через розведення білкових фракцій вуглеводами (*Klippenstein et al., 2022*). Інокуляція та збалансоване живлення S і P покращують амінокислотний профіль, зокрема вміст метіоніну та цистеїну (*Cazzato et al., 2012*).

Для кормового використання важливі також структурні властивості зеленої маси – вміст клітковини та лігніну. При помірному азотному живленні збільшується листковий індекс і покращується співвідношення листки/стебла, що сприяє вищій перетравності (*De Notaris et al., 2023*).

1.4. Органічні джерела азоту та їх ефективність щодо впливу на продуктивність кормових бобів

Використання компосту як джерела азоту для кормових бобів набуває все більшого значення в контексті сталого землеробства. Польові експерименти показали, що всі три типи компосту (традиційний компост, вермікомпост та компост з ефективними мікроорганізмами) призвели до значно вищої врожайності зерна та біомаси, а також поглинання поживних речовин порівняно з мінеральними добривами.

За даними *Goma et al. (2021)* компост забезпечує повільне вивільнення поживних речовин, що особливо важливо для підтримки азотного живлення протягом всього вегетаційного періоду. Це відобразалось у більшій кількості бульбочок та вищому залишковому азоті ґрунту в варіантах з компостом. Крім того, компост покращує фізичні властивості ґрунту, водоутримуючу здатність та мікробіологічну активність.

Дослідженнями *Hafez et al. (2023)* використання вермікомпосту має особливо високу ефективність у живленні кормових бобів. Дослідження впливу чаю з вермікомпосту показало, що рослини, оброблені 10% розчином, досягли стадії цвітіння принаймні на 3 тижні раніше, ніж контроль, та покращили вміст

білка та розчинних цукрів. Вермікомпост збагачений поживними речовинами, вітамінами, амінокислотами та різними гормонами росту, такими як ауксини та цитокініни. Ця унікальна комбінація біологічно активних речовин стимулює не лише ріст надземної частини, але й розвиток кореневої системи та нодуляцію.

Дослідження *Geneti ma in. (2021)* в Ефіопії показало, що застосування 10 т/га вермікомпосту з повною дозою вапна максимізувало врожайність зерна кормових бобів на рівні 2.41 т/га. При цьому застосування 5 т/га вермікомпосту з повною нормою вапна виявилось найбільш економічно вигідним для фермерів, забезпечуючи баланс між врожайністю та витратами. Механізм дії вермікомпосту включав декілька аспектів: покращення структури ґрунту та водоутримуючої здатності; стимуляція корисної мікробної активності; забезпечення збалансованого живлення макро- та мікроелементами; підвищення доступності фосфору та інших елементів; стимуляція активності ґрунтових ферментів.

Вермікомпост покращує ферментативні властивості ґрунту, збільшуючи активність ферментів, таких як амілаза, протеаза, уреаза, β -глюкозидаза, целюлаза, ліпаза, хітиназа та дегідрогеназа, які є критичними для родючості ґрунту та здоров'я рослин.

Використання осаду стічних вод (біосолідів) в якості добрива для кормових бобів представляє значний інтерес з точки зору циркулярної економіки та утилізації відходів. Дослідження показали, що загальна кількість азоту в листях кукурудзи та бобів значно зростала в рослинах, вирощених на ґрунті, модифікованому осадом (*Oklahoma State University Extension (2017)*). Осад стічних вод характеризується високим вмістом органічного азоту, який повільно мінералізується, забезпечуючи пролонговане живлення рослин. Загальні середні значення мінералізованого азоту, як частка вмісту органічного азоту, становили 47% для аеробно перетравленого осаду, 40% для термічно висушеного, 34% для осаду з лайм-обробкою, 30% для мезофільно анаеробно перетравленого та 7% для компостованого осаду.

Однак використання осаду стічних вод вимагає ретельного контролю якості та дотримання екологічних норм. Дослідження в Мексиці показало, що застосування 4.5 Мг/га біосолідів на сухій основі для вирощування кормових бобів потребує моніторингу важких металів, включаючи Cd, Cr, Cu, Ni та Zn. Польові дослідження в Бразилії продемонстрували, що залишковий ефект компостованого осаду стічних вод сприяв більшій реакції врожайності зерна кормових бобів. Це вказує на довготривалий позитивний ефект біосолідів на родючість ґрунту та продуктивність культур.

Включення кормових бобів у сівозміни має значний вплив на азотний баланс агроєкосистеми. Альтернативні попередники призвели до більшої мінералізації азоту в ґрунті (51 кг N/га в середньому) та вищої врожайності пшениці (564 кг/га в середньому) порівняно з пшеницею як попередником. Чистий баланс азоту був близьким до нейтрального для гороху, тоді як у кормових бобів він варіював від 41 до -21 кг N/га. Це демонструє потенціал кормових бобів як культури, що покращує азотний статус ґрунту для наступних культур у сівозміні.

Оптимізація азотного живлення кормових бобів має важливе значення для зменшення викидів парникових газів в сільському господарстві. Врожайність 4 т/га насіння кормових бобів, що відповідає 180 кг N/га симбіотично фіксованого азоту, еквівалентна 7200 МДж/га, що дорівнює 180 дм³ викопного палива або викиду 480 кг CO₂.

Використання БФА замість синтетичних азотних добрив значно знижує вуглецевий слід виробництва. Кожна тонна мінерального азоту, заміщена біологічно фіксованим, економить приблизно 3-4 тонни CO₂-еквівалента викидів, враховуючи енергетичні витрати на виробництво добрив.

Узагальнення та напрями подальших досліджень:

Аналіз літератури свідчить, що між удобренням і продуктивністю кормових бобів існує тонкий баланс між надходженням мінерального азоту та симбіотичною фіксацією (Jensen et al., 2010). Оптимальними вважаються помірні

норми N (30–90 кг·га⁻¹) у поєднанні з інокуляцією і збалансованим забезпеченням S і P.

Надлишкові дози пригнічують BNF і зменшують екологічну ефективність виробництва, а їхній економічний ефект часто мінімальний (*Liu et al., 2019*).

Перспективними напрямками вважаються: селекцію генотипів, стійких до високого N фон та з підвищеною активністю ризобій (*De Notaris et al., 2023*); поєднання кормових бобів з іншими бобовими чи злаковими у змішаних посівах; використання мікробіологічних препаратів і біостимуляторів для підтримання симбіозу; оцінку різних систем живлення в умовах зміни клімату та посух.

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методика та схема досліду

Полеві дослідження проводилися на базі Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція» (ВП НУБіП України «АДС»), яка розташована в с. Пшеничному Білоцерківського району Київської області Правобережного Лісостепу України протягом вегетаційного періоду 2025 року. Природні умови Лісостепу України досить неоднорідні, що відображається у диференціації ґрунтового покриву та його якісних показників. Такі умови визначають необхідність відповідного районування за ґрунтово-екологічними характеристиками для подальшого раціонального використання.

За структурою ґрунтового покриву зона Лісостепу є однією з найскладніших. Ґрунт дослідного поля – чорнозем типовий карбонатний малогумусний середньосуглинковий на лесі. Вміст гумусу в орному шарі (за Тюрнімом) становить 4,32-4,45%, ємність поглинання – 31,1-32,3 мг-екв на 100 г ґрунту, рН водної витяжки – 6,9-7,6. До складу мінеральної твердої фази ґрунту входить 37% фізичної глини, 63% піску. Щільність ґрунту в рівноважному стані 1,17-1,24 г/см³, вологість стійкого в'янення – 11%. Фізико-хімічні і агрохімічні показники чорнозему типового карбонатного наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Фізико-хімічні і агрохімічні показники чорнозему типового карбонатного

Гори - зонт	Глиби на взяття зразка, см	Вміст гумусу, %	Вміст в 100 г ґрунту абсолютно сухого ґрунту, мг			Активна кислотність
			Лужно гідролізо- ваний азот	Рухо- мого фосфору	Рухомого калію	
Н	10-20	4,32±0,13	18,7 (середній)	2,8 (середній)	28 (підвищен ий)	6,9±0,15
Нрк	50-60	2,81±0,11	14,6 (низький)	1,6 (середній)	19 (середній)	7,6±0,2

Попередник – пшениця озима. Після збору попередника проводили лущення стерні на 8-10 см та оранку на 22–24 см. Весняний обробіток передбачав ранньовесняне боронування на глибину 3–6 см з метою закриття вологи та передпосівну культивуацію на глибину 6-8 см.

Органічні та мінеральні добрива, поліпшувачі ґрунту вносили у день перед проведенням передпосівної культивуації за схемою досліду.

Сівбу проводили 24 березня 12 рядною сівалкою «КЛЕН» з міжряддям 12,5 см. Норма висіву бобів 60 схожих насінин на м² (600 тис./га). Глибина сівби 6–8 см. Перед сівбою насіння обробляли інокулянтном Ризоактив бобові з розрахунку 2 л/т насіння (титр 2×10^9 КУО *Rhizobium leguminosarum* *bv. viceae*).

Для сівби використовувався сорт Allison (оригіатор NPZ) з масою 1000 насінин 420 г. Засоби захисту рослин в посівах не використовувалися.

Площа елементарної ділянки 12 м² (1,5 м × 8 м). Повторність досліду – трикратна. Рослинні та ґрунтові зразки відбиралися з облікової зони, що представлена вісьмома рядками всередині ділянки (2 бічних рядки виступали захисною смугою).

Рослинні зразки відбиралися на 30 (14 травня), 60 добу вегетації (13 червня) та у фазу повної стиглості (90 доба – 13 липня). Елементи структури врожаю обраховувалися з пробного снопа зібраного з 1 м² з подальшим перерахунком на вологість 14 %.

Відбір ґрунту. Відбирали по 2 проби з кожного варіанту з глибини 0-15 см, 15 – 30 см до сівби, та після сівби.

Зразки ґрунту відбирали відповідно до ISO 10381-2 на 30-й день після посіву суміші, 60 -й та після збирання на 90 день. Підготовку до хімічного аналізу проводили відповідно до ДСТУ ISO 11464-2001. У зразках ґрунтів визначали: рН водної витяжки за ДСТУ ISO 10390:2001; вміст гумусу за ДСТУ 4289:2004 Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини; обмінних сполук кальцію і магнію екстракцією 1,0 М розчином KCl, рухомих форм фосфору визначали за методом Мачигіна. Збір урожаю здійснювався

промисловими комбайнами, обладнаними системами картографування урожайності. Дані оброблялись методом дисперсійного аналізу за Б.О.Доспеховим та з використанням комп'ютерних програм Microsoft Excel®, Statistica®, FarmWorks®. Під час проведення мікробіологічного моніторингу ґрунтів агроєкосистем використовували методичні підходи (РМ.УЛ.5.4-23 Визначення чисельності еколого-трофічних груп ґрунтових мікроорганізмів; ДСТУ ISO 14240-2:2003 Якість ґрунту.Визначення ґрунтової мікробної біомаси. Частина 2. Фумігаційно-екстракційний метод.

Чисельність мікроорганізмів основних еколого-трофічних і таксономічних груп визначали методом висівання ґрунтової суспензії на стандартні поживні середовища: загальна кількість мікроорганізмів– на пептон- глюкозному агарі з ґрунтовою витяжкою (ПГА), амоніфікуючі мікроорганізми– м'ясо-пептонний агар (МПА), споруутворювальні бактерії – на МПА із сушлом після прогріву при 75°C упродовж 20 хв.

Таблиця 2.1. Схема досліду

Фактор А: Виробничі системи	Фактор В: Варіанти удобрення
A.1. Боби соло	T1 — N ₀ (контроль без азоту) T2 — N ₅₀ (мінеральний контроль) T3 — N ₅₀ (компост) T4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (M) T5 — N ₅₀ (VC — вермікомпост) T6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (M)

У досліді з вивчення продуктивності кормових бобів (*Vicia faba L.*) за різного азотного живлення передбачено 6 варіантів (Т1–Т6), які відрізнялися джерелом азоту та способом його внесення. Основою схеми було забезпечення рівноважного надходження 50 кг N/га — повною дозою (N₅₀) або в роздільному внесенні по 25 кг N/га (N₂₅ + N₂₅(M)). Мета — порівняти ефективність мінерального, органічного та комбінованого живлення Щодо урожайності та фізіологічних показників рослин.

Т1 — N₀ (контроль без азоту) Варіант без застосування будь-яких азотних добрив. Служить контролем для оцінки природної продуктивності бобів за

рахунок біологічної фіксації азоту (BNF) та резервів ґрунтового N. Дає змогу визначити відносні ефекти азотного живлення на урожайність та біомасу рослин (Voisin et al., 2002).

T2 — N₅₀ (мінеральний контроль) Внесення мінерального азоту в дозі 50 кг N/га (аміачна селітра або сечовина). Цей варіант відображає традиційну практику удобрення бобових та є еталоном для порівняння з органічними джерелами. Швидкодоступний азот забезпечує інтенсивний стартовий ріст, але надлишок може пригнічувати активність ризобій та BNF (Jithesh et al., 2024).

T3 — N₅₀ (компост) Унесення повної норми азоту у формі органічного компосту. Компост містить органічно зв'язані форми N, P, K, Ca та мікроелементи, а також гумусові сполуки. Його ефект полягає у повільному вивільненні азоту й покращенні структури ґрунту та мікробіологічної активності (Amaya-Gómez et al., 2025).

T4 — N₂₅ (компост) + N₂₅ (M) Комбінована схема: 25 кг N/га у формі компосту та 25 кг N/га у формі мінерального добрива. Поєднання повільної дії органічного компонента з оперативним впливом мінерального N забезпечує баланс між мінералізацією та симбіотичною фіксацією азоту (Tsige et al., 2022).

T5 — N₅₀ (VC — вермікомпост) Повна доза азоту у вигляді вермікомпосту — продукту переробки органічних відходів дощовими червами (*Eisenia fetida*). Вермікомпост збагачений доступним N, P, K та мікробіотою, стимулює розвиток кореневої системи й нодуляцію, підвищує ефективність BNF та урожайність бобових (Blouin et al., 2019).

T6 — N₂₅ (VC) + N₂₅ (M) Поєднання вермікомпосту (25 кг N/га) з мінеральним N (25 кг N/га). Спрямоване на отримання стартового ефекту мінерального азоту та подовженої післядії органічного компонента. Забезпечує збалансоване живлення і зменшує ризик вимивання N (INRAE, 2022).

Схема дослідження дозволяє оцінити:

1. Ефективність мінерального та органічного азоту у підвищенні урожайності бобів.

2. Доцільність роздільного внесення $N_{25} + N_{25}(M)$ порівняно з повною дозою N_{50} .
3. Потенціал органічних і інтегрованих джерел у сталих системах живлення рослин (FAO, 2021; INRAE, 2023).

2.2. Погодно-кліматичні умови

Клімат зони проведення досліджень – помірно континентальний. Багаторічна середньорічна температура повітря становить $8,5^{\circ}\text{C}$. Найбільша середня багаторічна температура у липні – $24,0^{\circ}\text{C}$, найменша у січні – мінус $6,0^{\circ}\text{C}$. У середньому за рік випадає 585 мм опадів, із них узимку – 140 мм (24%), навесні – 123 мм (21%), влітку – 234 мм (40%) і восени – 88 мм (20%).

За 2025 рік маємо такі дані (рис.2.1). Як бачимо за період вегетації посіву гороху середня температура коливалась в межах $12,9$ - $25,1^{\circ}\text{C}$. Опадів найбільше було саме в травні на початкових етапах розвитку культури.

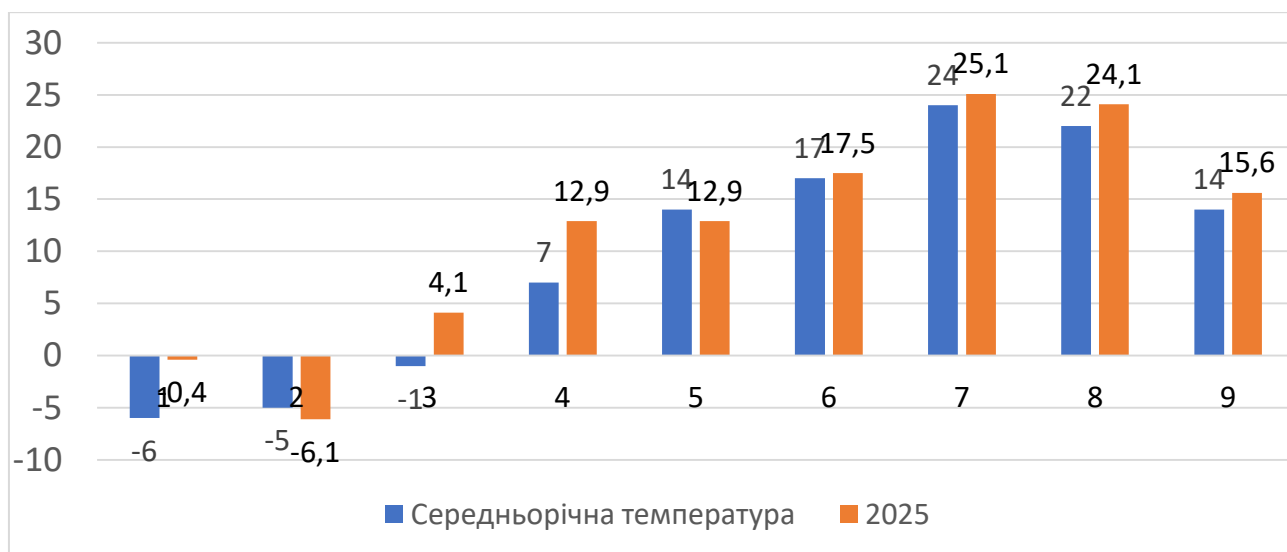


Рис. 2.1 Розподіл середньорічної температури і за 2025 рік

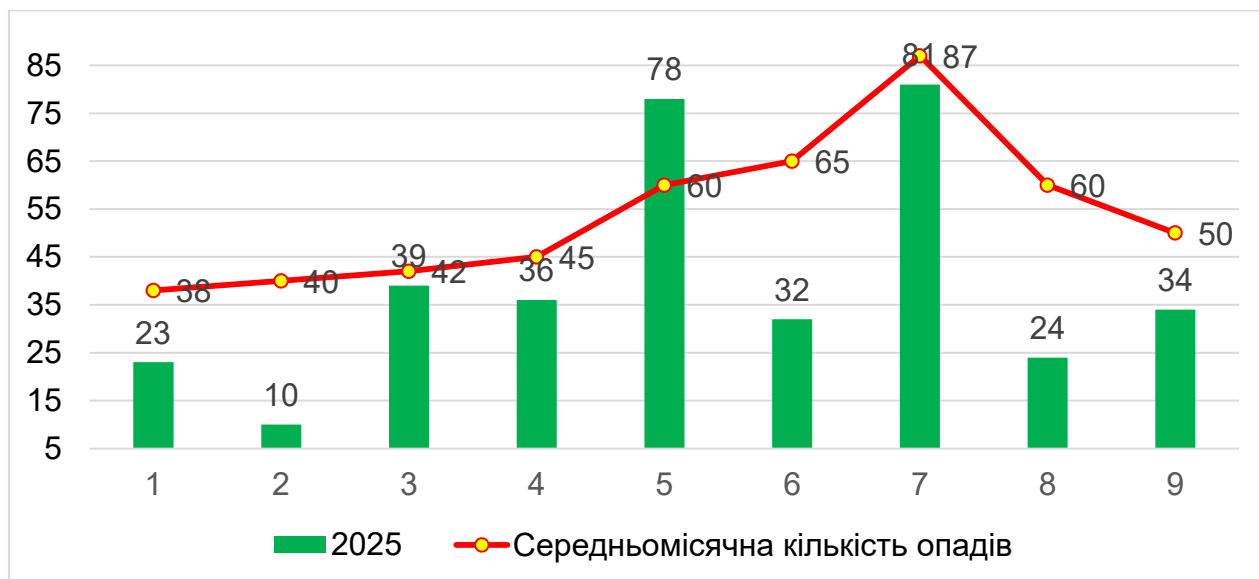


Рис. 2.2 Розподіл середньорічної кількості опадів і за 2025 рік

Кількість опадів у 2025 році у червні та серпні була в 2 і 2,6 рази менша за норму за зростання середньомісячної температури на 1,1-2,0 °С.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ВПЛИВУ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ НА АГРОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ І БІОЛОГІЧНУ АКТИВНІСТЬ ЧОРНОЗЕМУ ТИПОВОГО (РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ)

3.1 Зміна активної кислотності ґрунту за різного удобрення чорнозему ТИПОВОГО

Кормові боби найкраще ростуть на ґрунтах з нейтральною або слабко лужною реакцією, при оптимальному діапазоні рН від 6,5 до 8,0, хоча культура може толерувати слабкокислі умови з рН від 5,5 до 6,7 (*Oregon State University, 2019; Mesfin, 2020*). Кислотність ґрунту спричиняє значні проблеми для вирощування кормових бобів, оскільки вона погіршує сприйнятливість до хвороб, знижує життєздатність рослин та призводить до зниження врожайності (*Mesfin, 2020*). Дослідження показують, що в умовах кислих ґрунтів спостерігається серйозний хімічний дисбаланс, спричинений токсичними рівнями обмінного алюмінію (Al), марганцю (Mn) та іонів водню (H), поєднаними з критичним дефіцитом доступного азоту (N), фосфору (P), калію (K), кальцію (Ca), магнію (Mg), цинку (Zn) та молібдену (Mo), що обмежує ріст та продуктивність бобових культур (*Getachew et al., 2018*).

Комбіноване застосування вапна з органічними добривами показало найкращі результати і застосування 5 т/га вермікомпосту з повною дозою вапна (5,6 т/га) дало максимальний урожай зерна кормових бобів (2,41 т/га) та значно підвищило рН ґрунту на 0,81 мг/кг (*Tadesse et al., 2025b*).

Біовугілля також виступає як меліорант у кислих ґрунтах, підвищуючи рН та покращуючи доступність поживних речовин, що посилює родючість ґрунту та зменшує вилуговування (*Tadesse et al., 2025a*). Застосування біовугілля в нормі 10 т/га призвело до значного підвищення рН ґрунту, доступного фосфору, обмінного кальцію та магнію на 0,81 мг/кг, 4,6 мг/кг, 32,1% та 46,2% відповідно (*Tadesse et al., 2025b*).

Динаміку активної кислотності в чорноземі типовому в посівах кормових бобів за впливу удобрення наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Динаміка активної кислотності в чорноземі типовому в посівах кормових бобів за впливу удобрення, рН Н₂О, 2025 рік

Варіант удобрення	Шар ґрунту, см	Активна кислотність, рН Н ₂ О	
		До сівби	Після сівби
Т1 — N ₀ (контроль без азоту)	0 – 15	6,9±0,15	6,7±0,15
	15 – 30	7,0±0,2	6,8±0,15
Т2 — N ₅₀ (мінеральний контроль)	0 – 15	6,6±0,15	6,5±0,15
	15 – 30	6,7±0,15	6,5±0,15
Т3 — N ₅₀ (компост)	0 – 15	7,3±0,2	7,1±0,2
	15 – 30	7,4	7,2±0,2
Т4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (М)	0 – 15	6,9±0,15	6,7±0,15
	15 – 30	7,0±0,2	6,7±0,15
Т5 — N ₅₀ (VC - вермікомпост)	0 – 15	7,3±0,2	7,1±0,2
	15 – 30	7,5±0,2	7,0±0,2
Т6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (М)	0 – 15	7,1±0,2	6,8±0,15
	15 – 30	7,1±0,2	6,7±0,15

Результати, представлені в таблиці 3.1, демонструють динаміку активної кислотності в чорноземі типовому в посівах кормових бобів за різних видів удобрення. Дослідження проводилося на двох глибинах ґрунту (0-15 см та 15-30 см) з вимірюванням рН Н₂О до та після сівби.

Контрольний варіант без азоту (Т1 — N₀) показав рН 6,9±0,15 до сівби та 6,7±0,15 після сівби у верхньому шарі (0-15 см). У глибшому шарі (15-30 см) рН становив 7,0±0,2 до сівби та 6,8±0,15 після сівби. Мінеральний контроль (Т2 — N₁₈) показав подібні показники: 6,6±0,15 до сівби та 6,5±0,15 після сівби у верхньому шарі.

Внесення компосту (Т3 — N₅₀) призвело до найвищих показників рН серед усіх варіантів. У верхньому шарі рН становив 7,3±0,2 до сівби та 7,1±0,2 після сівби. У глибшому шарі спостерігалися значення 7,4 до сівби та 7,2±0,2 після

сівби. Це узгоджується з дослідженнями Tadesse et al. (2025), які показали, що органічні добрива підвищують рН ґрунту через вивільнення основних катіонів.

Комбіноване застосування компосту з мінеральним добривом (Т4 — N₂₅ (компост) + N₂₅ (М)) показало стабільні показники рН: 6,9±0,15 до сівби та 6,7±0,15 після сівби у верхньому шарі. Варіант з вермікомпостом (Т5 — N₅₀ (VC - вермікомпост)) продемонстрував рН 7,3±0,2 у обох шарах ґрунту до сівби, що вказує на лужний ефект органічних добрив.

Аналіз даних показує наступні тенденції:

1. Органічні добрива (компост та вермікомпост) підвищують рН ґрунту порівняно з контрольними варіантами.
2. Спостерігається незначне зниження рН після сівби у більшості варіантів, що може бути пов'язано з процесами азотфіксації та виділенням органічних кислот кореневою системою.
3. Глибший шар ґрунту (15-30 см) часто показує вищі або стабільніші значення рН порівняно з верхнім шаром.

Ці результати узгоджуються з дослідженнями, які показали, що підвищення рН може бути пов'язане з вивільненням основних катіонів, таких як Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ та Na⁺ внаслідок мінералізації органічних добрив, які можуть замінити кислотні іони (H⁺, Al³⁺ та Fe³⁺) на поверхні ґрунтових колоїдів (Tadesse et al., 2025b).

3.2 Зміна вмісту мінерального азоту за застосування різних добрив на посівах кормових бобів

Азот є найбільш лімітуючим поживним елементом для виробництва сільськогосподарських культур у багатьох регіонах світу, і його ефективне використання має важливе значення для економічної продуктивності (Fageria & Baligar, 2005). Кормові боби, як зернобобова культура, характеризуються унікальною здатністю отримувати азот як з мінеральних запасів ґрунту, так і через біологічну азотфіксацію (Canadian Agronomist, 2023).

Мінеральний азот у ґрунті представлений двома основними формами: амонійний азот (NH₄⁺-N) та нітратний азот (NO₃⁻-N). Органічний азот, присутній

у ґрунтовій органічній речовині, рослинних залишках та гної, перетворюється на неорганічний азот через процес мінералізації, під час якого бактерії перетравлюють органічний матеріал і вивільняють $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (*University of Minnesota Extension, 2018*).

Бобові культури покладаються на два джерела азоту: мінеральний азот із ґрунту та біологічну азотфіксацію; частка з кожного джерела варіює залежно від екологічних та ґрунтових умов, включаючи температуру, вологість ґрунту, рН ґрунту, вміст мінерального азоту в ґрунті, штам ризобій та генотип культури (*Ciampitti & Salvagiotti, 2018*).

У польових дослідженнях *Canadian Agronomist (2023)* отримано, що середнє поглинання азоту кормовими бобами становило 205 фунтів на акр (230 кг N/га), при цьому культура фіксувала 88% свого азоту з атмосфери. Однак взаємодія між мінеральним азотом ґрунту та БАФ є складною. Застосування азотних добрив може знизити пік БАФ до 16% при внесенні на стадії повного цвітіння (*Ciampitti & Salvagiotti, 2018*).

Синтетичні азотні добрива можуть мати як позитивний, так і негативний вплив на мінералізацію ґрунтової органічної речовини (ГОР). Внесення неорганічного азоту може безпосередньо пригнічувати мікробну активність, оскільки теорія мікробного "добування азоту" передбачає, що якщо азот є лімітуючим ресурсом, надходження неорганічного азоту зменшить мінералізацію ГОР шляхом зниження розкладання бідних на енергію субстратів ГОР (*Нотуак et al., 2019*).

Дослідження показали, що раціональне внесення добрив призвело до підвищення концентрації вуглецю та азоту в ґрунті, але якщо збільшення запасів ГОР досягається через зниження мінералізації азоту ГОР, може знадобитися більше азотних добрив для досягнення тієї ж продуктивності, і екологічні втрати азоту можуть збільшитися (*Нотуак et al., 2019*).

Комбіноване застосування органічних та неорганічних добрив з вапном показало кращі результати для підтримання вмісту азоту в ґрунті. Інокуляція

штамом EAL-110 призвела до значного покращення загального азоту (16,7%) та органічного вуглецю (3,1%) після збору врожаю (*Tadesse et al., 2025b*).

Таблиця 3.2 представляє дані про динаміку вмісту мінерального азоту за застосування різних добрив на посівах кормових бобів. Дослідження проводилося на різних глибинах ґрунту (0-15 см та 15-30 см) з вимірюваннями до та після сівби.

Таблиця 3.2. Динаміка вмісту мінерального азоту за застосування різних добрив на посівах кормових бобів, мг/кг, 2025 рік

Варіант удобрення	Шар ґрунту, см	Вміст мінерального азоту, мг/кг	
		До сівби	Після сівби
Т1 — N ₀ (контроль без азоту)	0 – 15	29±0,29	32±0,32
	15 – 30	24±0,26	30±0,30
Т2 — N ₅₀ (мінеральний контроль)	0 – 15	35±0,36	38±0,38
	15 – 30	31±0,32	36±0,36
Т3 — N ₅₀ (компост)	0 – 15	37±0,37	39±0,39
	15 – 30	35±0,35	42±0,42
Т4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (М)	0 – 15	37±0,37	40±0,40
	15 – 30	38±0,38	38±0,38
Т5 — N ₅₀ (VC - вермікомпост)	0 – 15	38±0,38	43±0,43
	15 – 30	37±0,37	45±0,45
Т6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (М)	0 – 15	39±0,39	40±0,41
	15 – 30	38±0,38	41±0,41

На контролі до сівби вміст мінерального азоту низький, особливо в шарі ґрунту 15-30 см. Контрольний варіант без азоту (Т1 — N₀) показав найнижчі значення мінерального азоту: 29±0,29 мг/кг до сівби та 32±0,32 мг/кг після сівби у верхньому шарі (0-15 см). У глибшому шарі (15-30 см) концентрація становила 24±0,26 мг/кг до сівби та 30±0,30 мг/кг після сівби. Ці результати узгоджуються з дослідженнями, які показують, що в період активного росту рослин мінеральний азот залишається низьким, оскільки він легко доступний і поглинається як

бобовими, так і небобовими культурами (*Oklahoma State University Extension, 2017*).

Мінеральний контроль (T2 — N₁₈) продемонстрував підвищений вміст азоту порівняно з контролем без азоту: 33±0,36 мг/кг до сівби та 38±0,38 мг/кг після сівби у верхньому шарі.

Внесення компосту (T3 — N₉₀) призвело до найвищих показників мінерального азоту серед усіх варіантів. У верхньому шарі вміст азоту становив 37±0,37 мг/кг до сівби та 39±0,39 мг/кг після сівби. У глибшому шарі (15-30 см) концентрація досягла 35±0,35 мг/кг до сівби та 42±0,42 мг/кг після сівби.

Ці результати підтверджують, що органічні добрива є важливим джерелом мінерального азоту через процес мінералізації. Коли мікроорганізми розкладають матеріал, що містить більше азоту, ніж вони можуть використати одночасно, такий як залишки бобових культур, відбувається мінералізація азоту (*Mosaic Crop Nutrition, 2023*).

Комбіноване застосування компосту з мінеральним добривом (T4 — N₂₅ (компост) + N₂₅ (M)) показало високі показники: 37±0,37 мг/кг до сівби та 40±0,40 мг/кг після сівби у верхньому шарі. Варіант з вермікомпостом (T5 — N₉₀ (VC - вермікомпост)) продемонстрував вміст азоту 38±0,38 мг/кг до сівби та 43±0,43 мг/кг після сівби у верхньому шарі.

Найвищі показники були зареєстровані у варіанті T6 — N₂₅ (VC) + N₂₅ (M), де вміст мінерального азоту досяг 39±0,39 мг/кг до сівби та 40±0,41 мг/кг після сівби у верхньому шарі.

Отже, найвищі показники отримано за використання вермікомпосту після вирощування кормових бобів, підвищення становило 13-22% порівняно з початковим періодом.

Аналіз даних показує наступні тенденції:

1. Збільшення вмісту азоту після сівби: У більшості варіантів спостерігається збільшення вмісту мінерального азоту після сівби, що може бути пов'язано з посиленою мінералізацією органічної речовини внаслідок активізації мікробної діяльності.

2. Вертикальний розподіл: Верхній шар ґрунту (0-15 см) зазвичай містить більше мінерального азоту порівняно з глибшим шаром (15-30 см), що узгоджується з концентрацією кореневої системи та мікробної активності у верхніх горизонтах.

3. Ефективність органічних добрив: Варіанти з компостом та вермікомпостом демонструють найвищі показники мінерального азоту, що підтверджує важливість органічних добрив для підтримання азотного статусу ґрунту.

4. Синергетичний ефект: Комбіновані варіанти удобрення показують високу ефективність, що вказує на переваги інтегрованого підходу до управління азотом.

Кормові боби мають великий потенціал для збагачення ґрунту азотом для наступних культур. Її вирощування має позитивний вплив на вміст доступного азоту в ґрунті та врожайність наступних культур (*Köpke & Nemesek, 2010*). Включення кормових бобів в інтенсивні зернозбагачені сівоzmіни сприяє зниженню використання мінеральних азотних добрив, що може мати вплив на глобальне потепління, утворення озону та підкислення навколишнього середовища (*Nemesek et al., 2008*).

Приблизно половина фіксованого азоту доступна для наступної культури, залишаючи деяку частину для майбутніх культур. Коли бобові культури залишаються на ґрунті або інкорпуються в ґрунт, весь поживний елемент, знайдений у рослині, нерівномірно розподіляється між різними вегетативними частинами, які також відрізняються один від одного за рівнем вивільнення мінеральних поживних речовин до ґрунту і, врешті-решт, до наступних культур (*Louarn et al., 2015; Thilakarathna et al., 2016*).

Дослідження в кислих ґрунтах Ефіопії показали, що застосування мінеральних добрив N, P та K значно впливає на продуктивність кормових бобів. Найбільша кількість бобів на рослині (17) була отримана при комбінації N:P:K у співвідношенні 46:92:60 кг/га, що перевищувало контрольний варіант на 467% (*Tsige et al., 2022*).

Азотне удобрення може ефективно покращувати якість ґрунту та пом'якшувати фузаріозне в'янення при безперервному монокультурному

вирощуванні кормових бобів. Застосування 90 кг/га азотного добрива знизило об'ємну щільність ґрунту на 9,40% та збільшило активність уреазы ґрунту на 40,41%, активність нейтральної фосфатази ґрунту на 22,59% та органічну речовину ґрунту на 20,08% (Zhang et al., 2025).

3.3. Чисельність груп мікроорганізмів, які приймають участь у циклі азоту за застосування різних добрив на посівах кормових бобів

Мікроорганізми ґрунту є одним з важливих факторів агробіоценозів. Адаптація та розвиток сільськогосподарських рослин невіддільно пов'язаний не тільки з елементами технології вирощування їх а першочергово з взаємодією з ґрунтом та біотою ґрунту. А тому процеси формування родючості ґрунту є основою сталого та безпечного розвитку сільськогосподарської галузі взагалі. А це значить що лише вивчення і виявлення особливостей функціонування мікробних ценозів дозволяє сформулювати уявлення про усі компоненти агроценозу.

Таблиця 3.3 Чисельність основних фізіологічних груп мікроорганізмів, які приймають участь у циклі азоту за використання добрив, млн. КУО в 1 г а.с.г.

Варіант удобрення	Шар ґрунту, см	Амоніфікуючі	Амілолітичні
Т1 — N ₀ (контроль без азоту)	0-15	3,8±0,06	2,0±0,05
	15-30	4,2±0,08	2,8±0,06
Т2 — N ₅₀ (мінеральний контроль)	0-15	2,8±0,03	2,5±0,22
	15-30	3,4±0,05	2,5±0,26
Т3 — N ₅₀ (компост)	0-15	8,7±0,23	2,7±0,05
	15-30	6,9±0,31	2,9±0,06
Т4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (М)	0-15	4,3±0,01	1,3±0,04
	15-30	4,2±0,79	1,6±0,57
Т5 — N ₅₀ (VC - вермікомпост)	0-15	7,2±0,3	1,3±0,04
	15-30	6,2±0,79	1,6±0,57
Т6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (М)	0-15	4,4±0,25	1,5±0,05
	15-30	2,2±0,79	1,6±0,57

Найвища чисельність амоніфікуючих бактерій отримано за використання Т3 — N₅₀ (компост), перевищення порівняно з контролем становило 129 (шар 0-1 см) і 64% (15-30 см). Також високі показники отримано за використання вермикомпосту, перевищення становило 95 і 52%.

3.4 Динаміка росту і продуктивності кормових бобів за різного азотного живлення

Перший відбір був проведений на 30 добу після появи сходів. Площа рамки для відбору – 1м² (1*1 м). Як бачимо найвищий результат показав 3 і 4 варіантах за застосування N₅₀ (компост) і N₂₅ (компост) + N₂₅ (М), що порівняно з контролем становило 11 і 9,7%.

Таблиця 3.4. Біомаса бобів кормових від першого відбору за застосування різних варіантів удобрення, 2025 р (г)

Варіант удобрення	Суха біомаса, г Bean_DM	Сира біомаса, г Bean_RM
T1 — N ₀ (контроль без азоту)	34,66	234,19
T2 — N ₅₀ (мінеральний контроль)	36,11	225,69
T3 — N ₅₀ (компост)	39,41	243,27
T4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (М)	38,03	242,23
T5 — N ₅₀ (VC -вермікомпост)	35,24	209,76
T6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (М)	30,25	182,23

На початковому етапі вегетації (30 діб) спостерігали помітні відмінності у розвитку рослин залежно від джерела азоту. Так, найменші значення було отримано на 6 варіанті за внесення половинної норми азоту у вигляді вермикомпосту і мінерального азоту, зменшення було на 14,4% порівняно з контролем. Безазотний контроль (T1 – N₀) мав найменші показники сирії (Bean_RM = 234,2 г/м²) та сухої маси (Bean_DM = 34,7 г/м²). Внесення мінерального азоту (T2 – N₅₀) забезпечило інтенсивніший стартовий ріст —

приріст сухої маси становив $+3,2 \text{ г/м}^2$ ($\approx 9 \%$) відносно контролю, що узгоджується з ефектом «стартового N» (Tsige et al., 2022).

Варіанти з органічними джерелами (Т3 – компост, Т5 – вермікомпост) демонстрували поступове наростання біомаси, але відставали від мінерального контролю на ранніх етапах через повільніше мінералізування азоту. Зокрема, у Т3 і Т5 суха маса становила $33,9\text{--}35,2 \text{ г/м}^2$. Найнижчі показники спостерігались у варіантах із комбінованими дозами $\text{N}_{25} + \text{N}_{25}(\text{M})$ — переважно через відтерміновану доступність органічного N.

Таким чином, на 30-ту добу азотні підживлення головно впливали на початкову вегетативну масу, забезпечуючи перевагу мінеральним формам азоту, тоді як органічні джерела проявляли уповільнену, але стабільну дію.

Подібні результати отримано у досліджах Jithesh et al. (2024), де короткостроковий ефект швидкодоступного N супроводжується поступовим посиленням BNF після адаптації ризобій.



Рис. 3.1. Кормові боби на 30 день розвитку

Таблиця 3.5. Біомаса бобів кормових на 60-й день розвитку за застосування різних варіантів удобрення, 2025 р (г)

Варіант удобрення	Суха біомаса, г Bean_DM	Сира біомаса, г Bean_RM
T1 — N ₀ (контроль без азоту)	335,21	1802,20
T2 — N ₅₀ (мінеральний контроль)	343,68	1548,11
T3 — N ₅₀ (компост)	395,81	1884,81
T4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (M)	398,24	2001,21
T5 — N ₅₀ (VC -вермікомпост)	357,15	1879,74
T6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (M)	264,38	1212,75

Через 60 днів після сходів інтенсивність росту в більшості варіантів значно зросла. Найвищі показники спостерігались у варіантах T4 (N₂₅ компост + N₂₅ M), де поєднання мінерального та органічного джерел створювало синергетичний ефект — швидке надходження доступного N на початку вегетації та подальше його надходження з органічної фракції (INRAE, 2023). Збільшення порівняно з контролем становила 18,8%. Проте подальше вивільнення N із цього джерела забезпечило високу врожайність у кінці вегетації.

У середньому приріст сухої маси порівняно з 30-добовим етапом становив у 8–11 разів, що свідчить про активну фазу росту й формування репродуктивних органів. Ця тенденція узгоджується з даними Voisin et al. (2002), які вказують на пік потреби бобів у N у фазі бутонізації та цвітіння.

Біомаса бобів кормових на 90-й день розвитку за застосування різних варіантів удобрення наведена в таблиці 3.6. Найвища біомаса суха і волога отримана за використання мінерального азоту за вирощування кормових бобів і становить 471,5 г, що на 62% більше порівняно з контролем.

Таблиця 3.6. Біомаса бобів кормових на 90-й день розвитку за застосування різних варіантів удобрення, 2025 р (г)

Варіант удобрення	Суха біомаса, г Bean_DM	Сира біомаса, г Bean_RM
T1 — N ₀ (контроль без азоту)	290,52	602,55
T2 — N ₅₀ (мінеральний контроль)	471,47	849,63
T3 — N ₅₀ (компост)	424,69	807,92
T4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (M)	413,64	771,27
T5 — N ₅₀ (VC -вермікомпост)	442,62	772,02
T6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (M)	385,92	668,7

На момент збирання врожаю (90 доба) спостерігали значні розбіжності між варіантами як за урожайністю зерна (Bean_yield), так і за сухою масою бобів (Bean_DM) (табл. 3.6).

Органічні варіанти T3 – N₅₀ (компост) і T5 – N₅₀ (вермікомпост) підвищили урожайність на 36–42 %, підтверджуючи літературні дані щодо підсилення нодуляції та поліпшення структури ґрунту під впливом органічних добрив (Blouin et al., 2019; Amaya-Gómez et al., 2025). Дещо нижчі, але стабільно високі результати мали T2 – N₅₀ (мінеральний контроль) (471,5 г/м², +51 %)

Комбіновані схеми N₂₅ + N₂₅(M) продемонстрували приріст на 24–42 %, але не перевершили повну дозу N₅₀. Це свідчить, що оптимальна ефективна доза N для даних умов становить 50 кг N/га, незалежно від джерела, за умови контролю балансу між мінералізацією й симбіотичною фіксацією азоту.

Урожайність зерна бобів кормових і соломи кількість за застосування різних варіантів удобрення наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7. Урожайність зерна бобів кормових і соломи кількість за застосування різних варіантів удобрення, 2025 р

Варіант удобрення	Урожайність, т/га	Солома, г/м ²
T1 — N ₀ (контроль без азоту)	3,12	290,52
T2 — N ₅₀ (мінеральний контроль)	3,78	471,47
T3 — N ₅₀ (компост)	3,83	424,69
T4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (M)	3,58	413,64
T5 — N ₅₀ (VC -вермікомпост)	3,29	442,62
T6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (M)	2,83	385,92
НІР 095	0,28	16,5

Оцінювання урожайності зерна та маси соломи проведено з використанням показника найменшої істотної різниці (НІР_{0,95}), який становив 0,28 т/га для зерна і 16,5 г/м² для соломи. Це дозволяє визначити, чи перевищує різниця між варіантами дослідів рівень статистичної достовірності.

Контрольний варіант без азоту (Т1) забезпечив урожайність 3,12 т/га. Варіанти Т2, Т3 і Т4 формують статистично достовірно більший урожай порівняно з Т1, оскільки різниця між середніми становить відповідно 0,66, 0,71 та 0,46 т/га, що перевищує НІР_{0,95}. Варіант Т5 характеризується приростом лише на 0,17 т/га, що менше за порогове значення, тому відмінність з контролем статистично недостовірна. Для варіанта Т6 різниця з контролем становить 0,29 т/га, що трохи перевищує НІР_{0,95} і формально трактується як достовірна.

При порівнянні удобрених варіантів між собою встановлено, що Т2 і Т3 не мають статистично значущих відмінностей (0,05 т/га < НІР_{0,95}). Недостовірною також є різниця між Т3 і Т4 (0,25 т/га < 0,28 т/га). Натомість порівняння Т2 або Т3 з Т5 показує достовірну різницю (0,49–0,54 т/га > НІР_{0,95}). Варіант Т6 достовірно поступається інтенсивнішим варіантам Т2–Т4 (0,75–1,00 т/га > НІР_{0,95}).

Усі удобрені варіанти демонструють більшу масу соломи порівняно з контролем, і різниця в усіх випадках значно перевищує НІР_{0,95} (134–181 г/м² при

пороговому значенні 16,5 г/м²). Таким чином, збільшення маси соломи під впливом удобрення є статистично підтвердженим для всіх варіантів.

На основі $HP_{0,95}$ встановлено, що варіанти Т2, Т3 і Т4 формують достовірно вищу урожайність зерна порівняно з контролем. Варіант Т5 не забезпечує статистично значущого приросту. Варіант Т6 демонструє достовірне зниження урожайності щодо високих значень у варіантах Т2–Т4. Для маси соломи всі удобрені варіанти відзначаються достовірним перевищенням контролю.

3.5. Економічна ефективність вирощування кормових бобів за різного удобрення

Економічна ефективність основна складова виробництва. Економічна ефективність за застосування різних варіантів удобрення наведена в табл. 3.8.

Таблиця 3.8. Економічна ефективність за застосування різних варіантів удобрення, 2025 р

Варіант удобрення	Урожайність, т/га	Вартість продукції, грн/га	Витрати, грн/га	Умовно чистий дохід, грн/га
Т1 — N ₀ (контроль без азоту)	3,12	46800	19800	27000
Т2 — N ₅₀ (мінеральний контроль)	3,78	56700	23000	33700
Т3 — N ₅₀ (компост)	3,83	57450	25700	31750
Т4 — N ₂₅ (компост) + N ₂₅ (М)	3,58	53700	24300	29400
Т5 — N ₅₀ (VC - вермікомпост)	3,29	49350	26800	22550
Т6 — N ₂₅ (VC) + N ₂₅ (М)	2,83	42450	25300	17150

Найвищий умовно чистий дохід отримано за застосування 50 кг/га мінерального азоту і становила 33700 грн/га, застосування компосту зменшило 1950 грн/га прибуток, але за впливом на ґрунт має позитивний ефект.

ВИСНОВКИ

1. Органічні добрива (компост та вермікомпост) підвищують рН ґрунту порівняно з контрольними варіантами. Спостерігається незначне зниження рН після сівби у більшості варіантів, що може бути пов'язано з процесами азотфіксації та виділенням органічних кислот кореневою системою. Глибший шар ґрунту (15-30 см) часто показує вищі або стабільніші значення рН порівняно з верхнім шаром.

2. На ранньому етапі (30 діб) перевагу мали мінеральні джерела азоту завдяки швидкій доступності N, що забезпечувало інтенсивний стартовий ріст. Найвищі показники отримано за використання вермікомпосту після вирощування кормових бобів, підвищення становило 13-22% порівняно з початковим періодом.

3. Найвища чисельність амоніфікуючих бактерій отримано за використання ТЗ — N₅₀ (компост), перевищення порівняно з контролем становило 129 (шар 0-1 см) і 64% (15-30 см). Також високі показники отримано за використання вермікомпосту, перевищення становило 95 і 52%.

4. На початковому етапі вегетації (30 діб) спостерігали помітні відмінності у розвитку рослин залежно від джерела азоту. Так, найменші значення було отримано на 6 варіанті за внесення половинної норми азоту у вигляді вермікомпосту і мінерального азоту, зменшення було на 14,4% порівняно з контролем.

5. На 60 добу максимальні показники біомаси спостерігались у комбінованих схемах (Т4), де органічна та мінеральна форми діяли синергетично.

6. Найвища біомаса суха і волога на 90-й день розвитку отримана за використання мінерального азоту за вирощування кормових бобів і становить 471, 5 г, що на 62% більше порівняно з контролем. Органічні та інтегровані форми азоту (компост, VC, IF) проявили стабільний ефект із додатковими ґрунтополіпшувальними властивостями, що узгоджується з практиками сталого землеробства (FAO 2021; INRAE 2023).

7. Найвищу урожайність зерна порівняно з контролем отримано за використання компосту, показники на 22% більші. Варіант Т6 демонструє достовірне зниження урожайності щодо високих значень у варіантах Т2–Т4. Для маси соломи всі удобрені варіанти відзначаються достовірним перевищенням контролю.

8. Найвищий умовно чистий дохід отримано за застосування 50 кг/га мінерального азоту і становила 33700 грн/га, застосування компосту зменшило 1950 грн/га прибуток, але за впливом на ґрунт має позитивний ефект.

9. Для умов дослідження доцільно застосовувати інтегроване азотне живлення — поєднання мінерального та органічного N у дозі близько 50 кг N/га.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abd-Alla, M.H., El-Enany, A.E., Bagy, M.K., Bashandy, S.R. (2011). Nodulation and nitrogen fixation of faba bean plants as influenced by the inoculation method of *Rhizobium leguminosarum* biovar *viceae* strain RCR 1001. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1283-1288. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.02.017.
2. Abd-Alla, M.H., Yan, F., Schubert, S. (2018). The evaluation of sewage sludge application as a fertilizer for broad bean (*Faba sativa* Bernh.) crops. *Food and Energy Security*, 7(3), e00142. DOI: 10.1002/fes3.142.
3. Ahmad, A., Aslam, Z., Bellitürk, K., et al. (2024). Vermicompost: A potential organic fertilizer for sustainable vegetable cultivation. *Scientia Horticulturae*, 338, 113440. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113440.
4. Amaya-Gómez, C.V., Porcel, M., Mesa-Valle, C.M., Mesa-García, J. (2025). Compost and vermicompost production from organic wastes and their use in horticulture. *Horticulturae*, 11(1), 15. DOI: 10.3390/horticulturae11010015
5. Angaw, T., Asnake, A. (2020). Legume-Rhizobium Strain Specificity Enhances Nutrition and Nitrogen Fixation in Faba Bean (*Vicia faba* L.). *Agronomy*, 10(6), 826. DOI: 10.3390/agronomy10060826.
6. An-Nori, A., Hasbullah, N.A., Ahmad, S., et al. (2023). Sewage sludge application in agriculture: Environmental and health impacts. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103067. DOI: 10.1016/j.eti.2023.103067
7. Aslam, Z., Ahmad, A., Bellitürk, K., et al. (2018). Effect of Vermicompost Tea on Faba Bean Growth and Yield. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(18), 2323-2337. DOI: 10.1080/00103624.2018.1499761.
8. Bekele, A., Kibret, K., Bedadi, B., Yli-Halla, M. (2021). Yield, nutrient uptake, and economic return of faba bean (*Vicia faba* L.) in calcareous soil as affected by compost types. *Journal of Agriculture and Food Research*, 6, 100232. DOI: 10.1016/j.jafr.2021.100232.
9. Bekele, E., Adamu, A., Assefa, F. (2025). Isolation, Characterization and Evaluation of Symbiotic Effectiveness of Rhizobia Nodulating Faba Bean (*Vicia faba*.

L.). *Chemical and Biomolecular Engineering*, 10(2), 12. DOI: 10.11648/j.cbe.20251002.12.

10. Blouin, M., Barrere, J., Meyer, N., et al. (2019). Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 34. DOI: 10.1007/s13593-019-0579.

11. Canadian Agronomist. (2023, June 20). *Nitrogen fixation and nutrient uptake in faba bean*. <https://canadianagronomist.ca/nitrogen-fixation-and-nutrient-uptake-in-faba-bean/>

12. Cazzato, E., Tufarelli, V., Ceci, E., Stellacci, A.M., Laudadio, V. (2012). Quality, yield and nitrogen fixation of faba bean seeds as affected by sulphur fertilization. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil and Plant Science*, 62(8), 732-738. DOI: 10.1080/09064710.2012.698642

13. Chala, D., Tamado, T., Lemma, W. (2023). Effect of Rhizobial Inoculants and Vermicompost Application on Growth and Yield of Faba Bean (*Vicia faba L.*) in Arsi Zone, Southeastern Highlands of Ethiopia. *Advances in Crop Science and Technology*, 11(11), 595. URL: <https://www.researchgate.net/publication/379406921>.

14. Chynchyk, O., Olifirovych, S., Olifirovych, V., & Nebaba, K. (2021). Biological nitrogen in increasing the productivity of beans (grains). *EUREKA: Life Sciences*, (5), 12-17. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2021.002075>.

15. Ciampitti, I. A., & Salvagiotti, F. (2018). New insights into soybean biological nitrogen fixation. *Agronomy Journal*, 110(4), 1185-1196. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.06.0348>

16. De Notaris, C., Couëdel, A., Olesen, J.E., Doltra, J. (2023). Faba bean productivity, yield stability and N₂-fixation in long-term organic and conventional crop rotations. *Field Crops Research*, 295, 108894. DOI: 10.1016/j.fcr.2023.108894.

17. Denton, M.D., Pearce, D.J., Peoples, M.B. (2012). Nitrogen contributions from faba bean (*Vicia faba L.*) reliant on soil rhizobia or inoculation. *Plant and Soil*, 365, 363-374. DOI: 10.1007/s11104-012-1393-2.

18. Elsalam, H.E.A., El-Sharnouby, M.E., Mohamed, A.E., et al. (2021). Effect of Sewage Sludge Compost Usage on Corn and Faba Bean Growth, Carbon and Nitrogen Forms in Plants and Soil. *Agronomy*, 11(4), 628. DOI: 10.3390/agronomy11040628.
19. Estrada-Bonilla, G.A., Sousa, M.E. (2005). Heavy Metals in Soil Treated with Sewage Sludge Composting, their Effect on Yield and Uptake of Broad Bean Seeds (*Vicia faba* L.). *Water, Air, & Soil Pollution*, 166, 303-319. DOI: 10.1007/s11270-005-5269-4.
20. Etemadi, F., Hashemi, M., Barker, A.V., Zandvakili, O.R., Liu, X. (2018). Faba bean yield and growth dynamics in response to soil potassium availability and sulfur application. *Scientia Horticulturae*, 243, 513-520. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.09.008.
21. Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97-185. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)
22. FAO (2018). Effect of Vermicompost Tea on Faba Bean Growth and Yield. Agricultural Science and Technology Information. URL: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201900259943>
23. FAO (2021). The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
24. Fogelberg, F., Carlsson, G., Carlsson, B., Hauggaard-Nielsen, H. (2023). Effect of cultivar and inoculant on yield and N₂ fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) under Nordic conditions. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1179996. DOI: 10.3389/fagro.2023.1179996
25. Genetu, G., Yli-Halla, M., Asrat, M., Alemayehu, M. (2021). Effect of rhizobial inoculants on yield and yield components of faba bean (*Vicia fabae* L.) on vertisol of Wereillu District, South Wollo, Ethiopia. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2, 5. DOI: 10.1186/s43170-021-00025-y.
26. Getachew, T., Firew, M., & Abera, T. (2018). Yield of faba bean (*Vicia faba* L.) as affected by lime, mineral P, farmyard manure, compost and rhizobium in acid soil of

Lay Gayint District, northwestern highlands of Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, 7(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0168-2>

27. Gomaa, I.M., Afifi, M.M. (2021). Effect of Organic Fertilizers on Growth and Yield of Faba Bean (*Vicia faba* L.). *Alexandria Journal of Agricultural Research*, 46(1), 139-152. DOI: 10.21608/ajar.2021.218567.

28. Hafez, M., Popov, A.I., Rashad, M. (2023). Vermicompost: Enhancing Plant Growth and Combating Abiotic and Biotic Stress. *Agronomy*, 13(4), 1134. DOI: 10.3390/agronomy13041134.

29. Hailu, E., Getaneh, G., Sefera, T., et al. (2024). Enhancing faba bean (*Vicia faba* L.) productivity through establishing the area-specific fertilizer rate recommendation in southwest Ethiopia. *Open Life Sciences*, 19(1), 20220844. DOI: 10.1515/biol-2022-0844.

30. Hamdi, Y.A. (1982). Symbiotic Nitrogen Fixation in Faba Beans. In: *Faba Bean Improvement*, pp. 127-138. Springer. DOI: 10.1007/978-94-009-7499-9_12.

31. Homyak, P. M., Yanai, R. D., Burns, D. A., Briggs, R. D., & Germain, R. H. (2019). Nitrogen fertilizer suppresses mineralization of soil organic matter in maize agroecosystems. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 7, 59. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00059>

32. INRAE (2023). Innovations in Fertilizer Technology for Sustainable Agriculture. Research Report. French National Research Institute, Paris.

33. Jensen, E.S., Peoples, M.B., Hauggaard-Nielsen, H. (2010). Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research*, 115(3), 203-216. DOI: 10.1016/j.fcr.2009.10.008.

34. Jithesh, T.K., Lal, R., Menon, A., Thomas, R. (2024). Recent progress and potential future directions to enhance biological nitrogen fixation in faba bean (*Vicia faba* L.). *Plants, People, Planet*, 6(3), e10145. DOI: 10.1002/ppp3.10145.

35. Klippenstein, S.R., Gan, Y., Malhi, S.S., Zentner, R.P. (2022). Nitrogen and phosphorus uptake and nitrogen fixation estimation of faba bean in western Canada. *Agronomy Journal*, 114(2), 811-824. DOI: 10.1002/agj2.20945

36. Köpke, U., & Nemecek, T. (2010). Ecological services of faba bean. *Field Crops Research*, 115(3), 217-233. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.012>
37. Liu, Y., Yan, J., Zhang, W., Li, C. (2019). Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and biological nitrogen fixation of faba bean. *Scientific Reports*, 9(1), 16659. DOI: 10.1038/s41598-019-41146-9
38. Long, J., Gong, Y., Du, H., et al. (2023). Optimizing nitrogen fertilization of faba bean (*Vicia faba*. L) in rainfed paddy-upland rotation cropping. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1114327. DOI: 10.3389/fpls.2023.1114327.
39. Louarn, G., Pereira-Lopès, E., Fustec, J., Mary, B., Voisin, A. S., Carvalho, P. C. F., & Faverdin, P. (2015). The amounts and dynamics of nitrogen transfer to grasses differ in alfalfa and white clover-based grass-legume mixtures as a result of rooting strategies and rhizodeposit quality. *Plant and Soil*, 389(1-2), 289-305. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2354-8>
40. Luo, C., Zhang, Y., Gao, Y., Zhang, W., Li, Y. (2021). Effects of nitrogen regulation and strip intercropping on growth, yield, and nitrogen fixation of faba bean. *Crop Science*, 61(4), 2513-2531. DOI: 10.1002/csc2.20556
41. Mazzarino, M.J., Laos, F., Satti, P., Moyano, S. (2007). Nitrate losses, nutrients and heavy metal accumulation from substrates assembled for urban soils reconstruction. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 1619-1623. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.07.032.
42. Mekonnen, B., Tolessa, A.R. (2025). Effect of vermicompost and lime on faba bean (*Vicia faba* L.) grain yield and soil properties on non-responsive acidic soils of Western Amhara, Ethiopia. *PLoS One*, 20(10), e0334687. DOI: 10.1371/journal.pone.0334687.
43. Mendoza-Suárez, M., Andersen, S. U., Poole, P. S., Sánchez-Cañizares, C. (2024). Increased diversity of beneficial rhizobia enhances faba bean growth. *Nature Communications*, 15, 10657. DOI: 10.1038/s41467-024-54940-5.
44. Mesfin, T. (2020). Impacts of soil acidity on growth performance of faba bean (*Vicia faba* L.) and management options. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*, 8(4), 423-431. <https://doi.org/10.14662/ARJASR2020.423>

45. Möller, K., Schultheiß, U. (2025). Irrigation but not fertilization increases yields and N₂ fixation in organic faba bean in temperate climates. *Agricultural Water Management*, 308, 109286. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109286.

46. Mosaic Crop Nutrition. (2023, October 23). *Nitrogen*. <https://www.cropnutrition.com/nutrient-management/nitrogen/>

47. Natural Science News (2024). How compost and lime improve bean growth and soil health in acidic conditions. URL: <https://naturalsciencenews.com/article/15759>

48. Nemecek, T., von Richthofen, J. S., Dubois, G., Casta, P., Charles, R., & Pahl, H. (2008). Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 28(3), 380-393. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.004>

49. Oklahoma State University Extension (2017). Using Biosolids as a Plant Nutrient Source. Fact Sheet PSS-2249. URL: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/using-biosolids-as-a-plant-nutrient-source.html>

50. Oklahoma State University Extension. (2017, February 1). *Forage legumes and nitrogen production*. <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/forage-legumes-and-nitrogen-production.html>

51. Omer, Z.S., Abdallah, S., Yousif, M. (2020). Effects of sulphur fertilization and molybdenum on growth and nitrogen fixation of faba bean under organic cultivation. *Agricultural and Food Science*, 29(1), 73-86. DOI: 10.23986/afsci.88537

52. Oregon State University. (2019, October 1). *Beans, fava*. <https://horticulture.oregonstate.edu/oregon-vegetables/beans-fava>

53. Rigby, H., Clarke, B.O., Pritchard, D.L., et al. (2015). A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Science of The Total Environment*, 541, 1310-1338. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.089.

54. Santos, D.H., Silva, M.A., Tiritan, C.S., et al. (2023). Residual effects of composted sewage sludge on nitrogen cycling and plant metabolism in a no-till common bean-palisade grass-soybean rotation. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1281670. DOI: 10.3389/fpls.2023.1281670.

55. Simon-Miquel, G., Reckling, M., Plaza-Bonilla, D. (2024). Faba bean introduction makes protein production less dependent on nitrogen fertilization in Mediterranean no-till systems. *Field Crops Research*, 319, 109639. DOI: 10.1016/j.fcr.2024.109639.
56. Solomon, T., Pant, L.M., Angaw, T. (2021). Legume-rhizobium specificity effect on nodulation, biomass production and partitioning of faba bean (*Vicia faba* L.). *Scientific Reports*, 11, 3678. DOI: 10.1038/s41598-021-83235-8.
57. Tadesse, B., Bakala, F., Ayana, M., Chala, A., Birhanu, G., & Fikre, A. (2025a). Agronomic performances of faba bean (*Vicia faba* L.) varieties to rhizobial inoculation, biochar and lime applications under acidic soil conditions in Ethiopia. *Food and Energy Security*, 14(1), e70091. <https://doi.org/10.1002/fes3.70091>
58. Tadesse, B., Bakala, F., Birhanu, G., Fikre, A., & Asfaw, A. (2025b). Improving faba bean (*Vicia faba* L.) productivity and nutrient availability through organic amendments and bio-inoculants in acidic soils stress. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 8(1), e70073. <https://doi.org/10.1002/agg2.70073>
59. Thilakarathna, M. S., McElroy, M. S., Chapagain, T., Papadopoulos, Y. A., & Raizada, M. N. (2016). Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(4), 58. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0396-4>
60. Torabian, S., Zakeri, H., Farhangi-Abriz, S. (2024). Optimizing faba bean cultivation: assessing varietal performance in spring and fall. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1474528. DOI: 10.3389/fagro.2024.1474528.
61. Tsige, A.G., Abreha, K.T., Abraha, K.B. (2022). Effect of organic and inorganic fertilizers on yield and yield components of food barley (*Hordeum vulgare* L.). *International Journal of Agronomy*, 2022, 7273832. DOI: 10.1155/2022/7273832
62. Tsige, G. W., Yitafaru, B., Amare, T., & Selassie, Y. G. (2022). Effect of mineral nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on the productivity of faba bean (*Vicia faba* L.) in acidic soils of Wolaita Zone, Southern Ethiopia. *International Journal of Agronomy*, 2022, 2232961. <https://doi.org/10.1155/2022/2232961>

63. Uçar, Ö. (2021). Effects of Microbial Fertilizer and Vermicompost Applications on the Yield and Yield Related Parameters of Broad Bean (*Vicia faba* L.) under Eastern Mediterranean Highland Agroclimatic Conditions. *Legume Research*, 44(7), 838-841. DOI: 10.18805/LR-622.
64. University of Minnesota Extension. (2018). *Understanding nitrogen in soils*. <https://extension.umn.edu/nitrogen/understanding-nitrogen-soils>
65. US EPA (2016). Basic Information about Sewage Sludge and Biosolids. Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-sewage-sludge-and-biosolids>
66. Voisin, A.S., Salon, C., Munier-Jolain, N.G., Ney, B. (2002). Effect of mineral nitrogen on nitrogen nutrition and biomass partitioning between the shoot and roots of pea (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil*, 242, 251-262. DOI: 10.1023/A:1016214223900
67. Zhang, X., Wang, Y., Zhao, J., Chen, L., Liu, H., & Wei, G. (2025). Nitrogen fertilizer management effectively improves soil quality in continuous monocropping and alleviates Fusarium wilt in faba bean. *Plant, Cell & Environment*, 48(2), e70092. <https://doi.org/10.1111/pce.70092>
68. Zhang, Y., Wang, X., Li, Y., et al. (2022). Wheat and Faba Bean Intercropping Together with Nitrogen Modulation Is a Good Option for Balancing the Trade-Off Relationship between Grain Yield and Quality in the Southwest of China. *Agronomy*, 12(12), 2984. DOI: 10.3390/agronomy12122984.
69. ДСТУ ISO 14240-2:2003 Якість ґрунту. Визначення ґрунтової мікробної біомаси. Частина 2. Фумігаційно-екстракційний метод.
70. РМ.УЛ.5.4-23 Визначення чисельності еколого-трофічних груп ґрунтових мікроорганізмів.