МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: фізико-математичної та природничої освіти
Кафедра: біології та хімії

Допущено до захисту
«_____»_____2026 р.
Зав. кафедри, канд. хім. наук, проф.
_____ Кормош Ж. О.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
БАКАЛАВРА

БІОМОРФОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОСЛИН СОЇ ВНАСЛІДОК УДОБРЕННЯ

Виконала: студентка 4 курсу, 47 групи
Освітньої програми: Біологія
спеціальності: 091 Біологія та біохімія
Гринчук Анна Олександрівна

Науковий керівник: канд. біол. наук, доц.,
Красноштан Ігор Васильович

Умань – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП 3

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.БІОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЖИВЛЕННЯ СОЇ 6

1.1. Фізіологічна роль азоту у формуванні біоморфологічних ознак сої 7

1.2. Симбіотична азотфіксація та її вплив на морфогенез рослин 14

1.3. Біологічна дія інгібіторів мікробної активності в ризосфері 17

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ, УМОВИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ 21

2.1. Характеристика об'єкту досліджень (селекційно-біологічні особливості сорту сої) 21

2.2. Абіотичні умови проведення досліджень 22

2.3. Методика проведення біометричних, фенологічних та біохімічних аналізів 25

РОЗДІЛ 3. БІОМОРФОЛОГІЧНІ ТА БІОХІМІЧНІ ПАРАМЕТРИ РОСЛИН СОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД УМОВ ЖИВЛЕННЯ 27

3.1. Динаміка проходження фенологічних фаз розвитку рослин 27

3.2. Морфометричні показники та стан асиміляційного апарату 30

3.3. Розвиток симбіотичного апарату в онтогенезі 35

3.4. Формування генеративних органів та елементів біологічної продуктивності 38

3.5. Вплив умов живлення на базові біохімічні показники насіння сої .. 43

ВИСНОВКИ 48

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 50

ВСТУП

Актуальність теми. Соя (*Glycine max* (L.) Merr.), як пластична сільськогосподарська культура, демонструє високу адаптивність до нових еколого-географічних умов, успішно поширюючись у північніші регіони зони помірного зволоження [1]. Насіння сої вирізняється високим вмістом білків (близько 40%), ключовим структурним компонентом яких є азот, що зумовлює підвищену фізіологічну потребу рослин у його асиміляції у великих кількостях [2].

На відміну від злакових та інших небобових культур, соя здатна задовольняти значну частину своїх потреб в азоті завдяки симбіотичним взаємовідносинам з бактеріями роду *Rhizobium* [3]. Цей складний біотичний механізм мутуалізму із *Bradyrhizobium japonicum* дозволяє рослині отримувати близько 50–60% необхідного азоту шляхом його фіксації з атмосфери в обмін на вуглеводи [2]. Решту 40–50% азоту рослина засвоює з ґрунту. Для оптимізації азотного живлення та ініціації симбіозу, особливо на нових площах вирощування, застосовують інокуляцію насіння специфічними штамами ризобій [4].

Водночас дослідження умов мінерального живлення сої свідчать про те, що природних ґрунтових ресурсів мінерального азоту часто виявляється недостатньо для повної реалізації біологічного потенціалу культури [1; 2]. Однак, з фізіологічної точки зору, підвищена концентрація нітратного азоту в ґрунтовому розчині здатна гальмувати енергозатратний процес симбіотичної азотфіксації [5]. З огляду на це, застосування інгібіторів нітрифікації розглядається як дієвий механізм біологічної оптимізації живлення сої, що запобігає надмірному накопиченню нітратів [6].

Важливим фактором ефективного функціонування азотфіксувального комплексу є також рівень кислотності ґрунту, на який безпосередньо впливає накопичення нітратів [7]. Пошук шляхів посилення здатності сої до ефективної азотфіксації та формування високого рівня біологічної продуктивності залишається актуальним напрямом сучасних біологічних досліджень

[8; 9]. Тому предметом наукового інтересу є закономірності формування біоморфологічних та біохімічних показників сої за умов екзогенної регуляції азотного живлення, зокрема із застосуванням інгібітора нітрифікації та мікробіологічних інокулянтів.

Мета дослідження – дослідити вплив різних умов азотного живлення, застосування інгібітора нітрифікації та мікробіологічних інокулянтів на біоморфологічні показники, розвиток симбіотичного апарату та накопичення основних біохімічних компонентів у насінні сої.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати динаміку фенологічного розвитку та зміну морфометричних показників рослин сої за різних умов живлення: висоти, габітусу, стану асиміляційного апарату.
2. Дослідити вплив оптимізації азотного живлення та інгібування нітрифікації на інтенсивність формування симбіотичного апарату в онтогенезі культури.
3. Оцінити процеси формування генеративних органів та елементів структури біологічної продуктивності досліджуваних рослин.
4. Визначити базові біохімічні показники у насінні сої залежно від дії досліджуваних факторів.

Об’єкт дослідження: процеси росту, розвитку, формування біоморфологічних ознак та біохімічного складу насіння сої.

Предмет дослідження: біоморфологічні параметри, симбіотичний апарат, елементи біологічної продуктивності та біохімічні показники якості насіння сої за дії різних рівнів азотного живлення, інгібітора нітрифікації та передпосівної інокуляції.

Методи дослідження:

- *Польовий* – для спостереження за ростом, проходженням фенологічних фаз розвитку сої та фіксації загального стану рослин;
- *Біометричний (вимірювально-ваговий)* – для визначення морфометричних показників рослин, маси та кількості симбіотичних бульбочок, а також елементів структури біологічної продуктивності;

- *Лабораторний* – для визначення базових біохімічних показників насіння сої (вміст сирого протеїну та жиру);
- *Математико-статистичний* – для оцінки достовірності отриманих експериментальних даних та виявлення закономірностей у біологічних процесах.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати поглиблюють теоретичні уявлення про фізіолого-морфологічні механізми адаптації сої до змін мінерального фону та екзогенної регуляції мікробіологічних процесів. Встановлені закономірності можуть бути використані як біологічне обґрунтування для екологізації технологій вирощування бобових культур. Матеріали досліджень також можуть бути застосовані у навчальному процесі під час викладання фахових дисциплін біологічного спрямування.

Публікації за темою дослідження.

Структура роботи.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. БІОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЖИВЛЕННЯ СОЇ

Соя є унікальним біологічним об’єктом, який відіграє ключову роль у глобальному біохімічному кругообігу речовин та забезпеченні харчових ланцюгів високоякісним протеїном [10]. Світовий інтерес до цієї культури безперервно зростає. Насіння сої вирізняється надзвичайно високим вмістом білкових фракцій (близько 35–40%), структурним базисом яких є азот, що зумовлює підвищену фізіологічну потребу рослин в асиміляції цього макроелемента порівняно з іншими видами. Рослини сої здатні формувати спеціалізований симбіотичний апарат (кореневі бульбочки) у взаємодії з ґрунтовими бактеріями-ризобіями [11], які за допомогою ферментного комплексу нітрогенази фіксують атмосферний N_2 і постачають його рослині-господарю у доступній формі. Окрім біологічної фіксації, соя активно поглинає мінеральні форми азоту, переважно нітрати, безпосередньо з ґрунтового розчину [12].

Інтенсивність накопичення загального азоту у пагонах має пряму кореляцію з кінцевою біологічною продуктивністю рослин, що забезпечується балансом між симбіотичною азотфіксацією та кореневим поглинанням [1]. Відповідно, підтримання високої та пролонгованої фізіологічної активності азотфіксувального комплексу є критично важливим фактором оптимізації морфогенезу сої.

Водночас, екзогенне надходження високих доз мінерального азоту часто спричиняє фізіологічне пригнічення процесів бульбочкоутворення та інгібує азотфіксацію. Безпосередній контакт нітрат-іонів з ризосферною зоною кореневої системи індукує серйозні морфологічні порушення в розвитку бульбочок. При цьому дистальні ділянки кореневої системи, які не зазнають впливу високих концентрацій нітратів, зберігають симбіотичну активність. Просторове розмежування або використання пролонгованих форм азотних добрив (зокрема карбаміду з полімерним покриттям) чи специфічних

інгібіторів дозволяє, за даними [13], оптимізувати ростові процеси та біохімічний склад насіння, уникаючи інгібування симбіозу.

У цьому розділі систематизовано наукові відомості щодо ролі азотного метаболізму у формуванні біоморфологічних ознак бобових культур. Особливу увагу приділено фізіологічним аспектам трансформації азотних сполук у ризосфері та впливу абіотичних (гідротермічних) факторів на мікробіом ґрунту. Застосування синтетичних регуляторів мікробної активності розглядається не лише як засіб запобігання екологічним ризикам (вимиванню нітратів), але й як потужний інструмент біологічного контролю азотного живлення.

1.1. Фізіологічна роль азоту у формуванні біоморфологічних ознак сої

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.), маючи східноазійське походження [9], вирізняється високою екологічною пластичністю і здатна адаптуватися до різних гідротермічних умов з температурним оптимумом 20-30°С. Біологічна цінність сої полягає в унікальному біохімічному складі її насіння, що робить її глобальним джерелом рослинного білка. Крім того, специфічний ліпідний комплекс насіння забезпечує 58% світового виробництва олійних ресурсів [10]. Фізіологічна адаптивність дозволяє культивувати сою в широкому діапазоні широт (до 50° пн.ш.) [9], причому генетичні особливості кожного сорту детермінують його реакцію на фотоперіод.

Завдяки потужному накопиченню білків та ліпідів соя історично стала ключовим елементом агроекосистем. Світові обсяги біомаси, що генеруються цією культурою у 9 країнах-лідерах, включаючи Україну, перевищують 356 млн тонн щорічно [14]. Найінтенсивніше формування біологічної маси спостерігається у Бразилії, США та Канаді. Україна також демонструє високий біологічний потенціал виробництва, що коливається від 3,7 млн тонн у 2021 році до 4,8 млн тонн у 2023 році [15].

Реалізація високого біологічного потенціалу сої вимагає значних фізіологічних та ресурсних витрат, що робить актуальним пошук оптимальних

умов її забезпечення елементами живлення. Ефективність функціонування рослинного організму тісно пов’язана із зовнішнім ресурсним забезпеченням, що вимагає комплексного підходу до моделювання умов її вирощування.

Біосинтез ліпідів у насінні сої сягає рекордних значень серед рослинних об’єктів (30%) [10]. Після екстракції ліпідної фракції залишковий продукт (шрот) зберігає близько 50% білка з повноцінним амінокислотним профілем, що має виняткову біологічну цінність.

Враховуючи зростаючу глобальну потребу в повноцінних протеїнах, фізіологи стикаються з проблемою: селекція, спрямована виключно на збільшення загальної біомаси, часто призводить до ефекту «розведення», знижуючи середню концентрацію білків у насінні [16]. Для підтримки оптимального рівня протеїну (не менше 47,5% у сухому залишку) необхідні нові фізіологічні стратегії оптимізації азотного обміну рослин.

Функціонування симбіотичного апарату сої здійснює потужний позитивний вплив на мікробіоценоз та трофічний стан ґрунту [17]. Атмосферний азот фіксується бактеріями безпосередньо у спеціалізованих морфологічних утвореннях – кореневих бульбочках [18]. Завдяки активності ферменту нітрогенази молекулярний азот відновлюється до амонійної форми (NH_4^+), яка частково виділяється в навколишнє ґрунтове середовище.

За своєю реакцією на фотоперіод соя належить до рослин короткого дня: перехід до генеративної фази ініціюється скороченням світлового періоду. Однак у сортів, адаптованих до високих широт, ця чутливість редукована для забезпечення швидкого проходження онтогенезу [17]. Ризосфера сої в агрогенних ґрунтах є складною гетерогенною системою, де інтенсивність мікробіологічних процесів сильно варіює у просторі та часі.

Достатнє забезпечення азотом є критичним для синтезу структурних та каталітичних білків, а також забезпечення енергетичного обміну бобових [2]. Оптимізація азотного фону здатна інтенсифікувати ростові процеси та підвищити загальну біологічну продуктивність рослин понад 40% [2].

Для реалізації процесів росту та розвитку рослини сої використовують три фізіологічні шляхи асиміляції азоту [19]:

1) біологічна фіксація молекулярного азоту бульбочковим апаратом [18];
2) поглинання ґрунтових пулів мінерального азоту;
3) асиміляція екзогенного азоту з добрив [20].

Ці процеси перебувають у складному фізіологічному антагонізмі: висока концентрація мінеральних форм азоту блокує розвиток симбіозу, змушуючи рослину переходити на автотрофне мінеральне живлення. І навпаки, за дефіциту азоту в ризосфері активується генний апарат мікросимбіонтів, і рослина повністю покладається на атмосферний азот. Екзогенне надходження азоту [20] має компенсувати розрив між цими процесами. Максимальна інтенсивність накопичення біомаси можлива лише за гармонійного поєднання обох механізмів живлення. Критичним етапом для формування морфологічних ознак сої є період від бутонізації до масового утворення бульбочок. Оскільки активна азотфіксація розпочинається лише на 14-й день після появи сходів, стартова наявність доступного азоту є необхідною умовою для формування повноцінного вегетативного габітусу [19].

Дослідження M. Didur et al. [21] довели значний вплив оптимізації живлення на фізіологічний стан сої сортів різних груп стиглості (Горлиця та Вінничанка). Використання мікроелементного комплексу як кофактора ферментативних реакцій (Мікрофол Комбі, 150 г/т) у поєднанні зі стартовим фоном $N_{30}P_{60}K_{60}$ індукувало активізацію фотосинтетичних процесів та підвищувало енергію росту рослин. Попри контрастні абіотичні стреси (коливання температур та опадів), оптимізація біохімічних процесів у рослинах дозволила сформувати високий рівень біологічної продуктивності (3,01–3,22 т/га) на ґрунтах з підвищеною кислотністю (pH 5,0-6,0).

Американські дослідники E. E. Kenedy et al. [22] підтвердили, що фізіологія сої, структура її габітусу та біохімічні параметри насіння сильно залежать від генетичних і екологічних факторів. Хоча екзогенний азот не завжди є обов’язковим, він здатен істотно модулювати фізіологічну відповідь

рослини. Взаємодія екзогенного азоту з гідротермічним режимом детермінує інтенсивність біосинтезу протеїнів та ліпідів. Зокрема, інтенсивність асиміляції азоту в листковому апараті під час наливу насіння змінюється залежно від стресових факторів: за сприятливих умов синтез протеїнів посилюється, тоді як прохолодна волога погода інгібує ці процеси незалежно від генотипу. Встановлено, що кореляція між інтенсивністю фотосинтезу, азотфіксацією та накопиченням білка у насінні має складний нелінійний характер [23].

Z. Gai, J. Zhang & C. Li [19] встановили, що динаміка наростання кореневої маси та активність фотосинтетичного апарату прямо залежать від балансу азоту. Низькі температури на ранніх етапах онтогенезу інгібують активність *Bradyrhizobium*, гальмуючи азотфіксацію та вегетативний морфогенез, що потребує компенсаторного надходження нітратів. На ефективність цих процесів критично впливають абіотичні фактори ризосфери: pH, гідротермічний режим та аерація [24].

Дослідження R. L. Cooper [25] доводять, що наявність стартового мінерального азоту запобігає фізіологічному голодуванню проростків до моменту формування перших симбіотичних бульбочок. Така стратегія оптимізації живлення істотно активізує формування площі листкової поверхні та збільшує вегетативну масу рослин. Водночас надмірні дози екзогенного азоту здатні повністю заблокувати розвиток симбіотичного апарату, хоча загальна біологічна маса може зростати. Оптимальний фізіологічний баланс досягається за помірних доз (менше 15-40 кг/га) та контрольованої густоти стояння.

Інтенсивність асиміляції вуглецю в процесі фотосинтезу визначає накопичення 75-95% загальної сухої маси рослини [23]. Рівень азотного живлення детермінує синтез хлорофілу, архітектоніку листкового апарату (індекс площі листя) та ексудативну активність кореневої системи. Оптимізація цих параметрів, особливо у фази інтенсивного росту (від бутонізації до цвітіння), дозволяє максимально розкрити генетичний

потенціал культури, нівелюючи вплив несприятливих погодних умов на пізніших етапах вегетації.

Вітчизняні біологи значну увагу приділяють вивченню фізіологічних розбіжностей в асиміляції нітратних та амонійних форм азоту [26]. Встановлено, що для забезпечення оптимального морфогенезу рослина здатна метаболізувати обидві форми, проте їхнє співвідношення впливає на енергетичний баланс клітини. Для максимізації ростових процесів соя повинна підтримувати високий рівень фотосинтетичної активності та безперервне надходження азотних сполук.

Онтогенез сої характеризується специфічним перерозподілом ресурсів. На початкових етапах росту рослина використовує депоновані в сім'ядолях біохімічні резерви. Згодом відбувається перехід від суто вегетативного морфогенезу до репродуктивного розвитку, який детально описано в працях T. D. Setiyono et al. [27]. У сої процеси наростання вегетативної маси відбуваються паралельно з формування генеративних органів аж до початку наливу насіння. Тривалість цих фенологічних фаз залежить від температурного режиму і в середньому становить близько двох місяців для вегетативного розвитку та трьох місяців для репродуктивного.

Асиміляція азотних сполук рослинами сої характеризується вираженою просторово-часовою нерівномірністю, що безпосередньо впливає на кінцеву біологічну продуктивність [13]. Фізіологічна складність живлення цієї культури зумовлена розривом між інтенсивністю ростових процесів та реальними можливостями кореневого апарату засвоювати елементи на різних етапах онтогенезу:

- Вегетативний етап (від проростання до цвітіння): рослина здатна метаболізувати лише близько 20% від сумарної фізіологічної потреби в азоті. Ендогенні резерви насінини та стартові пули легкодоступного екзогенного азоту вичерпуються протягом перших тижнів.
- Репродуктивний етап: вимагає безперервного та масованого надходження азотних метаболітів для формування генеративних органів. Оскільки запаси

мінерального азоту в ґрунтовому розчині швидко виснажуються, критичної ваги набуває пролонгована діяльність бульбочкового апарату, ефективність якого жорстко лімітується едафічними умовами.

Наростання вегетативної та репродуктивної маси забезпечується інтеграцією фотосинтетичної активності, транспіраційного потоку та функціонування симбіотичного комплексу з ризобіями. За даними T. Ohyama et al. [13], формування потужного габітусу з високим біомасовим індексом (8,96 т/га загальної сухої речовини) супроводжується колосальними метаболічними витратами.

Зокрема, біохімічний синтез 1 кг насіння потребує залучення:

- *Органогенних макроелементів (у процесі асиміляції CO_2 та H_2O):* 1024 г вуглецю, 963 г кисню, 131 г водню.
- *Мінеральних макроелементів (з ґрунтового розчину):* ~93 г азоту, 32 г калію, 23 г кальцію, 10 г магнію, 9 г фосфору та 7 г сірки.
- *Мікроелементів:* Cl, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo (засвоюються у слідових кількостях, проте є незамінними кофакторами більшості ферментативних систем сої).

Накопичення пластичних речовин у насінні має чітку еколого-географічну детермінацію. E. E. Kenedy et al. [22] зазначають, що для направленої модуляції біохімічного профілю насіння необхідне розуміння фізіологічних механізмів азотфіксації в конкретних кліматичних нішах. Якщо фізіологія скоростиглих генотипів в умовах Середнього Заходу США вивчена досить глибоко [28], то едафо-кліматичні градієнти південно-східних регіонів [29] індукують адаптивні зміни, що призводять до підвищеного біосинтезу протеїнів [30]. Це спонукало до поглибленого вивчення корелятивних зв’язків між інтенсивністю фотосинтетичної асиміляції вуглецю, азотфіксацією та накопиченням специфічних біохімічних компонентів у насінні пізньостиглих сортів.

Питання впливу оптимізації мінерального фону на морфогенез сої, яке раніше досліджувалося переважно в умовах теплого клімату, набуває нового

фізіологічного прочитання для помірних широт із залученням сучасних генотипів.

Сірка є фізіологічно незамінним елементом [31], оскільки бере безпосередню участь у синтезі сірковмісних амінокислот та інтенсифікує процеси засвоєння екзогенного азоту, що раніше було підтверджено на інших представниках родини бобових [32].

Дослідження [31] засвідчили, що фізіологічний оптимум ростових процесів сої досягається за умов фракційного надходження екзогенного азоту (наприклад, половина дози на початкових етапах розвитку, решта – у фазі BBCH 73–75). За таких оптимальних ритмів живлення фізіологічний дефіцит сірки може не проявлятися, проте за інших схем її наявність стає критичним тригером для інтенсифікації накопичення біомаси. Саме тому дослідники рекомендують застосовувати пролонговане комплексне живлення цими елементами [31].

Окрім оптимізації доз елементів, сучасна екологічна фізіологія фокусується на біологічному контролі мікробіологічних процесів у ґрунті. Це повною мірою відповідає нормативним вимогам щодо захисту екосистем від нітратного забруднення, імплементованим у національні кодекси екологічно безпечних практик.

Застосування інгібіторів нітрифікації є потужним механізмом регуляції азотного метаболізму. Узагальнення глобального масиву експериментальних даних [33], переконливо доводить здатність цих біологічно активних речовин гальмувати процеси мікробної денітрифікації. Це запобігає вимиванню нітратів, пролонгує доступність азоту для кореневої системи та стимулює накопичення протеїнів у генеративних органах.

У вітчизняному науковому просторі фізіологічна дія стабілізаторів азоту вивчалася переважно на фітоценозах злакових [34] або технічних культур, і значно рідше на бобових. Фізіолого-біохімічні механізми реакції рослин сої на екзогенну оптимізацію азотного фону із застосуванням інгібіторів за умов

помірного зволоження західних регіонів України залишаються недостатньо розкритими і потребують подальших фундаментальних досліджень [34].

1.2. Симбіотична азотфіксація та її вплив на морфогенез рослин

Фізіологічна потреба сої в азоті для забезпечення інтенсивного морфогенезу та накопичення протеїнів у насінні є надзвичайно високою, що вимагає безперервної асиміляції цього елемента з різноманітних джерел. Експериментальні дані переконливо свідчать [13], що сумарна кількість асимільованого вегетативними органами азоту має тісну позитивну кореляцію з кінцевою структурною продуктивністю рослини. Для біосинтезу однієї тонни насіння сої необхідна асиміляція 70–90 кг азоту, що вчетверо перевищує фізіологічні потреби типових злакових культур. Встановлено чітку лінійну залежність (r = 0,86) між накопиченням азоту в надземній біомасі та формуванням генеративних органів [13]. Масштабний метааналіз, проведений F. Salvagiotti et al. [18] на базі 637 досліджень, підтверджує цю біологічну закономірність: для синтезу кожної додаткової тонни насіння вегетативний апарат повинен акумулювати близько 77 кг азоту, при цьому ефективність конверсії становить 13 кг насіння на кожен кілограм асимільованого надземною частиною елемента.

Просторово-часова динаміка цього процесу має яскраво виражену специфіку. Рослини сої до початку цвітіння здатні метаболізувати лише близько 20% від загальної онтогенетичної потреби в азоті [28]. Це означає, що інтенсивний розвиток асиміляційного апарату та формування елементів продуктивності у поствітінковий період критично залежать від функціональної стійкості систем азотного живлення. Спроби компенсувати цю потребу виключно екзогенним мінеральним азотом часто виявляються фізіологічно неефективними. Так, польові дослідження [30] показали, що внесення високих доз нітратів нестабільно впливає на габітус та біохімічні компоненти насіння, не змінюючи суттєво концентрацію протеїну чи ліпідів. Дослідження S. Mourtzinis et al. [35], довело, що 68% мінливості продуктив-

ності зумовлено едафо-кліматичними факторами, тоді як на пряму дію добрив припадає менше 1%. Навіть за умов складних схем пролонгованого внесення азоту реакція рослин залишається фізіологічно обмеженою, що спонукає до пошуку біологічних оптимізаторів у різних екологічних нішах [35].

Центральним механізмом такої біологічної оптимізації є симбіотична фіксація атмосферного азоту, що забезпечується унікальним мікробіологічним комплексом. Біохімічна суть процесу полягає у розриві міцного ковалентного зв'язку молекули N_2 та її відновленні до аміаку (NH_3) за участю ферменту нітрогенази. Отриманий аміак негайно транспортується у цитоплазму клітин рослини-господаря, де включається в метаболічний цикл, трансформуючись переважно у глутамінову кислоту та глутамін. Надалі ці первинні амінокислоти перетворюються на уреїди, які є головною транспортною формою азоту в ксилемному ексудаті сої [36]. Цей метаболічний шлях забезпечує клітини будівельним матеріалом для синтезу структурних білків, нуклеотидів (ДНК, РНК, АТФ), вітамінів і фітогормонів, що безпосередньо визначають інтенсивність морфогенезу.

Фізіологічні експерименти Yuki Ono et al. [37] доводять, що рослина здатна одночасно використовувати атмосферний і мінеральний (амонійний чи амідний) азот, балансуючи концентрацію уреїдів та амінокислот у ксилемному соку. Відповідно, успішна ініціація симбіозу вимагає високого титру життєздатних ризобій у ризосфері. Штучна інокуляція насіння сучасними бактеріальними препаратами значно підвищує виживання проростків, стимулює закладання більшої кількості міжвузлів та збільшує вегетативну масу, нівелюючи негативний вплив абіотичних стресів. Генетичні особливості сортів також відіграють значну роль в ефективності взаємодії з конкретними штамами інокулянтів.

Функціонування нітрогеназного комплексу є надзвичайно енергозатратним процесом, що робить його критично залежним від фосфорного живлення. Як зазначають F. Solangi et al. [38], за умов фізіологічного дефіциту фосфору бобові рослини редукують азотфіксацію,

вимушено переходячи на автотрофне поглинання мінеральних іонів з ґрунту. Попри стрімке зростання глобального використання фосфорних добрив, коефіцієнт засвоєння цього елемента рослинами залишається вкрай низьким через його швидку хімічну іммобілізацію.

Ефективним біологічним вирішенням цієї проблеми є використання мікроорганізмів, здатних мобілізувати фосфати. Дія таких біопрепаратів забезпечує потужний старт ростових процесів та підвищує доступність фосфору навіть за низьких температур. P. J. Barra et al. [39] довели, що інокуляція фосфобактеріями діє як фізіологічний еліситор: вона не лише збільшує накопичення фосфору в тканинах та наростання вегетативної маси, але й пом’якшує окисний стрес на клітинному рівні. Використання специфічних штамів здатне посилити біомінералізацію важкодоступних фосфатів, збільшуючи накопичення сухої маси пагонів на 40–134%. Синергетичний ефект досягається також завдяки застосуванню фосформобілізувальних грибів, що стимулює синтез лужної фосфатази в ризосфері, особливо в аридних умовах. Наявність у бактерій кількох корисних властивостей посилює морфогенетичний ефект. Комплексна інокуляція насіння асоціативними азотфіксаторами (наприклад, штамами *Azotobacter*) та фосфорсолюбілізувальними мікроорганізмами має виражений адитивний вплив, істотно активізуючи такі параметри габітусу, як висота рослин, розмір листкової пластинки та закладання генеративних органів.

Для неінвазивного моніторингу інтенсивності метаболічних процесів і загального стану асиміляційного апарату сучасна фізіологія рослин активно застосовує фотооптичні методи діагностики азотного статусу. Використання фотоіндукованої флуоресценції дозволяє *in vivo* фіксувати зміни оптичних характеристик живих листків без порушення їхньої нативності [40]. Встановлено [41], що в умовах дефіциту азоту чи гідротермічного стресу різко знижується стаціонарна енергізованість фотосинтетичних мембран, що відображається на показниках флуорометрії. Відповідно, ці параметри є надійними фізичними маркерами функціональної адаптації рослин до змін

навколишнього середовища.

З огляду на те, що надлишкове надходження мінерального азоту не лише гальмує розвиток симбіотичного апарату, але й знижує загальний імунітет рослин, а також призводить до екологічних ризиків вимивання нітратів, біологічна оптимізація мінерального живлення сої є фундаментальним завданням сучасної фізіології рослин.

1.3. Біологічна дія інгібіторів мікробної активності в ризосфері

Висока мобільність азотних сполук у ґрунтовому розчині є одним із головних фізіологічних викликів для забезпечення оптимального азотного статусу рослин [42]. Оскільки екзогенний азот має найбільшу серед усіх макроелементів схильність до міграції за межі ризосфери, використання біологічно активних інгібіторів стало необхідним інструментом для пролонгації живлення. Цей підхід зумовлений не лише потребою оптимізації морфогенезу рослин, але й необхідністю запобігання критичним змінам в екологічному балансі довкілля.

Мікробіологічні процеси в ґрунті є головною причиною зниження доступності екзогенного азоту для кореневої системи [43]. Найінтенсивніше ці процеси перебігають у вологому ґрунті і включають мікробну денітрифікацію та профільне вимивання. Денітрифікація є ферментативним процесом відновлення нітрат-іонів (NO_3^-) до нітритів (NO_2^-) і далі до газоподібних оксидів азоту або молекулярного азоту (N_2). Водночас вимивання являє собою фізичний процес міграції розчинних нітрат-іонів за межі кореневмісного шару до ґрунтових вод, що спричиняє їх накопичення у поверхневих і підземних водоймах [43].

Біологічний механізм дії інгібіторів нітрифікації полягає у селективному пригніченні ферментативної активності специфічних ґрунтових хемоавтотрофних бактерій, зокрема роду *Nitrosomonas*. Уповільнення першої стадії нітрифікації дозволяє тривалий час зберігати екзогенний азот у

стабільній амонійній формі (NH_4^+), яка легко адсорбується ґрунтово-вбирним комплексом і поступово засвоюється коренями. До найвідоміших сполук цієї групи належать диціандіамід (DCD) та нітрапірин. Екзогенне пригнічення нітрифікації дозволяє оптимізувати терміни надходження азоту, синхронізуючи його з фізіологічними потребами рослини в різні фази онтогенезу [44].

Дослідження Rory F. Degenhardt et al. [45] підтверджують, що швидка втрата мінерального азоту з ризосфери є головним лімітуючим фактором для формування високої біологічної продуктивності. Підтримання азоту у формі NH_4^+ за допомогою специфічних інгібіторів істотно знижує його втрати. Масштабний моніторинг ефективності комерційних препаратів нітрапірину (eNtrench™ та N-Serve) довів їхню здатність стабілізувати ґрунтовий азот. Застосування нітрапірину разом із карбамідом, карбамідо-аміачною сумішшю (КАС) або безводним аміаком восени забезпечувало збереження на 21–63% більше азоту у формі NH_4^+ і на 10–19% більше загального мінерального азоту після відновлення вегетації порівняно з неінгібованим фоном. Весняне внесення нітрапірину пролонгувало збереження NH_4^+ щонайменше на 8 тижнів, підвищуючи загальний пул доступного азоту до 25%. Це свідчить про високу біологічну ефективність нітрапірину як інструменту оптимізації азотного метаболізму та морфогенезу культур [42].

Експериментально доведено, що фізіологічний коефіцієнт засвоєння екзогенного азоту кореневою системою сильно варіює залежно від гранулометричного складу ґрунту: на легких супіщаних ґрунтах він становить до 54%, тоді як на суглинкових досягає 74% [46]. Проте узагальнені розрахунки свідчать про те, що базовий рівень асиміляції екзогенного азоту рослинами традиційно залишається низьким і коливається в межах 42–47%. Значна частина елемента не вмикається в біологічний кругообіг, а втрачається внаслідок міграції NO_3^- та емісії газоподібних сполук – закису азоту (N_2O) та аміаку (NH_3) [47]. Низький рівень фізіологічної асиміляції азоту спричиняє серйозні екологічні наслідки, стимулюючи глобальні зміни клімату,

евтрофікацію водних екосистем, трансформацію мікробіоценозів та хімічне забруднення атмосфери і ґрунтового покриву [48; 49].

Емісія закису азоту (N_2O) з ризосфери є результатом комплексної взаємодії мікробної ензимної нітрифікації, денітрифікації та абіотичної хемоденітрифікації. Інтенсивність біологічного продукування N_2O безпосередньо корелює з концентрацією екзогенних амонійних та нітратних іонів у ґрунтовому розчині [50]. Глобальні розрахунки міграції закису азоту в екосистемах були здійснені P.M. Groffman et al. [51], а детальний аналіз емісії з оброблюваних ґрунтів помірних широт навели C. Roelandt et al. [52]. Дослідники підтвердили, що інтенсивність газових втрат азоту визначається сукупністю факторів: рівнем трофності ґрунту, гідротермічним режимом, хімічною формою екзогенного азоту та фізіологічною активністю рослинного покриву як основного асимілятора.

З фізіологічної точки зору, дисбаланс між інтенсивністю внесення азоту та здатністю рослин його асимілювати продовжує зростати: попри дворазове збільшення обсягів біологічної асиміляції елемента за останні десятиліття, екзогенне навантаження на агроекосистеми зросло втричі [53]. Балансові розрахунки свідчать, що первинні втрати у формі леткого NH_3 досягають 35–40%, подальша емісія N_2O становить близько 10%, а профільна міграція NO_3^- на перезволожених ґрунтах відбирає ще 15–25% початкового пулу. З огляду на це, екзогенна модуляція мікробної активності за допомогою інгібіторів нітрифікації є не просто доцільною, а біологічно необхідною стратегією пролонгації азотного живлення.

Сучасний арсенал інгібіторів нітрифікації представлений різноманітними сполуками, серед яких найбільшої уваги науковців набули три комерційні субстанції [54]. Історично першим успішним інгібітором став нітрапірин, впроваджений у практику в 1974 році. Зважаючи на його високу летючість і здатність до швидкого звітрювання, ця сполука вимагає специфічних технологій інтеграції в ґрунтове середовище у вигляді стабілізованих робочих розчинів.

За своєю хімічною природою нітрапірин (2-хлор-6-(трихлорметил)-піридин) є бактерицидним агентом вузького спектра дії. Його біохімічний механізм полягає в блокуванні синтезу ключових ферментів нітрифікації – аміакомонооксигенази та нітритоксидоредуктази. Блокуючи ферментативну активність таких мікроорганізмів, як *Nitrosomonas, Nitrospira* та специфічних архей, нітрапірин ефективно призупиняє гідроліз карбаміду та подальше окиснення амонію. Фізіологічно значущий період гальмування мікробної активності становить 8–10 тижнів. При цьому нітрапірин здатний метаболізуватися як у ґрунтовому мікробіомі, так і в тканинах рослин [55].

Уповільнюючи ензиматичну трансформацію NH_4^+ на NO_2^-, нітрапірин забезпечує пролонговане збереження екзогенного азоту в ризосфері в легкодоступній для поглинання коренями формі. Екзогенний контроль мікробіологічних процесів ефективно запобігає як фізичній втраті азоту, так і його біологічній трансформації у газоподібні сполуки (N_2 та N_2O) [34].

Багаторічний світовий досвід використання нітрапірину дозволив всебічно дослідити його вплив на фізіологію культур та екологію ґрунту. Тривалі стаціонарні експерименти [56] підтверджують короткостроковий характер його впливу на чисельність та транскрипційну активність мікроорганізмів, що здійснюють процеси окиснення амоніаку та нітритів. Молекула нітрапірину не накопичується в трофічних ланцюгах і зазнає швидкої деградації в природному середовищі. Первинним етапом його розпаду є гідроліз трихлорметилової групи з утворенням 6-хлорпіколінової кислоти, яка ідентифікується як єдиний кінцевий продукт його біохімічного метаболізму в рослинних тканинах.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ, УМОВИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика об'єкту досліджень (селекційно-біологічні особливості сорту сої)

У якості основного біологічного об'єкта для вивчення впливу екзогенної регуляції мінерального живлення на процеси морфогенезу та симбіозу було обрано високопродуктивний сорт сої ЕС Ментор (*Glycine max* (L.) Merr.). Цей генотип, внесений до Державного реєстру сортів рослин України у 2013 році, вирізняється високою екологічною пластичністю та є чудовою модельною системою для фізіолого-біохімічних досліджень.

За своїми морфологічними характеристиками сорт ЕС Ментор належить до рослин із напівдетермінантним (напівобмеженим) типом росту. Така фізіологічна особливість дозволяє рослині підтримувати оптимальний баланс між наростанням вегетативної маси та формуванням генеративних органів, не виснажуючи пластичні ресурси на надмірний ріст стебла після початку цвітіння. Габітус рослини характеризується інтенсивним галуженням, що сприяє формуванню потужного асиміляційного апарату. Висота головного стебла в оптимальних умовах досягає 69–77 см. Важливим морфометричним показником є висота закладання першого генеративного вузла (нижнього бобу), яка становить 12,2–16,5 см. Специфічною генетичною архітектонікою цього сорту є просторовий розподіл генеративних органів: близько 70–80% бобів формуються у середньому та верхньому ярусах. З точки зору фізіології фотосинтезу, таке розміщення є максимально вигідним, оскільки ці яруси отримують найбільшу кількість фотосинтетично активної радіації, що забезпечує інтенсивний відтік асимілятів безпосередньо до насіння, яке наливається.

Фенологічний розвиток сорту ЕС Ментор адаптований до умов зони помірного зволоження і детермінується потребою в оптимальній сумі активних температур на рівні 2600°С. За тривалістю онтогенезу він класифікується як середньостиглий. Тривалість критично важливої для

формування симбіотичного апарату фази «сходи – цвітіння» становить близько 50 діб. Загальний період активної вегетації, залежно від гідротермічних умов конкретного року, коливається в межах 105–135 діб. Висока енергія початкового росту (оцінюється у 8 балів із 9 можливих) забезпечує швидке формування листкової поверхні та ранню ініціацію бульбочкоутворення.

Біохімічний профіль насіння сорту ЕС Ментор характеризується високим генетичним потенціалом до накопичення пластичних речовин, що робить його ідеальним об’єктом для вивчення мінерального живлення. За сприятливих умов фізіологічного функціонування рослина здатна синтезувати в насінні до 42,8% сирого протеїну та близько 20,5% ліпідного комплексу (жиру). Насіння має жовте забарвлення насіннєвої оболонки та рубчика, вирізняється значними розмірами та високою масою: абсолютна маса (маса 1000 насінин) сягає 161–200 г, що свідчить про високу ємність "депо" для накопичення метаболітів.

Важливою біологічною перевагою сорту є його потужний фізіологічний імунітет та висока резистентність до абіотичних стресів. Рослини демонструють виражену посухостійкість, стійкість до механічного вилягання (9 балів) та розтріскування бобів (8 балів), що запобігає втратам біологічної маси на фінальних етапах онтогенезу. Крім того, генотип володіє високою стійкістю до ураження комплексом фітопатогенів: імунітет до склеротиніозу та вірусних інфекцій оцінюється у 8 балів, до бактеріозів – у 7 балів, а толерантність до пероноспорозу становить 6 балів. Таке поєднання високої біологічної продуктивності, адаптивності та здатності до інтенсивного біосинтезу протеїнів робить сорт ЕС Ментор оптимальним тест-об’єктом для оцінки впливу різних форм азоту та мікробіологічних препаратів.

2.2. Абіотичні умови проведення досліджень

Формування біологічної продуктивності та реалізація фізіологічного потенціалу сої безпосередньо залежать від комплексу абіотичних факторів

навколишнього середовища, серед яких ключове значення мають едафічні (ґрунтові) умови та гідротермічний режим у період активної вегетації.

Експериментальні дослідження проводилися на дерновому глибокому глейовому піщанисто-легкосуглинковому ґрунті. Цей тип ґрунту сформувався на пониженому елементі рельєфу надзаплавної тераси на водно-льодовикових відкладах в умовах періодичного поверхневого зволоження [57]. За міжнародною класифікацією WRB (2022) він ідентифікується як *Gleyic Phaeozems (Loamic, Aric)* [57].

Морфологічна будова профілю характеризується наявністю окультуреного орного гумусового горизонту (до 25 см), який має темно-сіре забарвлення з іржавим відтінком та пронизаний корінням рослин. Під ним залягає перехідний горизонт брудно-сірого кольору зі специфічним сизуватим оглеєнням, зумовленим анаеробними мікробіологічними процесами. За гранулометричним складом ґрунт є легкосуглинковим.

З агрохімічної точки зору, як біологічне середовище для вирощування бобових, ґрунт характеризується слабокислою реакцією ґрунтового розчину (pHсол. 5,6-5,8), що є цілком сприятливим для розвитку симбіотичного апарату сої. Гідролітична кислотність перебуває на низькому рівні (1,0-2,8 мг-екв на 100 г ґрунту). Ґрунт має середній рівень забезпеченості гумусом [58] (3-4%) та достатні запаси легкогідролізних сполук мінерального азоту (121–131 мг/кг), рухомого фосфору (124–135 мг/кг) та обмінного калію (104–109 мг/кг) за методом Чірикова [59]. Загалом морфо- та фізико-хімічна діагностика свідчить про високу потенційну родючість цього ґрунту та його придатність для реалізації фізіологічного потенціалу сої.

Кліматичні умови є потужним модифікуючим фактором, що лімітує або стимулює метаболічні процеси в рослинах. Абіотичні стреси (посуха, перезволоження, температурні екстремуми) здатні істотно пригнічувати морфогенез.

Клімат зони проведення досліджень характеризується як помірно континентальний. Згідно з багаторічними даними, сума активних температур

(t > 10°C) становить 2595°C, а безморозний період триває близько 156 діб, що повністю задовольняє біологічні потреби сої. Традиційно середньорічна норма опадів становить 748 мм, однак, як зазначають дослідники [60], останніми роками спостерігається тенденція до аридизації: відчутне підвищення середньорічної температури та перерозподіл опадів. Це призводить до розширення ареалу вирощування теплолюбних культур, включно із соєю.

Період проведення польових досліджень (2024–2025 рр.) характеризувався контрастними гідротермічними умовами, що дозволило об’єктивно оцінити реакцію рослин на різні фактори середовища.

Метеорологічні умови 2024 року відзначалися інтенсивним тепловим режимом та загалом збалансованим зволоженням у критичні фази розвитку сої. Вегетаційна динаміка температур була підвищеною, зокрема, серпень виділявся середньомісячною температурою на рівні 20,9°C. Попри певну посушливість травня, у червні випала достатня кількість опадів, що забезпечило оптимальні умови для ініціації бульбочкоутворення та інтенсивного наростання вегетативної маси. Липень 2024 року був вологим із суттєвим перевищенням середньобагаторічної норми (на 19 мм). З фізіологічної точки зору, саме поєднання достатньої вологості у травні, червні та липні зі сприятливим тепловим режимом зробило 2024 рік найбільш сприятливим для формування високої біологічної продуктивності сої та реалізації її генетичного потенціалу.

Метеорологічні умови 2025 року виявилися більш стресовими для рослинного організму. Цей рік характеризувався аномально високими температурами весняно-літнього періоду, що супроводжувалося значним дефіцитом опадів порівняно з попереднім сезоном. Зменшення кількості атмосферних опадів, особливо під час вегетації, у поєднанні з високим температурним фоном створювало передумови для водного стресу. Такі умови вимагали від рослин сої максимальної мобілізації адаптивних механізмів для підтримання тургору та продовження фотосинтетичної активності, що відповідним чином позначилося на показниках їхнього росту, розвитку та

формування біохімічних компонентів насіння.

Таким чином, контрастність гідротермічного режиму 2024 та 2025 років дозволила провести комплексну фізіологічну оцінку впливу абіотичних факторів та елементів живлення на продукційний процес сої.

2.3. Методика проведення біометричних, фенологічних та біохімічних аналізів

Для реалізації поставленої мети та з'ясування фізіологічних механізмів формування біологічної продуктивності сої було розроблено комплексну програму польових та лабораторних досліджень. Польові експерименти проводилися протягом 2024–2025 років на дослідних ділянках, розташованих у зоні помірного зволоження, за загальноприйнятою в біологічних та екологічних дослідженнях базовою методикою [61]. Експериментальна схема передбачала вивчення реакції рослин на екзогенну регуляцію азотного живлення, що включала застосування інгібітора мікробної нітрифікації (нітрапірину) та біологічних препаратів для передпосівної інокуляції насіння.

Для стимуляції симбіотичного апарату та активізації ґрунтової мікробіоти насіння сої обробляли комплексом мікроорганізмів: штамами азотфіксувальних бактерій *Bradyrhizobium japonicum* (препарат ХайКот Супер Соя) та фосформобілізувальних бактерій *Bacillus amyloliquefaciens* (препарат Райс Пі). З метою пригнічення ґрунтової нітрифікації та пролонгації доступності амонійної форми азоту в ризосфері використовували синтетичний інгібітор нітрапірин, який вносили у вигляді водного розчину під передпосівну підготовку ґрунту.

Спостереження за проходженням фенологічних фаз онтогенезу здійснювали шляхом регулярного моніторингу дослідних ділянок. Фізіологічну фазу розвитку фіксували як початкову за умови вступу в неї не менше 10% рослин, а фазу масового проходження – при досягненні 75% [62]. Загальний фізіологічний стан асиміляційного апарату та габітусу рослин протягом вегетаційних періодів 2024–2025 років візуально оцінювали за

стандартизованою 5-бальною шкалою [61].

Для вивчення морфометричних параметрів та елементів структури біологічної продуктивності у фазі повного достигання бобів проводили відбір пробних рослинних зразків з ізольованих облікових площадок. У відібраних рослинах камерально визначали ключові біоморфологічні показники: загальну довжину головного стебла, висоту прикріплення першого генеративного вузла (нижнього боба), інтенсивність гілкування, загальну кількість сформованих бобів та насінин на одній рослині. Також визначали масу насіння з однієї рослини та абсолютну масу (масу 1000 насінин), що характеризує ефективність відтоку пластичних речовин до генеративних органів.

Біохімічний етап досліджень передбачав визначення базових показників якості насіння залежно від умов мінерального живлення та симбіозу. Для цього відібрані зразки насіння висушували за температури 50–60°C до повітряно-сухого стану та гомогенізували на лабораторному млині до стану борошна. Визначення вмісту сирого протеїну та вологи здійснювали неінвазивним методом інфрачервоної спектроскопії (NIRS) на аналізаторі Спектран-119М, що базується на аналізі дифузного відбиття у ближній ІЧ-ділянці спектра. Вміст сирого жиру (ліпідного комплексу) та сирої клітковини визначали за стандартизованими лабораторними протоколами згідно з класичними методиками у сучасних модифікаціях [63]. Вміст безазотистих екстрактивних речовин розраховували математично як різницю між сумою всіх ідентифікованих компонентів та часткою вологи у сухій масі.

Для підтвердження достовірності отриманих біологічних закономірностей результати досліджень підлягали статистичній обробці. Використовували методи дисперсійного (ANOVA) та кореляційного аналізу (за критерієм Пірсона) з використанням прикладних пакетів статистичних програм, адаптованих для обробки масивів біологічних даних [34].

РОЗДІЛ 3. БІОМОРФОЛОГІЧНІ ТА БІОХІМІЧНІ ПАРАМЕТРИ РОСЛИН СОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД УМОВ ЖИВЛЕННЯ

3.1. Динаміка проходження фенологічних фаз розвитку рослин

Сучасні генотипи сої вирізняються високою екологічною пластичністю, проте їхній фізіологічний відгук на зміну абіотичних факторів довкілля, зокрема гідротермічного режиму, є глибоко специфічним. Комплексна дія метеорологічних умов та рівнів екзогенного живлення безпосередньо детермінує загальну тривалість онтогенезу та хронологію проходження окремих фенологічних фаз. Для глибокого розуміння біологічних механізмів формування продуктивності за різних умов мінерального забезпечення та екзогенної регуляції мікробіологічної активності ризосфери обов’язковою умовою є ретельний моніторинг фенологічної динаміки [64].

В умовах помірного зволоження на дослідному дерновому глейовому ґрунті рівень оптимізації мінерального фону здійснював виражений фізіологічний вплив на дати ініціації кожної фази та тривалість міжфазних періодів росту. Окрім трофічного фактора, на тривалість вегетації істотно впливала флуктуація гідротермічних умов протягом двох років досліджень (2024–2025 рр.).

Згідно з даними, наведеними в табл. 3.1, тривалість початкових етапів онтогенезу (міжфазні періоди «сівба – повні сходи» та «повні сходи – бутонізація») за варіантами досліду варіювала незначно. Тим не менш, фізіологічні спостереження дозволили виявити чітку тенденцію до прискорення ініціації вегетативних процесів за умови комплексної інокуляції насіння біопрепаратами (азотфіксувальними та фосформобілізувальними бактеріями) на фоні базового мінерального живлення з додаванням амонійної форми екзогенного азоту.

Таблиця 3.1.

Вплив систем удобрення сої, нітрапірину та інокуляції на тривалість вегетаційних періодів

Варіант системи удобрення	Норма внесення азоту, кг/га	Тривалість міжфазних періодів, діб								Тривалість вегетації, діб	
		Сівба – повні сходи		Сходи – бутонізація		Бутонізація – квітування		Квітування – стиглість			
		2024 р.	2025 р.	2024 р.	2025 р.	2024 р.	2025 р.	2024 р.	2025 р.	2024 р.	2025 р.
		Дата сівби						Дата збирання			
		24.04	25.04					05.10	01.10		
Контроль – без удобрення	0	15	12	30	35	11	10	67	64	108	109
Фон – Р60К60 (*п.ор.)	0	13	11	28	33	9	9	64	63	101	105
Фон + N30 – *Nsa (*п.с.)	30	12	11	33	35	10	11	69	70	112	116
Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)	30	12	12	31	34	10	12	67	67	108	113
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	13	14	32	33	16	15	70	71	118	119
Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	12	13	30	30	15	14	69	68	114	112
Фон + N30 – *Naa	30	10	11	29	30	14	12	67	67	110	109
Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)	30	11	10	31	30	15	16	68	69	114	115
Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	60	11	10	32	31	16	15	67	66	115	112
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + ХайКот Супер Соя	30	9	9	29	29	15	14	70	68	114	111
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + Райс Пі	30	9	10	30	29	14	13	68	68	112	110
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + ХайКот Супер Соя + Райс Пі	30	9	9	28	30	16	16	70	69	114	115

Фаза переходу від бутонізації до квітування характеризувалася максимальною тривалістю у варіантах із синергетичним застосуванням мікробіологічних інокулянтів. Аналогічна пролонгація цього періоду фіксувалася і за умов пролонгованого екзогенного живлення (стартове внесення амонійної форми азоту з наступним підживленням у фазі бутонізації). Застосування інгібітора мікробної активності (нітрапірину) на такому фоні призводило до незначного скорочення (на одну-дві доби) цього перехідного етапу. Натомість, за умов використання нітратно-амонійної форми азоту, дія нітрапірину навпаки спричиняла подовження тривалості даної фази. З фізіологічної точки зору, це вказує на часткове нівелювання антагонізму між високою концентрацією нітратів у ризосфері та функціональною активністю симбіотичного (азотфіксувального) апарату сої.

Репродуктивний період «квітування – повна стиглість» досягав максимальної тривалості (69–71 доба) за умов оптимізованого мінерального фону з додатковим внесенням амонійного азоту у фазі бутонізації. Водночас екзогенне інгібування нітрифікації скорочувало цей етап на 2–3 доби. Пролонгація даного міжфазного періоду також чітко простежувалася у варіантах із застосуванням мікроорганізмів-інокулянтів на фоні зниженої дози мінерального азоту.

Загальна тривалість онтогенезу культури істотно залежала від гідротермічних умов конкретного року, які модулювали ефективність дії елементів живлення, нітрапірину та мікросимбіонтів. Підвищене екзогенне навантаження азотом, а також стимуляція мікробіоценозу ризосфери за допомогою інокулянтів, фізіологічно подовжували вегетацію рослин сої як у сприятливому 2024, так і в посушливому 2025 роках. Дія інгібітора нітрифікації мала специфічний характер залежно від хімічної форми застосованого мінерального азоту (табл. 3.2). У комбінації з амонійною формою він прискорював фізіологічне старіння та завершення вегетації сої на 6–7 діб, тоді як у поєднанні з нітратно-амонійною формою – пролонгував життєвий цикл рослин на 4–5 діб.

Таблиця 3.2

Дати настання фенологічних фаз росту й розвитку сої за внесення азотних добрив у формі сульфату амонію N_{30} на фосфорно-калійному фоні $P_{60}K_{60}$ упродовж років дослідження

Фаза вегетації (сівба – збирання)	Дати настання фаз вегетації	
	2024 р.	2025 р.
Сівба	24.04	25.04
Сходи ВВСН 10-11	13.05	10.05
Перший трійчастий листочок ВВСН 12	31.05	30.05
Три трійчастих листочки ВВСН 14	17.06	10.06
Початок квітування ВВСН 61	25.06	22.06
Формування бобів ВВСН 75-77	09.07	07.07
Побуріння бобів ВВСН 85	18.09	24.09
Достигання бобів ВВСН 87-92	29.09	15.09
Збирання	05.10	01.10

Подібні біологічні закономірності відзначає О. Г. Міленко [65], який наголошує на тому, що гідротермічні стреси (особливо посушливі умови) індукують стрімке скорочення тривалості як окремих фенологічних фаз, так і всього вегетаційного періоду рослин сої. Результати проведених досліджень переконливо свідчать, що цілеспрямоване конструювання азотного режиму – через застосування інгібіторів мікробної активності у поєднанні з певними формами мінерального азоту та мікробіологічними інокулянтами – дозволяє фізіологічно модулювати хронологію онтогенезу сої, підвищуючи її адаптивність.

3.2. Морфометричні показники та стан асиміляційного апарату

Специфіка росту й розвитку сої передбачає тісну фізіологічну кореляцію між кінцевою біологічною продуктивністю та розвитком вегетативної сфери,

зокрема кількістю пагонів та загальним габітусом рослини. У середньостиглих генотипів із напівдетермінантним типом росту, до яких належить досліджуваний сорт Ментор, ця закономірність виражена особливо сильно. Це зумовлено послідовною та фізіологічно тривалою диференціацією генеративних органів, що робить процеси морфогенезу надзвичайно чутливими до трофічного забезпечення та гідротермічних чинників.

Вимірювання лінійних розмірів головного стебла показало, що за умов дефіциту екзогенного живлення (на неудобреному контролі) рослини формували найменший вегетативний апарат – їхня висота в середньому становила 73 см (рис. 3.1).

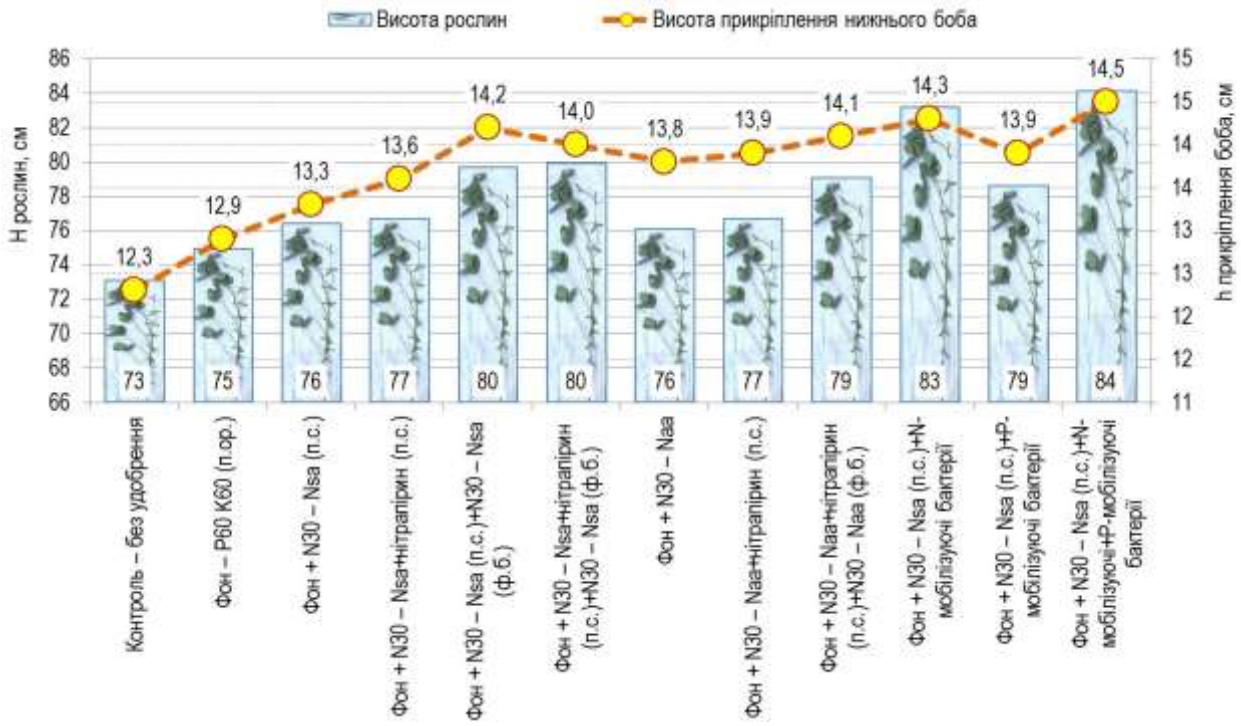


Рис. 3.1. Висота рослин та висота прикріплення нижнього боба сої залежно від умов досліду, 2024 р.

На базовому фосфорно-калійному фоні, де соя забезпечувала свої потреби виключно за рахунок симбіотичної азотфіксації, цей показник зростав до 75 см. Оптимізація мінерального живлення стартовою дозою екзогенного азоту (N_{30}) у формі сульфату амонію стимулювала інтенсивніше поділ та

видовження клітин, що додавало рослинам 3–4 см висоти порівняно з контролем. Аналогічний вплив на ростові процеси мала й амонійна селітра. При цьому застосування інгібітора мікробної активності (нітрапірину) на цих фонах викликало додаткову, хоча й помірну, стимуляцію росту.

Збільшення екзогенного навантаження шляхом подвоєння норми азоту (додаткове підживлення у фазі бутонізації) посилювало ростові процеси, додаючи ще 3–4 см до загальної висоти. Фізіологічно цікавим є той факт, що на фоні амонійної селітри дія нітрапірину практично не позначалася на габітусі, тоді як у комплексі із сульфатом амонію інгібітор проявляв чіткий позитивний вплив. На думку окремих дослідників [66], механізм цієї взаємодії полягає в тому, що стабілізація амонійної форми азоту в ризосфері дає змогу уникнути фізіологічної токсичності, характерної для надлишку нітратів. Рослина адаптується до пролонгованого амонійного живлення, яке триває на 10–15 діб довше завдяки температурно-залежному блокуванню ферментних систем бактерій, що забезпечує рівномірне постачання будівельного матеріалу для тканин.

Максимальна реалізація морфогенетичного потенціалу була зафіксована за умов поєднання мінімального мінерального фону (N_{30} у формі сульфату амонію) з мікробіологічною інокуляцією. Обробка насіння штамами азотмобілізувальних бактерій стимулювала видовження стебла до 83 см, а комплексне застосування азотфіксувальних та фосформобілізувальних мікроорганізмів забезпечило формування найвищих у досліді рослин – 84 см. Цей феномен підтверджується результатами досліджень І. В. Федорука та ін. [67], які довели, що використання високоефективних інокулянтів (зокрема ХайКот Супер) здатне індукувати потужний ростовий ефект, збільшуючи висоту сої на 16,2 см порівняно з неінокульованими рослинами.

Важливим біоморфологічним показником, що характеризує міцність базальної частини стебла та інтенсивність раннього морфогенезу, є висота закладання першого (нижнього) генеративного вузла. У наших дослідженнях найвище прикріплення нижнього боба (14,5 см від поверхні ґрунту) спостерігалося саме за синергетичної дії сульфату амонію (N_{30}) та комплексної

біоінокуляції бактеріями-мобілізаторами. Застосування лише азотфіксувального інокулянта або збільшення дози сульфату амонію призводило до незначного зниження цього показника (до 14,2–14,3 см). Фізіологічна дія нітрапірину залежала від рівня азотного живлення: на високих фонах добрив він гальмував видовження нижніх міжвузлів (знижуючи висоту прикріплення боба), тоді як за стартових доз (як сульфату амонію, так і амонійної селітри) інгібітор стимулював вище закладання генеративних органів.

Окрім лінійних розмірів, критичне значення для акумуляції пластичних речовин має загальний стан асиміляційного апарату, який візуально оцінювався протягом вегетації за комплексною бальною шкалою (максимум 20 балів за чотири ключові фази онтогенезу). У середньому за 2024–2025 роки досліджень варіанти з різними системами живлення демонстрували значну варіабельність фізіологічного стану – від 13 до 18,5 бала (табл. 3.3). Рослини на неудобрених контрольних ділянках характеризувалися найслабшим розвитком габітусу (11,5 бала сумарно): на етапі 3–5 трійчастих листків (ВВСН 13–15) їхній стан оцінювався лише у 2,0 бала через фізіологічне голодування, і лише до фази формування бобів асиміляційний апарат частково відновлювався (3,5 бала) за рахунок пізньої активації аборигенних ризобій.

Оптимізація трофічних умов кардинально змінювала архітектоніку посіву. Стабільно висока оцінка асиміляційного апарату (4,0–5,0 бала з середнім значенням 4,5) була зафіксована за інтенсивної системи живлення: базовий фон $P_{60}K_{60}$ + стартовий N_{30} (сульфат амонію) + нітрапірин з подальшим підживленням N_{30}. Однак найвищих показників розвитку вегетативної маси вдалося досягти завдяки біологічній стимуляції: фон $P_{60}K_{60}$ + N_{30} (сульфат амонію) у поєднанні з інокулянтами ХайКот Супер Соя та Райс Пі. Рослини на цьому варіанті демонстрували безперервне покращення фізіологічного стану від фази 3–5 трійчастих листків (4,5 бала) до фази масового формування бобів (ВВСН 71–77 – 5,0 бала), що забезпечило найвищий середній бал за вегетацію – 4,6.

Таблиця 3.3

Візуальна оцінка загального стану посівів сої у середньому за роки досліджень

Варіант досліду	Фази розвитку				Сума балів (макс. 20 б.)	Середній бал за варіантом
	З трійчастих листочки ВВСН 14	Початок квітування ВВСН 61	Формування бобів ВВСН 71-77	Побуріння бобів ВВСН 85		
Контроль – без удобрення	2,0	3,0	3,5	3,0	11,5	2,9
Фон – $P_{60}K_{60}$ (*п.ор.)	2,5	3,5	3,5	3,5	13,0	3,3
Фон + N_{30} – *Nsa (*п.с.)	3,0	3,5	4,0	3,5	14,0	3,5
Фон + N_{30} – Nsa+нітрапірин (п.с.)	3,5	4,0	4,0	3,5	15,0	3,8
Фон + N_{30} – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	3,5	4,0	4,5	4,0	16,0	4,0
Фон + N_{30} – Nsa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	4,0	4,5	4,5	5,0	18,0	4,5
Фон + N_{30} – *Naa	3,0	4,0	4,0	3,5	14,5	3,6
Фон + N_{30} – Naa+нітрапірин (п.с.)	3,5	4,0	4,5	4,0	16,0	4,0
Фон + N_{30} – Naa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	3,5	4,5	4,5	4,0	16,5	4,1
Фон + N_{30} – Nsa (п.с.) + ХайКот Супер Соя	4,0	4,5	5,0	4,5	18,0	4,5
Фон + N_{30} – Nsa (п.с.) + Райс Пі	3,5	4,0	4,5	4,5	16,5	4,1
Фон + N_{30} – Nsa (п.с.) + ХайКот Супер Соя + Райс Пі	4,5	4,5	5,0	4,5	18,5	4,6
Середній бал у фазі	3,4	4,0	4,3	4,0	–	–

Загалом, динаміка розвитку асиміляційного апарату сої чітко відображала її фізіологічні потреби: найменша площа листкової поверхні та слабкий габітус фіксувалися на початкових етапах розвитку (ВВСН 13–15, середній бал 3,4), тоді як пік морфологічного розвитку та максимальна фотосинтетична потужність досягалися у фазі формування бобів (ВВСН 71–77, середній бал 4,3). Таким чином, комплексне поєднання стартового сульфату амонію з бактеріальними препаратами створює найсприятливіший фізіологічний фон, за якого рослина формує потужний розгалужений габітус, здатний продукувати максимальну кількість біомаси.

3.3. Розвиток симбіотичного апарату в онтогенезі

Функціонування симбіотичного апарату сої є одним із найскладніших фізіологічних процесів, який детермінує здатність рослини до самостійного забезпечення азотом шляхом біологічної азотфіксації. Інтенсивність формування кореневих бульбочок та тривалість їхньої функціональної активності безпосередньо залежать від трофічних умов у ризосфері.

У проведених дослідженнях встановлено, що забезпечення рослин сої виключно фосфорно-калійним живленням (без екзогенного азоту) стимулювало формування більшої маси активних бульбочок на кореневій системі: приріст становив 0,08 г у фазі бутонізації та 0,05 г під час квітування (рис. 3.2). Внесення стартової дози мінерального азоту (N_{30}) у формі сульфату амонію не інгібувало процес бульбочкоутворення. Більше того, поєднання амонійної форми з інгібітором нітрифікації (нітрапірином, 1,7 л/га) фізіологічно пролонгувало та активізувало розвиток азотфіксувального апарату від фази бутонізації аж до наливу бобів. За таких умов максимальний приріст маси бульбочок у фазі квітування досягав 0,26 г.

Схожа біологічна реакція спостерігалася і за умов додаткового підживлення сої амонійним азотом (N_{30}), де приріст симбіотичної маси у фазі квітування сягав 0,29 г. Натомість застосування амонійної селітри (нітратно-амонійної форми), незалежно від присутності нітрапірину чи збільшення

норми застосування добрива, не сприяло стимуляції бульбочкоутворення, що підтверджує фізіологічну токсичність надлишку нітратів для бульбочкових бактерій.

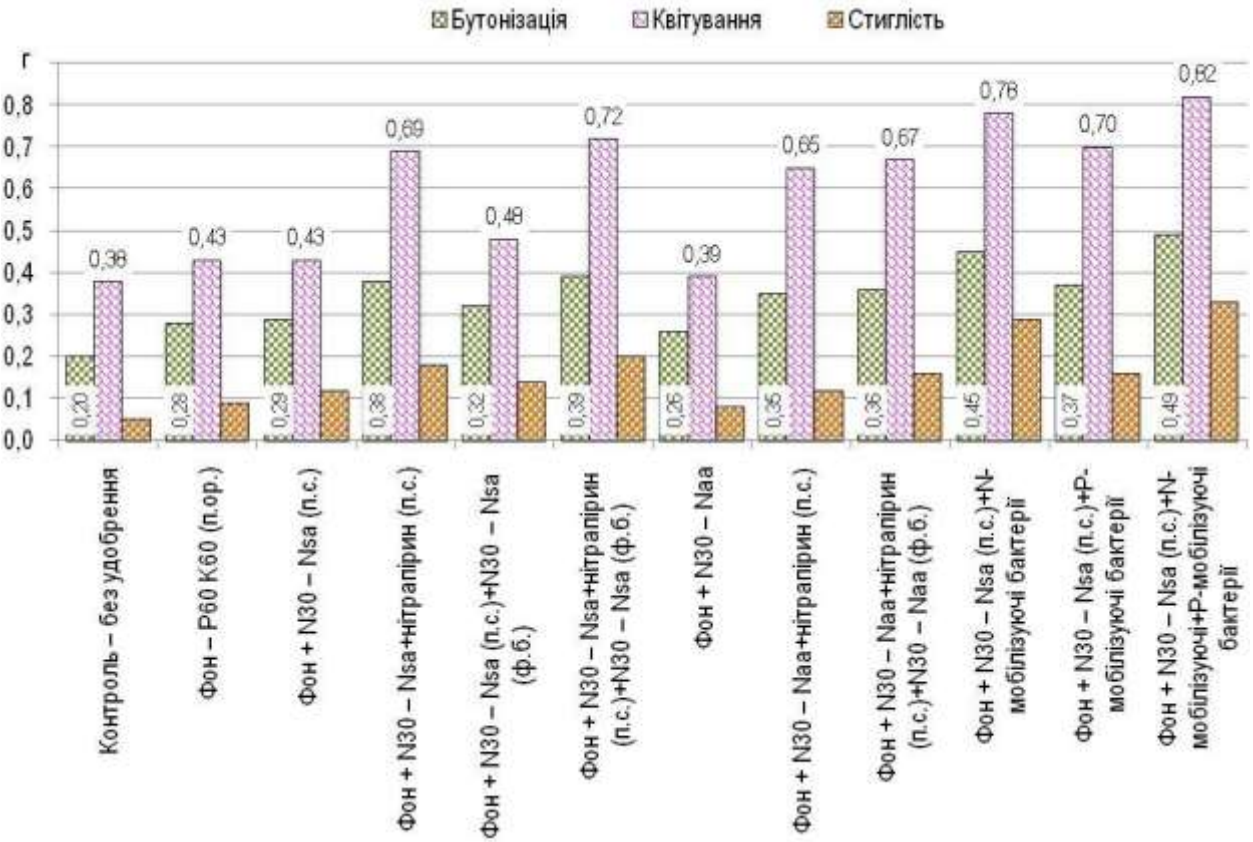


Рис. 3.2. Маса бульбочок на кореневій системі сої за різних систем удобрення, застосування нітрапірину та інокуляції, 2024 р.

Найбільш динамічний розвиток симбіотичного апарату фіксувався у варіантах із цілеспрямованою мікробіологічною інокуляцією насіння. Застосування препарату ХайКот Супер Соя, основу якого становить високовірулентний штам азотфіксувальних бактерій *Bradyrhizobium japonicum*, забезпечило формування бульбочок масою 0,45 г уже у фазі бутонізації, 0,78 г – під час квітування, і збереження активної маси на рівні 0,28 г до фази стиглості. Інокуляція фосформобілізувальними бактеріями *Bacillus amyloliquefaciens* (препарат Райс Пі) самостійно не перевищувала ефективності азотфіксаторів, однак підтримувала нарощування маси

бульбочок на рівні, співмірному із застосуванням високих доз добрив та інгібіторів.

Максимальний синергетичний ефект у формуванні симбіотичного апарату був досягнутий за рахунок поєднаного застосування обох інокулянтів (*Bradyrhizobium japonicum* та *Bacillus amyloliquefaciens*) на базовому мінеральному фоні ($N_{30}P_{60}K_{60}$). За такого біоценотичного моделювання маса бульбочок на одній рослині сягала абсолютного максимуму: 0,49 г у фазі бутонізації та 0,82 г під час квітування. Це свідчить про те, що екзогенний контроль концентрації нітратів (через заміну нітратних форм добрив на амонійні та використання нітрапірину) хоч і є ефективним фізіологічним інструментом, проте не здатен забезпечити такого потужного розвитку симбіозу, як пряма біологічна інокуляція комплексом симбіотичних мікроорганізмів .

Фундаментальні фізіологічні механізми пригнічення симбіозу нітратами були детально вивчені японськими дослідниками. Зокрема, H. Fujikake et al. [68] в умовах контрольованої гідропоніки досліджували кінетику росту окремих бульбочок. В умовах повної відсутності екзогенного азоту діаметр бульбочки збільшувався з 1 до 6 мм протягом двох тижнів. Однак внесення нітратів у живильний розчин миттєво (протягом доби) зупиняло ріст бульбочок через блокування клітинного розтягнення. Цей процес виявився повністю оборотним: після видалення нітратів ріст бульбочок швидко відновлювався. Автори виявили, що інгібування симбіозу нітратами фізіологічно ідентичне до пригнічення, спричиненого штучним затіненням рослин (дефіцитом фотоасимілятів). Додавання 3% сахарози до живильного розчину частково знімало нітратне інгібування, що доводить: високі концентрації NO_3^- блокують надходження вуглеводів до бульбочок, викликаючи їхнє вуглецеве голодування.

Подальші дослідження N. Yamashita et al. [69] підтвердили ці висновки. Вони встановили, що інгібуючий ефект екзогенних азотних сполук зумовлений не прямим токсичним накопиченням азоту в тканинах бульбочки,

а системним порушенням розподілу фотоасимілятів у рослині. Забезпечення сої різними формами азоту специфічно змінювало амінокислотний профіль: нітрати стимулювали накопичення вільних амінокислот (аспарагіну, аспартату, глутаміну) у бульбочках та листках, амоній – у коренях, а сечовина – у стеблах. При цьому тривале живлення нітратами стимулювало активний ріст бічних коренів та листкової маси, що конкурувало із симбіотичним апаратом за пластичні ресурси. Таким чином, баланс між автотрофним азотним живленням і біологічною азотфіксацією жорстко контролюється розподілом вуглеводів у системі «ціла рослина».

3.4. Формування генеративних органів та елементів структури біологічної продуктивності

Перехід рослин сої до репродуктивної фази онтогенезу супроводжується кардинальною перебудовою донорно-акцепторних відносин у рослинному організмі. У цей період генеративні органи стають головними споживачами пластичних речовин. Фізіологічною особливістю сої є формування значно більшої кількості квіток, ніж рослина здатна забезпечити метаболітами для повноцінного розвитку насіння. Як наслідок, в умовах трофічного стресу або дисбалансу мінерального живлення запускається механізм масового опадання зав’язей та молодих бобів. Тому кінцева кількість сформованих генеративних органів є прямим індикатором фізіологічного добробуту рослини та ефективності функціонування її асиміляційного і симбіотичного апаратів.

Результати експериментальних досліджень підтверджують, що архітектоніка генеративної сфери сої жорстко визначається системою зовнішнього живлення. На неудобреному контрольному фоні, де рослина відчувала гострий дефіцит доступних макроелементів для синтезу структурних білків, спостерігався найвищий рівень редукції генеративних органів: до збирання зберігалося в середньому лише 13,2 боба на одну рослину, що є абсолютним мінімумом у даному досліді (рис. 3.3).

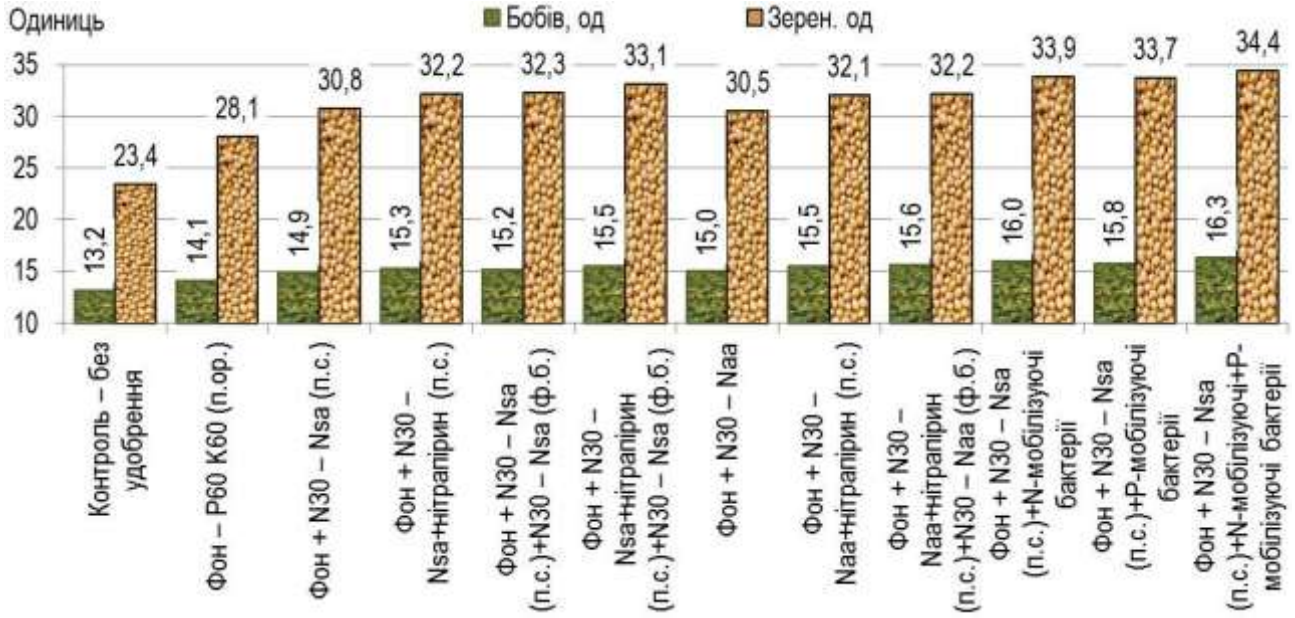


Рис. 3.3. Кількісні показники бобів та зерен на рослинах сої за різних систем удобрення, бобів/рослину, зерен/рослину, 2024 р.

Забезпечення рослин виключно фосфорно-калійним фоном ($P_{60}K_{60}$) дозволило частково пом’якшити фізіологічний стрес і підвищити кількість бобів на 0,9 одиниці порівняно з контролем. Біохімічна роль фосфору на цьому етапі є критичною: він входить до складу макроергічних сполук (АТФ), необхідних для активного транспорту сахарози по флоемі від листків до зав’язей. Крім того, фосфор є основою для синтезу фітину – головної запасної форми цього елемента в насінні. Додавання на цьому фоні стартової дози азоту N30 (незалежно від його хімічної форми – сульфату чи нітрату амонію) істотно змінювало гормональний та трофічний баланс, сприяючи збереженню більшої кількості зав’язей, що відобразилося у збільшенні кількості бобів на 1,7–1,8 одиниці. Застосування інгібітора нітрифікації нітрапірину на цих варіантах здійснювало додатковий позитивний вплив (збільшення на 0,4-0,5 одиниці). З біологічної точки зору це пояснюється тим, що стабілізація азоту в амонійній формі запобігає різким коливанням концентрації нітратів у ризосфері, забезпечуючи рівномірне та пролонговане постачання азотистих метаболітів, необхідних для запобігання синтезу етилену, який є гормоном старіння та опадання, у молодих бобах.

Максимальна реалізація генетичного потенціалу сої щодо формування бобів – 16,0-16,3 шт. на рослину – фіксувалася за комплексного підходу: внесення стартового азоту N_{30} на фоні $P_{60}K_{60}$ у поєднанні з мікробіологічною інокуляцією. Найвищі показники забезпечив препарат ХайКот Супер Соя (з азотфіксувальними бактеріями *B. japonicum*), а також його синергетичне поєднання з препаратом Райс Пі (що містить фосформобілізувальні бактерії *B. amyloliquefaciens*). Окрім покращення трофічного забезпечення, мікроорганізми ризосфери (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*, PGPR) здатні синтезувати екзогенні фітогормони, зокрема, ауксини та цитокініни. Потрапляючи в кореневу систему і транспортуючись до надземної частини, ці речовини зміщують гормональний баланс рослини в бік активного поділу клітин, що різко знижує відсоток абортації генеративних органів.

Наступним критичним етапом репродуктивного морфогенезу є ембріогенез – формування насінин усередині боба – озерненість. Цей процес вимагає колосальних витрат енергії та пластичних речовин для поділу клітин ендосперму та зародка. Максимальна зернопродуктивність однієї рослини – 33,9-34,4 насінини, також була досягнута за умов синергетичної дії фону $N_{30}P_{60}K_{60}$ та обох інокулянтів (*B. japonicum* і *B. amyloliquefaciens*).

Слід окремо відзначити виражену позитивну реакцію процесів ембріогенезу сої на фосфорне живлення. Навіть на чистому фосфорно-калійному фоні ($P_{60}K_{60}$) без внесення мінерального азоту, а також за використання фосформобілізувальних бактерій *B. amyloliquefaciens*, озерненість рослини стрімко зростала: від 23,4 насінини на контролі до 28,1 насінини на фосфорно-калійному фоні. Фосфор відіграє роль ключового тригера генеративних функцій у бобових. Він не лише забезпечує утилізацію АТФ, але й інтенсифікує процеси транскрипції та трансляції (оскільки є структурним компонентом РНК і ДНК), які відбуваються з надзвичайною швидкістю під час формування зародка насінини.

Завершальним етапом формування біологічної продуктивності є налив насіння, який фізично відображається у показнику маси 1000 зерен. Цей

параметр характеризує інтенсивність біосинтезу резервних білків та ліпідів в сім'ядолях. Результати досліджень виявили глибоку фізіологічну закономірність: мінімальна маса 1000 зерен формувалася за умови внесення амонійної селітри на фоні $P_{60}K_{60}$ (рис. 4.7). Це переконливо доводить фізіологічну витратність нітратного живлення. Біохімічний механізм цього явища полягає в тому, що для включення нітрат-іона у метаболізм рослина повинна спочатку відновити його до нітриту (за участю ферменту нітратредуктази), а потім до амонію (за участю нітритредуктази). Ці реакції потребують величезної кількості відновлювальних еквівалентів (NADH та відновленого фередоксину), що призводить до конкуренції за енергію між процесами засвоєння нітратів та процесами біосинтезу ліпідів і протеїнів у насінні. Як наслідок, насіння формується дрібнішим.

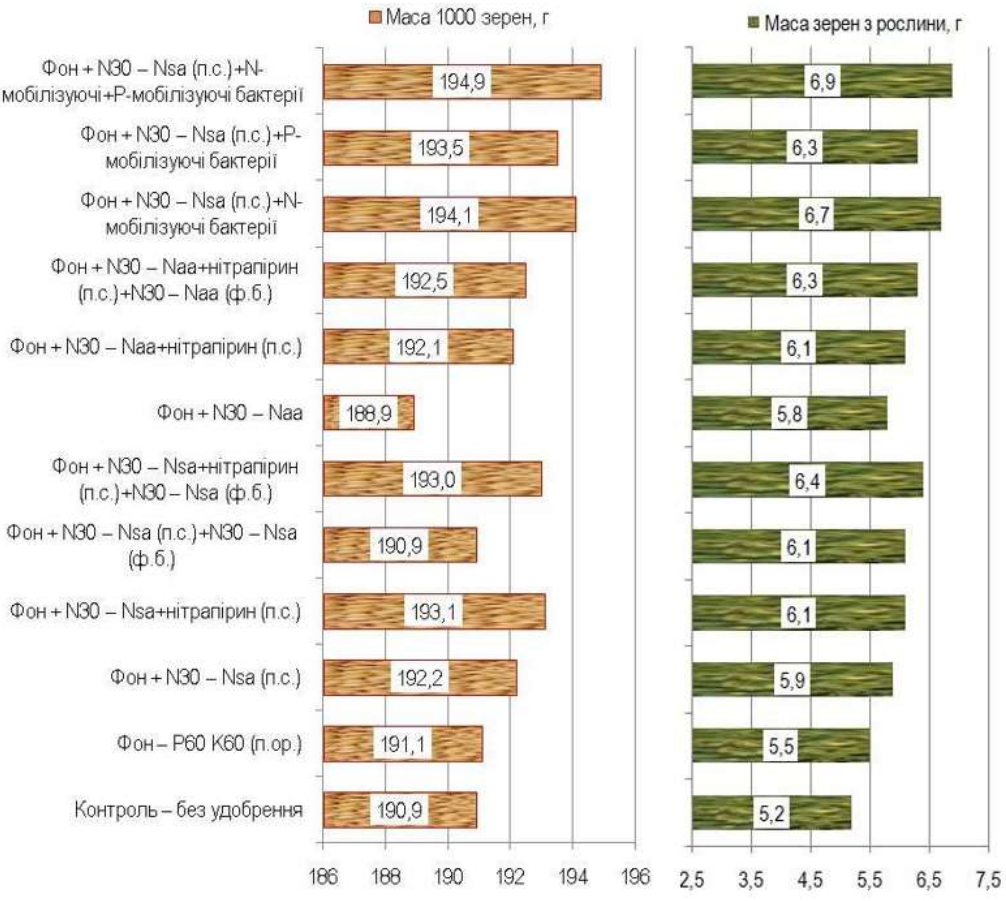


Рис. 3.4. Маса зерен та маса 1000 насінин сої за різних систем удобрення, 2024 р.

Саме в цьому контексті виразно проявляється фізіологічна цінність застосування інгібітора нітрифікації. Нітрапірин, запобігаючи мікробному окисленню амонію до нітратів у ґрунті, рятує рослину від необхідності витрачати власну енергію на подальший метаболізм нітратів. Дія нітрапірину сприяла значному збільшенню маси 1000 зерен як за одинарної (N_{30}), так і за подвійної (N_{30-60}) норми екзогенного азоту, незалежно від початкової хімічної форми застосованого добрива.

Водночас найвищої інтенсивності процеси наливу насіння досягли в умовах оптимізованого симбіозу. Застосування азотфіксувального (*B. japonicum*) та фосформобілізувального (*B. amyloliquefaciens*) інокулянтів як окремо, так і в комплексі забезпечило формування максимально виповненого насіння з масою 1000 зерен у діапазоні 193,5-194,9 г. Симбіотична фіксація атмосферного азоту, хоч і вимагає від рослини витрат вуглеводів на живлення бактерій, на етапі наливу забезпечує стабільний потік уреїдів безпосередньо до генеративних органів, не викликаючи енергетичного виснаження фотосинтетичного апарату.

Інтегральним показником біологічної ефективності рослини є загальна маса насіння, сформованого одним індивідуумом. Залежно від умов живлення цей показник коливався від 5,2 до 6,9 г. Комплексне використання інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі на фоні $N_{30}P_{60}K_{60}$ стимулювало синтез 6,3-6,9 г зерна на рослині, що на 1,0 г перевищує продуктивність рослин за традиційної системи живлення. У розрізі форм мінерального азоту сульфат амонію продемонстрував стійку фізіологічну перевагу над амонійною селітрою, що ще раз підтверджує доцільність амонійного типу живлення для бобових культур. Підвищення норми мінерального азоту до 60 кг/га мало біологічний сенс лише за умови стабілізації цього азоту нітрапірином. Виражений позитивний вплив мікробіологічної інокуляції на архітектоніку генеративної сфери та біоморфологічні параметри сої узгоджується з фундаментальними висновками інших дослідників [70].

3.5. Вплив умов живлення на базові біохімічні показники насіння сої

Насіння сої є важливим джерелом білків для людей і тварин, тому попит на таку продукцію невпинно зростає, про що повідомляє Продовольча та сільськогосподарська організація ООН [71]. Упродовж багатьох десятиліть селекції, яка була орієнтована насамперед на врожайність, середня концентрація білків у насінні демонструє тенденцію до зниження [12]. Щоб підвищити цінність сої для кінцевих споживачів, необхідна висока концентрація білків на рівні 46-47 %. При цьому альтернативою білкам виступають клітковина та інші компоненти.

Жири та білки переважно мають обернену взаємокореляцію. Виробництво рослинної олії із сої досягло найвищого рівня серед усіх рослинних олій і становить близько 30 відсотків [72]. Дослідники В. В. Любич та інші [73] резюмують, що біохімічні складники насіння, зокрема вміст протеїну та жиру, суттєво залежать від погодних умов і генетичних особливостей сорту. А. Г. Козючко та В. М. Гавій [74] довели, що передпосівна обробка насіння метаболічно активними речовинами сприяє значно активнішому накопиченню білків та сирої клітковини. Таким чином, для підтримки або підвищення концентрації білків потрібні ефективні стратегії живлення.

Результати досліджень показали, що за умов відсутності мінеральних добрив або фосфорно-калійного фону вміст сирого протеїну в насінні є мінімальним і становить 33–34 % (рис. 3.5). Внесення мінімальної норми азоту у формі сульфату амонію на фосфорно-калійному фоні сприяє зростанню вмісту сирого протеїну до 35,8–36,5 %. Стабілізація нітратів у ґрунті за допомогою нітрапірину покращує азотне живлення сої та спричиняє додаткове підвищення вмісту сирого протеїну на 0,7 %. Таке підвищення прирівнюється до додаткового внесення 30 кілограмів азоту на гектар під час підживлення у фазі бутонізації. За умови застосування нітрапірину разом із таким підживленням отримано ще 0,7 % приросту концентрації білкових речовин.

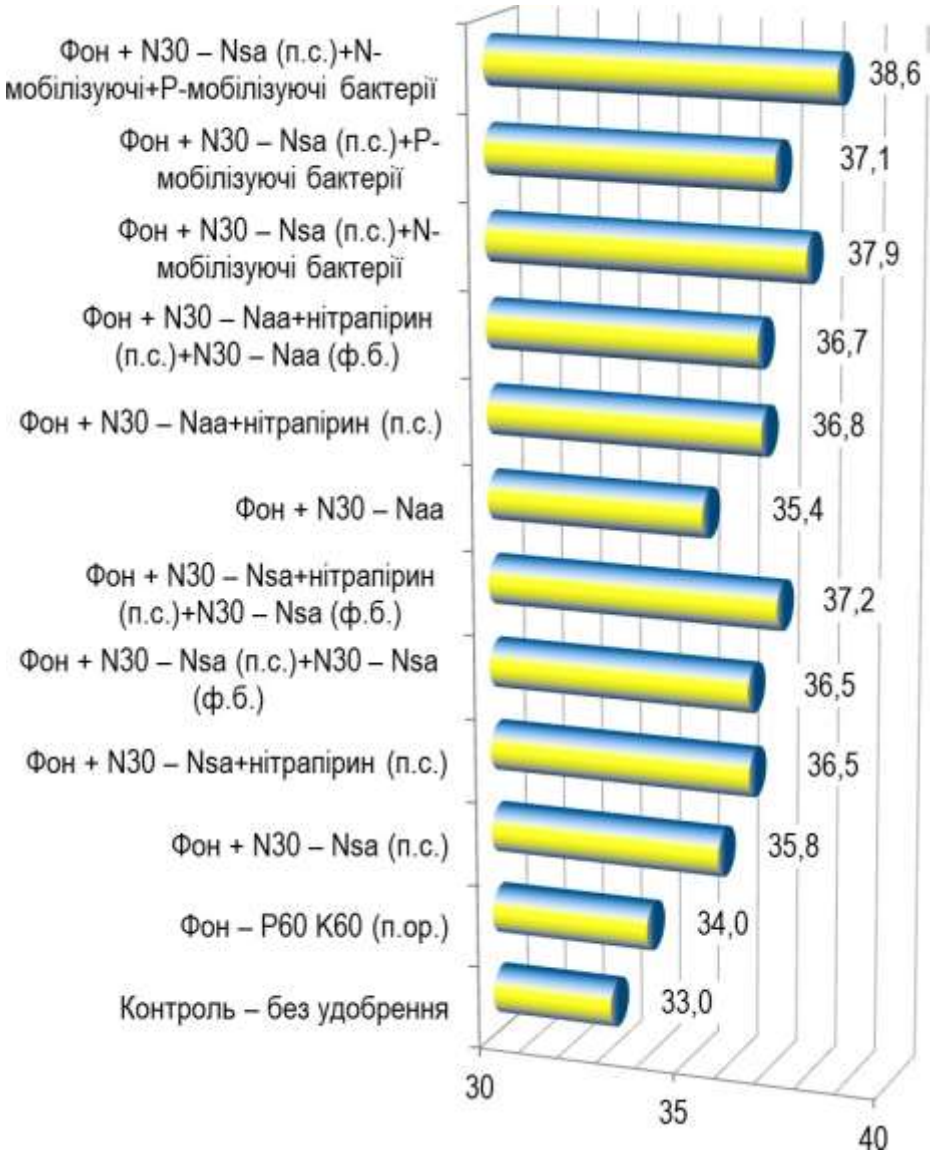


Рис. 3.5. Вміст сирого протеїну в зернах сої за різних систем оптимізації азотного живлення, % (середнє за 2024–2025 рр.)

Більші рівні вмісту сирого протеїну встановлено лише за використання двох специфічних систем удобрення. Внесення мінімальної норми азоту у формі сульфату амонію на фосфорно-калійному фоні у поєднанні із застосуванням інокулянтів з азотмобілізувальними бактеріями штаму *B. japonicum* та фосформобілізувальними бактеріями штаму *B. amyloliquefaciens* забезпечило білковість на рівні 37,9–38,6 %. Найвищого показника білковості насіння досягнуто саме за комплексного поєднання азотмобілізувальних та фосформобілізувальних бактерій, що становить 38,6 %. Це на 2,8 % більше порівняно з чистим мінеральним фоном та на 0,7 % перевищує варіант із застосуванням

лише азотфіксувального інокулянта.

Нітрапірин виявив значно більший позитивний вплив на подвійному фоні сульфату амонію порівняно з аналогічним фоном амонійної селітри. Як форма азотного добрива, амонійна селітра погіршувала накопичення сирого протеїну порівняно із сульфатом амонію. Цей факт узгоджується з даними низки вчених [75; 76], які довели позитивний вплив збалансованого живлення азотом і сіркою на білковість насіння сої. Подібний ефект для сірки та бору відзначали K. N. Devi та L. N. K. Singh [77].

Інтенсивність впливу азотного живлення на концентрацію білків відрізнялася за різних погодних умов. Збільшення концентрації білків спостерігалося за сприятливої погоди, а зниження фіксувалося за прохолодних дощових умов, причому цей ефект був однаковим для різних сортів. Інтенсивність фотосинтезу та активність фіксації азоту часто мали слабкий зв’язок із реакцією концентрації білків. Ці залежності добре проілюстровані дослідженнями в кліматичних та едафічних умовах на Південному Сході США [29], де соя традиційно має вищу концентрацію протеїнів порівняно із Середнім Заходом. Вітчизняні автори [78] пояснюють, що азот є ключовим структурним компонентом амінокислот і нуклеїнових кислот, тому внесення амонійної селітри або карбаміду на фосфорно-калійному фоні сприяє підвищенню вмісту білка до 35,7–36,8 %.

Іншим важливим складником сухої речовини насіння сої є сирий жир. Найменше сирого жиру насіння накопичило за внесення мінімальної норми азоту у формі амонійної селітри на фосфорно-калійному фоні з використанням нітрапірину, що призвело до зниження цього показника до 20,0 % (рис. 3.6.) Внесення мінімальної норми азоту у формі сульфату амонію з використанням азотмобілізувальних бактерій *B. japonicum* забезпечило такий самий низький рівень олійності. Високий рівень накопичення жирів забезпечило застосування фосформобілізувального інокулянта з бактеріями *B. amyloliquefaciens*. Це дозволяє припустити, що покращення фосфорного живлення сприяє утворенню високоенергетичних жирних сполук.

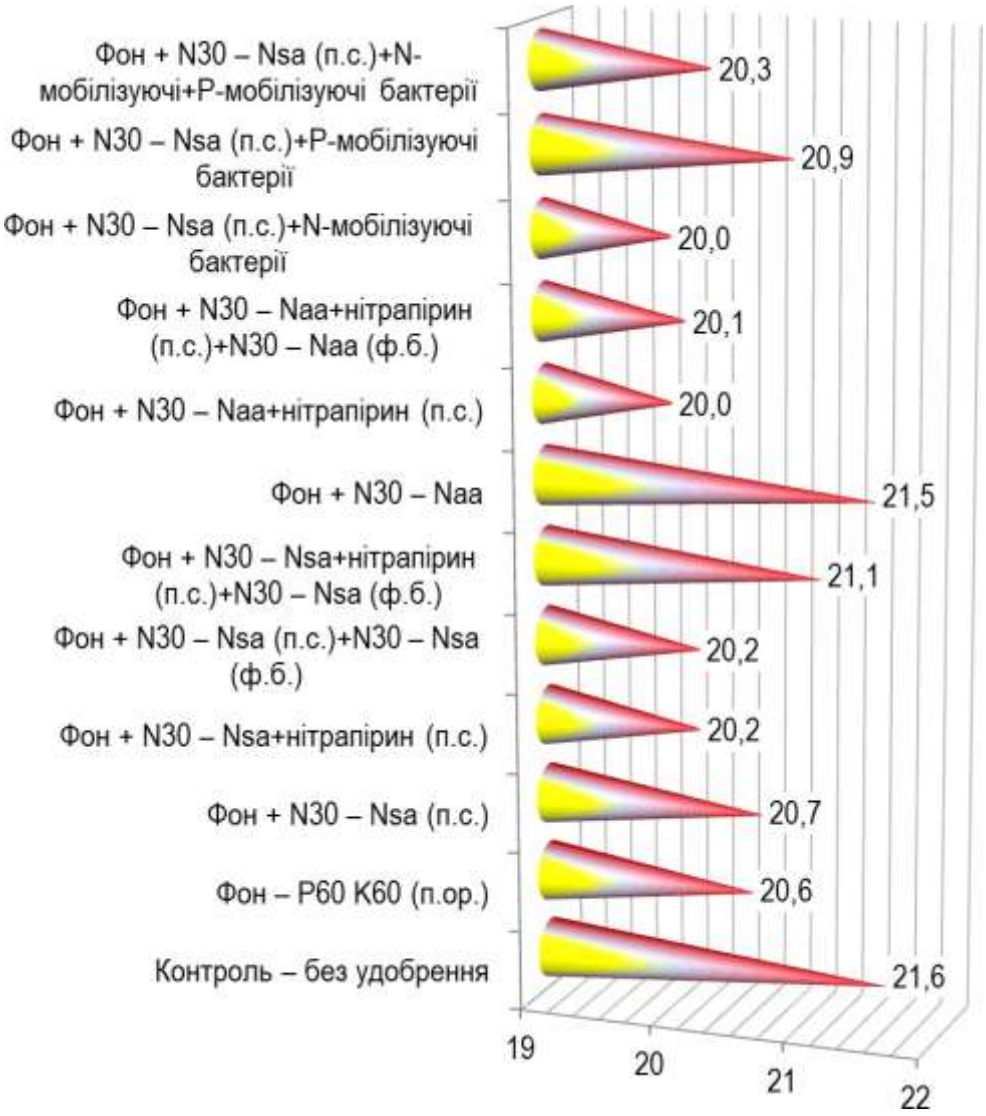


Рис. 3.6. Вміст сирого жиру в зернах сої за різних систем оптимізації азотного живлення, % (середнє за 2024–2025 рр.)

Результати аналізу свідчать, що оптимізація азотного живлення загалом зменшує олійність насіння сої. Нітрапірин, покращуючи азотне живлення, також виразно зменшує нагромадження сирого жиру. Важливо зазначити, що різниця між варіантами досліду за вмістом сирого протеїну була істотною, тоді як за вмістом сирого жиру статистично достовірної різниці не виявлено.

Спектри складу сухої речовини (рис. 3.7), дуже відрізняються за різних систем живлення і показують, що в насінні рослин на неудобреному контролі міститься найбільше речовин, які не перетворилися ні на білки, ні на жири, натомість утворилося більше сирої клітковини. Очевидно, це пов’язано з нестачею поживних елементів за відсутності добрив. Результати

дисперсійного аналізу підтвердили, що системи живлення мали достовірний вплив на коливання показника нагромадження клітковини як альтернативи білкам і жирам.

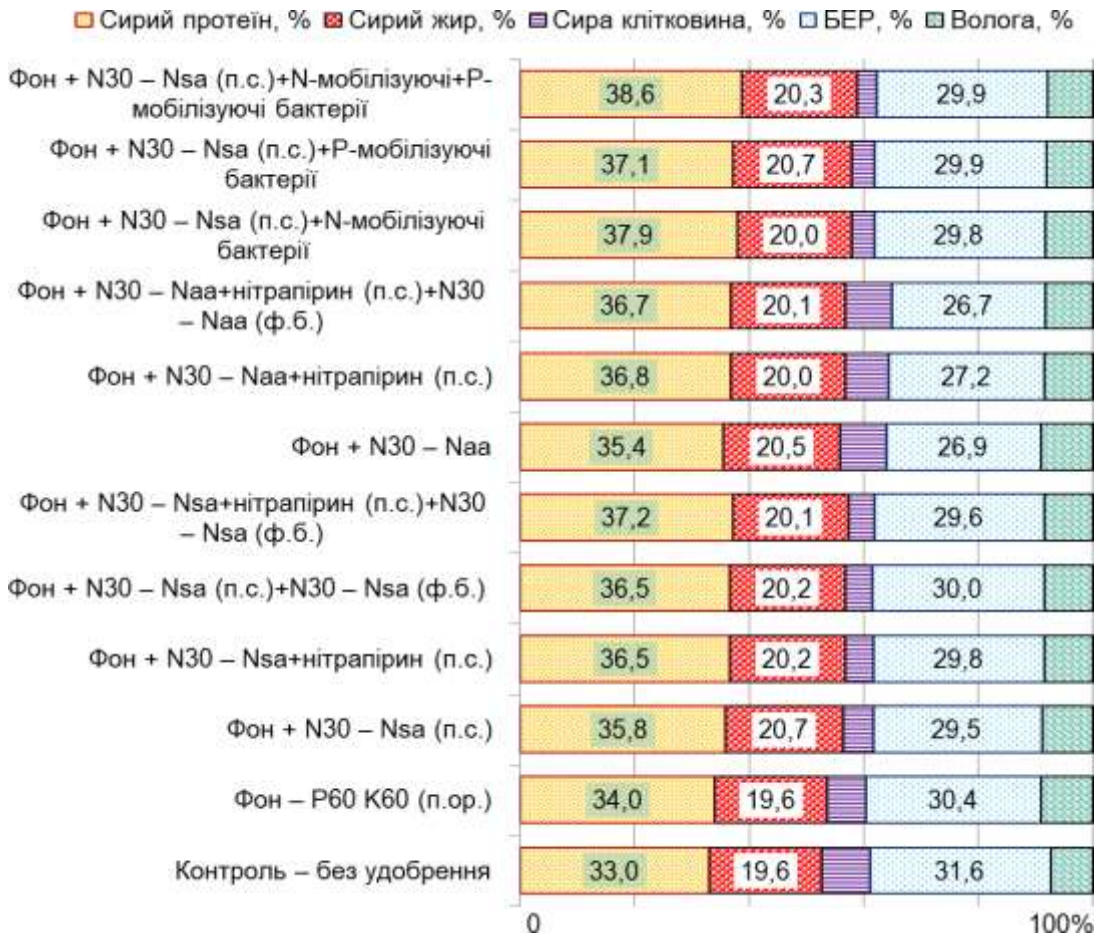


Рис. 3.7. Сухі речовини та волога у зерні сої за різних систем оптимізації азотного живлення, % сухих речовин (середнє за 2024–2025 рр.)

Дослідження В. В. Ляшенко [79] довели, що максимальний вміст білка в насінні сої на рівні 38,2 % можливий за внесення високих доз азоту на фосфорно-калійному фоні. Авторами визначено, що найбільший вміст жиру фіксується у варіанті без добрив і становить 22,0 %. Згідно з даними В. В. Любич та інших [73], вміст протеїну в сучасних сортів може змінюватися від 36,1 до 44,4 %, а вміст жиру варіює від 18,9 до 21,7 %. А. Г. Козючко, та ін. [74] довели, що передпосівна обробка насіння комбінаціями метаболічно активних речовин сприяє значному збільшенню концентрації протеїну порівняно з контрольним варіантом.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених фізіолого-біохімічних досліджень впливу умов мінерального живлення та мікробіологічної інокуляції на морфогенез, симбіотичний апарат і продуктивність рослин сої сформульовано такі висновки.

1. Динаміка фенологічного розвитку та зміна морфометричних показників сої жорстко детермінуються рівнем трофічного забезпечення та гідротермічними умовами. Застосування стартової дози азоту у формі сульфату амонію в комплексі з мікробіологічною інокуляцією стимулює лінійний ріст головного стебла та забезпечує формування максимальної площі асиміляційного апарату. Використання інгібітора нітрифікації на фоні сульфату амонію прискорює завершення вегетації на шість-сім діб, тоді як його комбінація з нітратно-амонійною формою добрива пролонгує життєвий цикл рослин.
2. Розвиток симбіотичного апарату виявляє високу чутливість до хімічної форми екзогенного азоту. Нітратний азот фізіологічно пригнічує процеси бульбочкоутворення, обмежуючи надходження фотоасимілятів до кореневої системи. Натомість стабілізація амонійного азоту за допомогою нітрапірину пролонгує активність азотфіксувального комплексу. Максимальний синергетичний ефект та найбільша маса активних бульбочок формуються за умови комплексного застосування азотфіксувальних бактерій *Bradyrhizobium japonicum* та фосформобілізувальних мікроорганізмів *Bacillus amyloliquefaciens* на базовому фосфорно-калійному фоні з мінімальною дозою стартового азоту.
3. Процеси формування генеративних органів та елементи біологічної продуктивності прямо залежать від збалансованості мінерального фону. Дефіцит елементів живлення спричиняє масову редукцію бобів. Забезпечення рослин фосфором та відповідними фосформобілізувальними бактеріями виступає ключовим тригером ембріогенезу, стрімко підвищуючи озерненість рослини. Екзогенне інгібування нітрифікації

запобігає енергетичному виснаженню рослини на метаболізм нітратів, що призводить до інтенсифікації наливу та збільшення абсолютної маси насіння.

4. Базові біохімічні показники насіння сої піддаються цілеспрямованій екзогенній регуляції. Застосування амонійної селітри погіршує накопичення протеїнів через енергетичну витратність нітратного відновлення. Найвищий вміст сирого протеїну досягається за оптимізації азотного живлення сульфатом амонію у поєднанні з комплексною мікробіологічною інокуляцією, що гарантує потужний потік азотистих метаболітів до генеративних органів. Інтенсифікація біосинтезу протеїнів супроводжується зниженням частки сирого жиру та структурної клітковини, підтверджуючи зміщення метаболізму в бік утворення цінних азотовмісних біополімерів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лихочвор В. В., Петриченко В. Ф. Фізіологічна роль елементів живлення та системи удобрення польових культур : підручник. 3-тє вид., переробл. Львів: Українські технології, 2021. 284 с.
2. Господаренко Г. М. Живлення та удобрення зернобобових культур за сучасних технологій вирощування. Симбіотична азотфіксація та врожай : за заг. ред. Г. М. Господаренка. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2024а. С. 353–383.
3. Господаренко Г. М. Оптимальні умови середовища та інокулянти для ефективного бобово-ризобіального симбіозу. Симбіотична азотфіксація та врожай : за заг. ред. Г. М. Господаренка. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2024б. С. 41–61.
4. Кобилинський І. В. Особливості проведення інокуляції при вирощуванні сої. *Scientific Progress & Innovations Том 27. № 2. Сільське господарство. Рослинництво.* 2024. doi.org/10.31210/spi2024.27.02.04
5. Ohyama T., Fujikake H., Yashima H., Tanabata S., IshikawaS., Sato T. et al. 2012. Effect of Nitrate on Nodulation and Nitrogen Fixation of Soybean. Available at: http://cdn.intechweb.org/pdfs/22777.pdf
6. Hege U., Offenberger K. 2011. Effect of N fertilizer with nitrification inhibitors on winter wheat yield in German Bavarian State Research Center for Agriculture. URL: http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/mineralisch/09628/.
7. Della M. I. F., Godeas A. M., Scervino J. M. 2020. In vivo modulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis and soil quality by fungal P-solubilizers. *Microb Ecol*. 79:21–29. doi.org/10.1007/s00248-019-01396-6
8. Іванюк С. В. Формування сортових ресурсів сої відповідно до біокліматичного потенціалу регіону вирощування. *Корми і кормовиробництво*. 2012а. Вип. 71. С. 34–40.
9. Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) / В. В. Кириченко, С. С. Рябуха, Л. Н. Кобизєва, О. О. Посилаєва, П. В. Чернишенко : монографія / НААН, Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва. Х., 2016. 400 с. URL: https://yuriev.com.ua/assets/files/knigi/soya-monografiya-7.pdf

10. Бабич А. О., Бабич-Побережна А. А. Селекція, виробництво, торгівля і використання сої в світі. Київ. Аграрні науки. 2011б. 548 с.
11. Гадзовський Г. Л., Новицька Н. В., Мартинов О. М. Урожай і якість зерна сої під впливом інокуляції та позакореневого підживлення. *Таврійський науковий вісник.* 2020. № 111. С. 44-48. DOI: doi.org/ 10.32851/2226-0099.2020.111.5.
12. Бахмат О. М. Соя – культура майбутнього, особливості формування високого врожаю: монографія. Кам'янець-Подільський : ПП Мошак М. І. 2009. 208 с.
13. Ohyama T., Tewari K., Ishikawa S., Tanaka K. et al. 2017. Role of Nitrogen on Growth and Seed Yield of Soybean and a New Fertilization Technique to Promote Nitrogen Fixation and Seed Yield. Soybean / Edited by Minobu Kasai. 2017. DOI: 10.5772/66743
14. FAO of the United Nations. 2022. FAO collects relevant national statistical information. Crop and Livestock Production and Utilization. https://www.fao.org/statistics/data-collection/en/
15. Korobko A. Dynamics of soybean production in Ukraine and the world. *Agricultural and Food Sciences.* 2021. С. 125-134. DOI:10.33730/2310-4678.4.2021.253098
16. Rowntree S. C., Suhre J. J., Weidenbenner N. H. et al. 2013. Physiological and Phenological Responses of Historical Soybean Cultivar Releases to Earlier Planting Crop Ecology, Management & Quality. doi.org/10.2135/cropsci2013.06.0428
17. Бахмат О. М., Чинчик О. С. Вплив агротехнічних заходів на продуктивність сої в умовах західного регіону України. *Корми і кормовиробництво*. 2010. Вип. 66. С. 103–108.
18. Salvagiotti F., Cassman K. G., Specht J .E., Walters D. T., Weiss A., Dobermann A. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Res.* 2008, 108, 1–13.

doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001.

19. Gai Zh., Zhang J., Li C. 2017. Effects of starter nitrogen fertilizer on soybean root activity, leaf photosynthesis and grain yield. *PLoS One.* 12(4):e0174841. doi:10.1371/journal.pone.0174841
20. Ohyama T., Takahashi T., Nagumo Y., Tanaka K., Sueyoshi K., Ohtake N., Ishikawa S., Kamiyama S., Saito M., Tewari K. 2010. Deep placement of lime nitrogen promotes nitrogen fixation and seed yield of soybean with efficient utilization rates. Proceedings of 19th World Congress of Soil Science for a Changing World.
21. Didur I. M., Tsyhanskyi V. I., Tsyhanska O. I., Malynka L. V., Butenko A .O., Klochkova T. I. 2019. The effect of fertilizer system on soybean productivity in the conditions of right bank forest-steppe. *Ukrainian Journal of Ecology*, 9(1), 76-80.
22. Kenedy E. E., Bauer Ph. J., Stone K. C. & Locke A. M. 2023. Nitrogen fertilizer effects on soybean physiology, yield components, seed yield and protein content in the Southeastern United States. *Journal of Plant Nutrition.* 46(3): 462-472. doi.org/10.1080/01904167.2022.2084106.
23. Gitelson A. A. 2018. Remote estimation of fraction of radiation absorbed by photosynthetically active vegetation: generic algorithm for maize and soybean. *Remote Sens. Lett.* 10 : 283-291. doi:10.1080/2150704X.2018.1547445
24. Fujikake H., Yamazaki A., Ohtake N., Sueyoshi K. et al. 2003. Quick and reversible inhibition of soybean root nodule growth by nitrate involves a decrease in sucrose supply to nodules. *Journal of Experimental Botany*, V. 54, I. 386, 1 P.1379–1388. doi.org/10.1093/jxb/erg147
25. Ohyama T., Fujikake H., Yashima H., Tanabata S., Ishikawa S., Sato T., Nishiwaki T., Ohtake N., Sueyoshi K., Ishii S., Fujimaki S. 2011. Effect of nitrate on nodulation and nitrogen fixation of soybean, In Soybean, Physiology and Biochemistry (Ed. El-Shemy HA), Rijeka, InTech, 333–364.
26. Петриченко В. Ф., Лихочвор В. В. Рослинництво. Нові технології

вирощування польових культур : підручник. 5-те вид., виправ., доповн. Львів : Українські технології, 2020. 806 с.

27. Sharma A., Sharma S., 2014. Effect of nitrogen and sulphur nutrition on yield parameters and protein composition in soybean [Glycine max (L.) Merrill]. *J. Appl. Nat. Sci.* 6, 402–408. doi.org/10.31018/jans.v6i2.435.
28. Tamagno S., Sadras V. O., Haegele J. W., Armstrong P. R. and Ciampitti I. A. 2018. Interplay between nitrogen fertilizer and biological nitrogen fixation in soybean: Implications on seed yield and biomass allocation. *Scientific Reports*. 8(1):11. doi:10.1038/s41598-018-35672-1.
29. Amundson R., Guo Y., and Gong P. 2003. Soil diversity and land use in the United States. Ecosystems. 6(5):470–82. doi: 10.1007/s10021-002-0160-2.
30. Rotundo J. L., Westgate M. E. 2009. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crops Res.* 2009; 110(2): 147–156.
31. Głowacka A., Jariene E., Flis-Olszewska E. and Kiełtyka-Dadasiewicz A. 2023. The Effect of Nitrogen and Sulphur Application on Soybean Productivity Traits in Temperate Climates Conditions. *Agronomy* 2023, 13(3), 780. doi.org/10.3390/agronomy13030780
32. Pacyna S., Schulz M., Scherer H. W. 2005. Influence of sulphur supply on glucose and ATP concentrations of inoculated broad beans (Vicia faba minor L.). *Biol. Fertil. Soils.* 2005/ 42: 324–329.
33. Павленко В. Візьміть втрати азоту під контроль. Зелені сторінки. Дюпон Україна, 2018. №2. URL: https://agromage.com/stat_id.php?id=991
34. Shestak V., Hnativ P., Ivaniuk V., Olifir Y., Szulc W., Rutkowska B., Veha N., Parkhuc B., Kachmar O., Kocyuba B., Bahaj T. 2023. Dynamics of forms of nutrient nitrogen in Greyic Luvic Phaeozem when regulating their resources with fertilizers and nitrapyrin when applied to winter barley. *Journal of Elementology*, 28(1): 41-58. DOI: 10.5601/jelem.2023.28.1.2352.
35. Mourtzinis S., Kaur G., Orlowski J. M., Shapiro C. A., Lee C. D. et al. 2018. Soybean response to nitrogen application across the United States: A synthesis-

analysis. *Field Crops Research.* V. 215, P. 74-82. doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.035

36. Guo K., Yang J., Yu N. et al. 2023. Biological nitrogen fixation in cereal crops: Progress, strategies, and perspectives. *Plant Communications.* V. 4, I. 2. 100499. P. 1-13. doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100499
37. Ono Y., Fukasawa M., Sueyoshi K., Ohtake N., Sato T., Tanabata S., Toyota R., Higuchi K., Saito A., Ohyama T. 2021. Application of Nitrate, Ammonium, or Urea Changes the Concentrations of Ureides, Urea, Amino Acids and other Metabolites in Xylem Sap and in the Organs of Soybean Plants (*Glycine max* (L.) Merr.). *International Journal of Molecular Sciences* 22(9). DOI: 10.3390/ijms22094573.
38. Solangi F., Zhu X., Khan Sh., Rais N. et al. 2023. The Global Dilemma of Soil Legacy Phosphorus and Its Improvement Strategies under Recent Changes in Agro-Ecosystem Sustainability. *ACS Omega.* V. 8. I. 26. P. 23271-23282. https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acsomega.3c00823?ref=article_openPDF
39. Barra P. J., Pontigo S., Delgado M., Parra-Almuna L. et al. 2019. Phosphobacteria inoculation enhances the benefit of P–fertilization on Lolium perenne in soils contrasting in P–availability. *Soil Biology and Biochemistry*. V. 136, 107516. doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.06.012
40. Kalaji H. M., Oukarroum A., Alexandrov V., Kouzmanova M., Brestic M., Zivcak M., Samborska I. A., Cetner M. D., Allakhverdiev S. I., Goltsev V. 2014. Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by *in vivo* chlorophyll *a* fluorescence measurements. *Plant Physiology and Biochemistry.* V. 81, 2014, P. 16-25. doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.029
41. Моргун В. Н., Должинов С. В., Знак Н. Ю. Использование замедленной флоуресценции хлорофила для оценки фотосинтетической продуктивности и устойчивости растений. *Матер. съезда физиологов растений*. Ч. 2. 1992. С. 141.
42. Randall G. W., Vetsch J. A. 2005. Nitrate losses in subsurface drainage from a

corn-soybean rotation as affected by fall and spring application of nitrogen and nitrapyrin. *Journal of Environmental Quality.* V. 34. I. 2. P. 590-597. DOI10.2134/jeq.0590

43. Fernandez-Fontaina E., Omil F., Lema J. M., Carballa M. 2012. Influence of nitrifying conditions on the biodegradation and sorption of emerging micropollutants. Water Research. V. 46, I. 16, P. 5434-5444. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.037
44. McGeough K. L., Watson C. J., Müller C., Laughlin R. J., Chadwick D. R. 2016. Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide. (DCD) is affected by soil properties in UK soils. *Soil Biol. Biochem*., 94: 222–232. doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.11.017.
45. Degenhardt R. F., Juras L. T., Smith, L. R. A., MacRae A.W., Ashigh, J., McGregor W. R. 2016. Application of Nitrapyrin with Banded Urea, Urea Ammonium Nitrate, and Ammonia Delays Nitrification and Reduces Nitrogen Loss in Canadian Soils. Crop Forage and Turfgrass Management 2(1). DOI:10.2134/cftm2016.03.0027.
46. Litvak Sh. I. Systematic approach to agrochemical research. M.: Agropormizdat, 1990. 220 p.
47. Wang Y., Cheng Y., Chen K., Tsay Y. 2018. Nitrate transport, signaling, and use efficiency. *Annu. Rev. Plant Biol.,* 69: 85–122. doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040056.
48. Zhou X., Wang S., Ma S., Zheng X., Wang Z., Lu C. 2020. Effects of commonly used nitrification inhibitors-dicyandiamide. (DCD), 3, 4-dimethylpyrazole phosphate. (DMPP), and nitrapyrin – on soil nitrogen dynamics and nitrifiers in three typical paddy soils. *Geoderma*, 380: 114637. doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114637.
49. Zhang X., Davidson E. A., Mauzerall D. L., Searchinger T. D., Dumas P., Shen Y. 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 528: 51-59.
50. Zebarth B. J., Rochette P., D. L. Burton. 2008a. N_2O emissions from spring

barley production as influenced by fertilizer nitrogen rate. *Can. J. Soil Sci.,* 88: 197-205.

51. Groffman P. M., Brumme R., Butterbach-Bahl K., Dobbie K. E., Mosier A. R., Ojima D., Papen H., Parton W. J., Smith K. A., Wagner-Riddle C. 2000. Evaluating annual nitrous oxide fluxes at the ecosystem scale. *Global Biogeochem Cycles*, 14 (2000), pp. 1061-1070.
52. Roelandt C., van Wesemael B., Rousevell M. 2005. Estimating annual N_2O emissions from agricultural soils in temperate climates. *Global Change Biol*., 11: 1701-1711.
53. Li S., Wang Z., Hu T., Gao Y., Stewart B., Sparks D. 2009. Nitrogen in dryland soils of China and its management. *Adv. Agron*., 101: 123–181. doi.org: 10.1016/s0065-2113(08)00803-1.
54. Silva A. G. B., Sequeira C. H., Sermarini R. A., Otto R. 2017. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: a meta-analysis. *Agron. J.,* 109: 1–13. doi.org/10.2134/agronj2016.04.0200.
55. Компанія Dow Chemical. 2012. Оцінка безпеки продукту: Нітрапірин. 6 стор. http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08c1/0901b803808c186f.pdf
56. Fu Q. L., Clark I. M., Zhu J, Hu H. Q, Hirsch P. R. 2018. The short-term effects of nitrification inhibitors on the abundance and expression of ammonia and nitrite oxidizers in a long-term field experiment comparing land management. *Biol. Fertil. Soils*., 54: 163–172. doi.org/10.1007/s00374-017-1249-2.
57. Андрущенко Г. О. Ґрунти західних областей УРСР. Львів-Дубляни, 1970. 184 с.
58. ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини. [Чинний від 2005-07-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2005. 14 с.
59. ДСТУ ISO 11464:2007. Якість ґрунту. Попереднє обробляння зразків для фізико-хімічного аналізу (ISO 11464:2006, IDT). [Чинний від 2002-04-02]. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 19 с.

60. Polovyy V., Hnativ P., Balkovskyy V., Ivaniuk V., Lahush N., Shestak V., Szulc W., Rutkowska B., Lukashchuk L., Lukyanik M., Lopotych N. 2021. The influence of climate changes on crop yields in Western Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(1), 384-390. doi: 10.15421/2021_56.
61. Єщенко В. О. та ін. Основи наукових досліджень в агрономії: за ред. В. О. Єщенка. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2014. 332 с.
62. ДСТУ 8066:2015 Корми для сільськогосподарських тварин. Методи визначення енергоємності і поживності [Чинний від 2017-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2018. 11 с.
63. Разумов В. А. Справочник лаборанта-химика по анализу кормов. Россельхозиздат, 1986. С. 94–244.
64. Lancashire P. D., Bleiholder H., Van den Boom T., Langelüddeke P., Strauss R., Weber E., Witzenberger A. 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. Appl. Biol.* 1991. 119: 561–601. https://www.researchgate.net/profile/Hermann-Bleiholder/publication/229530290_A_uniform_decimal_code_for_growth_stage s_of_crops_and_weeds/links/5e8efe064585150839cae154/A-uniform-decimal-code-for-growth-stages-of-crops-and-weeds.pdf.
65. Міленко О. Г. Урожайність сої залежно від сорту, норм висіву насіння та способів догляду за посівами. *Агробіологія.* 2015. № 1. С. 85-88. http://nbuv.gov.ua/UJRN/agr_2015_1_22
66. Фукс Б., Баумгартнер Н. Застосування стабілізаторів азотних добрив. *Журнал "Агроном".* 2020. URL: https://www.agronom.com.ua/zastosuvannya-stabilizatoriv-azotnyh-dobryv/
67. Федорук І. В., Хмелянчишин Ю. В., Городиська О. П. Особливості росту і розвитку рослин сої залежно від сорту та елементів технології вирощування. *Подільський вісник: сільськогосподарські науки.* Випуск 33. 2020. С. 54-61. doi.org/10.37406/2706-9052-2020-2-7
68. Fujikake H., Yamazaki A., Ohtake N., Sueyoshi K. et al. 2003. Quick and

reversible inhibition of soybean root nodule growth by nitrate involves a decrease in sucrose supply to nodules. *Journal of Experimental Botany*, V. 54, I. 386, 1 P.1379–1388. doi.org/10.1093/jxb/erg147

69. Yamashita N., Tanabata S., Ohtake N. et al. 2019. Effects of Different Chemical Forms of Nitrogen on the Quick and Reversible Inhibition of Soybean Nodule Growth and Nitrogen Fixation Activity. *Front. Plant Sci.* V. 10. 2019. doi.org/10.3389/fpls.2019.00131. https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.00131/full.
70. Faligowska A., Szukała J. 2010. Influence of seed inoculation and nitrogen fertilization on morphological characters of legume crops. Zesz. Probl. Postęp. Nauk Rol. 2010, 550: 201–209.
71. FAO (2019) World fertilizer trends and outlook to 2022. Available from http://www.fao.org/3/ca6746en/CA6746EN.pdf. Accessed 3 December 2019.
72. FAO of the United Nations. 2022. FAO collects relevant national statistical information. Crop and Livestock Production and Utilization. https://www.fao.org/statistics/data-collection/en/
73. Любич В. В. та ін. 2020. Технологічне оцінювання якості насіння сої залежно від сорту. *Вісник уманського національного університету садівництва.* №2, С. 32-37. DOI: 10.31395/2310-0478-2020-2-32-37
74. Козючко А. Г., Гавій В. М., Кучменко О. Б. Фотосинтетична продуктивність сої сорту Аннушка залежно від передпосівна ної обробки насіння метаболічно активними речовинами. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол.*, 2021, Т. 81, No 4 С. 81-90. doi: 10.25128/2078-2357.21.4.11.
75. Sharma A., Sharma S., 2014. Effect of nitrogen and sulphur nutrition on yield parameters and protein composition in soybean [Glycine max (L.) Merrill]. *J. Appl. Nat. Sci.* 6, 402–408. doi.org/10.31018/jans.v6i2.435.
76. Burkitbayev M., Bachilova N., Kurmanbayeva M., Tolenova K., Yerezhepova N., Zhumagul M., Mamurova A., Turysbek B., Demeu G. 2021. Effect of

sulfur-containing agrochemicals on growth, yield, and protein content of soybeans (Glycine max (L.) Merr). *Saudi J. Biol. Sci.* 2021, 28: 891–900.

77. Devi K. N., Singh L. N. K. 2012. Influence of sulphur and boron fertilization on yield, quality, nutrient uptake and economics of soybean (Glycine max) under upland conditions. *J. Agric. Sci.* 2012, 4, 1–10.
78. Лихочвор В. В., Щербачук В. М., Панасюк Р. М., Панасюк О. В. Вплив систем удобрення на формування врожайності зерна сої. *Агроном.* 2021. URL: https://www.agronom.com.ua/vplyv-system-udobrennya-na-formuvannya-vrozhajnosti-ta-yakosti-zerna-soyi/
79. Ляшенко В. В., Лотиш І. І., Тараненко А. О., Крикунова В. Ю., Кундиус К. О. Вплив азотних добрив на урожайність та якість насіння сої. *Вісник ПДАА.* 2019. № 4. С. 58−65.