

Міністерство освіти і науки України  
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій  
імені С. З. Гжицького

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КОЦЮБА Богдан Ігорович**

УДК 633.34:632.983.3:631.55:52:631.53:84

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АЗОТНОГО УДОБРЕННЯ СОЇ  
З ВИКОРИСТАННЯМ ІНГІБІТОРА НІТРИФІКАЦІЇ  
ТА ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ В УМОВАХ МАЛОГО ПОЛІССЯ**

201 – Агрономія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Б. І. Коцюба

Науковий керівник – **Гнатів Петро Степанович,**

доктор біологічних наук, професор;

Науковий керівник – **Гаськевич Оксана Володимирівна**

кандидат географічних наук, доцент

Львів – 2025

## АНОТАЦІЯ

*Коцюба Б. І.* Оптимізація системи азотного удобрення сої з використанням інгібітора нітрифікації та інокуляції насіння в умовах Малого Полісся. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 20 – «Аграрні науки та продовольство» за спеціальністю 201 «Агрономія». – Львівський національний університет природокористування, Львів, 2025.

Культура сої просувається все більше у північні широти і стає дуже рентабельною для виробництва на Заході України. Зерно сої містить високий відсоток білків (близько 35–40%) і потребує значної кількості азоту для живлення порівняно з іншими культурами. Але, як бобова рослина, вона здатна здобути більшість необхідного азоту шляхом симбіотичних взаємовідношень з бактеріями роду *Rhizobium*. Приблизно решту 40-50% асимільованого азоту соя засвоює з ґрунтових ресурсів. Проте, її успішно вирощують і без внесення азотних добрив у ґрунт. Їх інколи замінюють інокуляцією ризобіями насіння для сівби на полях, де раніше сою не вирощували. Окрім того, спеціальні дослідження показали, що підвищений рівень внесеного з добривами нітратного азоту в ґрунті може гальмувати процес фіксації азоту симбіотичними бактеріями сої. З огляду на це, застосування інгібіторів нітрифікації при вирощуванні сої може бути перспективним.

Предметом важливого зацікавлення практиків і науковців є закономірності формування врожаю зерна сої залежно від системи азотного удобрення, побудованої на різних формах і дозах азотних добрив, внесених перед сівбою, у тому числі з інгібіторами нітрифікації, а також у підживлення у фазі бутонізації, у поєднанні з використанням мікробіологічних інокулянтів у нових для культури умовах Малого Полісся.

Наші дослідження проведені упродовж 2022-2024 років у філії кафедри агрохімії та ґрунтознавства (ЛНУП) на полі фермерського господарства "БІК АГРО" (село Шайноги). Мета досліджень – визначити оптимальну систему азотного удобрення із використанням різних форм азотних добрив та мікробіологічних інокулянтів для максимальної забезпеченості культури у критичний період росту і розвитку та високої продуктивності сої зі збереженням показників родючості ґрунту в умовах Малого Полісся.

На дослідному полі дерновий глибокий глейовий піщанисто-легкосуглинковий ґрунт на водно-льодовикових відкладах. До закладання дослідів вміст легкогідролізного азоту за методом Корнфільда визначали згідно ДСТУ 7863:2015 у товщі 0–20 см і 20–40 см. Вміст нітратного азоту (Nn) визначали потенціометрично за допомогою йонселективного нітратного електрода. Рухомі сполуки фосфору й обмінного калію визначали за ДСТУ 4115-2002.

Технологія вирощування сої у наших дослідках традиційна. Інгібітор нітрифікації N-Lock™ – нітрапірін, вносили у нормі 1,7 л/га перед сівбою. Для інокуляції насіння використали препарати ХайКот Супер Соя (виробник БАСФ), який містить азотмобілізаційні бактерії *B. japonicum* та Райс Пі (виробник Агрітема), який містить фосформобілізаційні бактерії *Bacillus amyloliquefaciens*. Статистичний аналіз даних виконали за допомогою програмних пакетів Statistica 12 та Microsoft Excel, для урожайних даних застосували дисперсійний аналіз ANOVA у програмі Dispersion.exe.

Фосфорно-калійне удобрення сої покращує родючість ґрунту. Норми добрив  $P_{60}K_{60}$  додає в орному шарі у фазі сходів відповідно 11,0-15,0 мг/кг  $P_2O_5$  та 11,1-11,5 мг/кг  $K_2O$  до їх природного рівня вмісту. На цьому фоні фосфатмобілізаційні бактерії (інокулянт Райс Пі) спричинили максимальне підвищення запасу доступних фосфатів у фазі сходів – до 139,1 мг/кг. Найвищі запаси фосфатів на фоні  $P_{60}K_{60}$  зберігалися і до збирання врожаю (132,2 мг/кг), порівняно з варіантами без інокуляції фосфатмобілізаційними бактеріями. Отже

інокулянт Райс Пі на фоні  $P_{60}$  сприяв тривалішому підвищенню родючості ґрунту.

Система удобрення сої з мінімальною ( $N_{30}$ ) та подвійною нормою ( $N_{60}$ ) азоту у формі сульфату амонію з використанням нітрапірину або інокулянтів сприяла зниженню утворення нітратів в орному та, особливо, у підорних горизонтах ґрунту у фазі бутонізації (на 21,1% порівняно з нормою  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію). Застосування на цьому фоні азотфіксувального інокулянта ХайКот Супер Соя для обробки насіння спричинило утворення навіть меншого ресурсу нітратів в орному шару ґрунту, порівняно з удобренням  $N_{30}P_{60}K_{60}$  з нітрапірином + підживлення  $N_{30}$  у бутонізацію сої. Подвоєння норми азотного удобрення від  $N_{30}$  до  $N_{60}$  збільшило обсяги емісії закису азоту в атмосферу на 25%. Система удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  з використанням сульфату амонію + N-мобілізаційні бактерії стримувала викиди газоподібного азоту на рівні варіанту  $N_{30}P_{60}K_{60}$  без інокулянта. Отже, підтверджена ефективність удосконаленої системи удобрення сої стосовно збереження якості природного довкілля за використання азотних добрив.

Середньорічна температура повітря упродовж 2010-2023 років становила 9,0 проти 8,3°C у період 2010-2015 років, а середня максимальна температура сягнула 22,4°C, що вказує на сталу тенденцію зростання теплових ресурсів Лісостепу Західного в районі Малого Полісся. Із трьох років досліджень другий 2023 рік був найсприятливішим за тепловим ресурсом та зволоженням в період вегетації сої. Хоча травень 2023 та 2024 років був посушливим, проте у червні спостерігали надлишок опадів в обидва роки, що посприяло формуванню врожаю сої. Липень в усі роки досліджень був вологим, проте 2023 рік відрізнявся істотним перевищенням багаторічної норми на 19 мм. 2022 рік вегетації був найменше сприятливим для продуктивності сої через відносно сухі квітень і травень та надмірно вологий вересень. Із погодними умовами була пов'язана тривалість вегетації сої, ефективність добрив, нітрапірину та інокулянтів. Подвійна норма азоту, а також одинарна із використанням азотних

та фосфорних інокулянтів продовжувала вегетацію сої у сприятливій 2023 і 2024 роки. Інгібітор нітрифікації у всіх випадках застосування із сульфатом амонію спричиняв пришвидшення завершення вегетації сої на 6-7 діб, з амонійною селітрою він продовжував вегетацію на 4-5 діб.

Контроль інгібітором концентрації нітратів, які гальмують бульбочкоутворення, і заміна амонійної селітри на сульфат амонію не забезпечували такого вагомого результату, як поєднання інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . За такого варіанту маса бульбочок на рослині становила найбільші величини – у бутонізацію 0,49 г, і у квітування 0,82 г. Із внесенням нітрапірину 1,7 л/га перед сівбою на одинарній ( $N_{30}$ ) і при подвійній ( $N_{30}$ ) дозі азоту у формі сульфату амонію у фазі квітування маса бульбочок становила 0,69 та 0,72 г, на фоні амонійної селітри ( $N_{30}$ ) без інгібітора утворення бульбочок було найбільше пригніченим (маса бульбочок у фазі квітування становила 0,39 г на одну рослину).

На мінімальному фоні сульфату амонію  $N_{30}+P_{60}K_{60}$  з використанням інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі висота рослин (84,1 см) і закріплення боба (14,5 см) були найвищими, порівняно з іншими варіантами. Така система удобрення у поєднанні з інокуляцією насіння сприяла утворенню найбільшої кількості бобів (16,3 боба), зерен на рослині (34,4 зернини), забезпечила масу 1000 зерен в діапазоні 194,1-193,5-194,9 г, маси зерен з рослини 6,7-6,3-6,9 г.

Експресдіагностика асиміляційного апарату польовим приладом N-Tester™ для оцінки стану живлення сої показала, що оптична активність листків була максимальною за системи удобрення, де фон  $P_{60}K_{60}$  поєднали з  $N_{30}$  (перед сівбою) і з обробкою насіння інокулянтами ХайКот Супер Соя та Райс Пі. Внесення нітрапірину за початкової ( $N_{30}$ ) норми азоту та з наступним підживленням у фазі бутонізації ( $N_{30}$ ) у формі сульфату амонію на фоні  $P_{60}K_{60}$  під оранку істотно збільшувало оптичну активність, що свідчило про поліпшення азотного живлення сої. За третього тестування у фазі побуріння бобів оптична активність листків була найвищою, порівняно з фазами

квітування та формування бобів, що підтвердило динамічне поліпшення азотного живлення сої аж до формування зерна та підтверджене найвищими балами візуального оцінювання стану посівів у варіантах системи удобрення  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію та нітрапірин перед сівбою), а також з підживленням у бутонізацію ( $N_{30}$ ) або поєднанням двох інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$ .

За внесення під оранку  $P_{60}K_{60}$ , перед сівбою  $N_{30}$  (сульфат амонію) з нітрапірином та підживленням  $N_{30}$  у фазі бутонізації урожай зерна сої в середньому за 2022-2024 роки досягнув рівня 3,90 т/га. Такий же врожай забезпечила система удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  з використанням інокулянта ХайКот Супер Соя без внесення нітрапірину та підживлення. Надвишка за три роки становила 0,35 т/га порівняно з традиційними нормами удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Сумісне використання ХайКот Супер Соя і Райс Пі на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  додало ще 0,05 т/га надвишки, але вона була в межах статистичної похибки ( $HP_{05}$  абсолютна = 0,13-0,16 т/га). За сприятливої для дії інгібітора нітратів з весни приріст врожаю зерна становив 0,33 т/га, порівняно з традиційною системою удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Амонійна селітра як без інгібітора, так і з нітрапірином зумовлювала менший врожай сої, порівняно із сульфатом амонію у всіх варіантах застосування.

Найбільше протеїну у зерні сої утворилося за двох систем удобрення: за внесення мінімальної норми азоту  $N_{30}$  у формі сульфату амонію на фоні  $P_{60}K_{60}$  у поєднанні із застосуванням інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі – 37,9-38,6%. Але максимального показника білковості зерна досягнуто за поєднання азотомобілізуючих та фосформобілізуючих бактерій – 38,6%, що на 2,8% більше аналогічної системи удобрення, тільки без інокулянтів. Високий вміст жирів у зерні сої спричинило застосування фосформобілізаційного інокулянта Райс Пі. Отже, покращення фосфорного живлення сої за допомогою мобілізаторів фосфатів сприяє утворенню жирних сполук у зерні. Оптимізація азотного удобрення сої знижувала олійність зерна, а нітрапірин, покращуючи

азотне живлення сої, виразно зменшував нагромадження сирого жиру. Максимальний збір сирого протеїну – 1,58 т/га, 2023 найсприятливішого року забезпечила система удобрення фон  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$  (сульфат амонію перед сівбою) + N-мобілізуючі + P-мобілізуючі інокулянти, або такий самий, тільки без інокулянта P-мобілізатора.

Система мінерального удобрення  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$  (у формі сульфату амонію перед сівбою) із застосуванням азотфіксувального інокулянта насіння ХайКот Супер Соя (БАСФ) забезпечила максимальний чистий прибуток від реалізації зерна сої – 51754 грн/га, за не найвищого врожаю (3,90 т/га) та за помірних додаткових витрат на добрива. Така ж система удобрення, але з додатковою інокуляцією насіння фосформобілізаційним препаратом Райс Пі (Агрітема) забезпечила лише на 750 грн/га менший і другий за величиною у дослідках прибуток. Застосування фосформобілізаційного препарату вагомо збільшувало доступність фосфатних ґрунтових ресурсів та підвищувало до максимуму (38,6%) білковість зерна, але ці переваги економічно не оцінюються. Стосовно використання нітрапірину, як стабілізатора азоту, слід сказати, що він підвищував чистий прибуток у всіх варіантах його застосування, якщо порівнювати з аналогічними варіантами систем удобрення, але ні на помірних, ні на подвійних варіантах норм азоту не забезпечував більшого прибутку, ніж інокуляція насіння на помірному фоні удобрення. Рентабельність виробництва сої була високою і коливалася в діапазоні від 228% до 293%. Застосування азотних добрив у формі сульфату амонію, збільшення норми азоту вдвічі і внесення нітрапірину зменшувало показник рентабельності на 18-39% відносно традиційної системи удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Використання інокулянта ХайКотСупер Соя (БАСФ) забезпечило збільшення рентабельності на 26% до максимуму з-поміж удобрених варіантів – 293% на аналогічному фоні удобрення. На цьому ж фоні удобрення окупність додаткових затрат була найбільшою – 8,00 грн/грн і перевищувала традиційний варіант удобрення на 0,37 грн/грн. Найбільш конкурентним до найкращого варіанту за

рентабельністю та окупністю був традиційний варіант системи удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію) з використанням фосформобілізаційного інокулянта Райс Пі (Агрітема).

За розрахунку енергоефективності агроприймів збільшення виробництва зерна сої найбільшу компенсацію енергозатрат забезпечили невеликі норми добрив  $N_{30}P_{60}K_{60}$  у поєднанні з використанням двох інокулянтів: азотфіксувального та фосформобілізаційного препаратів. За поєднання препаратів ХайКот Супер Соя та Райс Пі коефіцієнт енергетичної ефективності становив найвищий рівень. Наближалися до нього варіанти, де на мінімальній системі удобрення використано лише один із двох інокулянтів.

Розроблені пропозиції виробництву, у яких рекомендовано для підвищення віддачі мінеральних добрив на дерновому глейовому легкосуглинковому ґрунті у Малому Поліссі (Лісостеп Західний) вносити під оранку  $P_{60}K_{60}$ , а перед сівбою сульфат амонію в нормі  $N_{30}$  та застосувати препарати ХайКот Супер Соя та Райс Пі. На бідніших ґрунтах за потреби застосувати систему роздрібного внесення азотного добрива ( $N_{30}$  перед сівбою +  $N_{30}$  у підживлення) та відмови від інокулянтів доцільно внести перед сівбою стабілізатор азоту в ґрунті – N-Lock™ (1,7 л/га). У разі господарської необхідності застосувати амонійну селітру замість сульфату амонію як за одинарної норми внесення перед сівбою  $N_{30}$ , так із підживленням  $N_{30}$  у фазі бутонізації нітрат амонію слід поєднувати з внесенням інгібітора нітрифікації, щоб запобігти пригніченню бульбачкоутворення у сої.

**Ключові слова:** соя, азотне добриво, ґрунт, нітрапін, інокулянт, нітрати, закис азоту, тестування азотного живлення, протеїн, жир, урожай.

## ABSTRACT

*Kotsiuba B. I. Optimization of the Nitrogen Fertilization System for Soybean Using a Nitrification Inhibitor and Seed Inoculation in the Conditions of Male Polissya. – Qualification research paper as a manuscript.*

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 20 – "Agricultural Sciences and Food" in the specialty 201 "Agronomy". – Lviv National Environmental University, Lviv, 2025.

Soybean culture is advancing more and more into northern latitudes and is becoming very profitable for production in Western Ukraine. Soybean grain contains a high percentage of proteins (about 35–40%) and requires a significant amount of nitrogen for nutrition compared to other crops. However, as a legume, it is able to obtain most of the necessary nitrogen through symbiotic relationships with *Rhizobium* bacteria. Approximately the remaining 40–50% of assimilated nitrogen is absorbed by soybeans from soil resources. However, it is successfully grown without the introduction of nitrogen fertilizers into the soil. They are sometimes replaced by inoculation with rhizobia seeds for sowing in fields where soybeans have not been grown before. Moreover, specialized studies have shown that an elevated level of nitrate nitrogen introduced through fertilizers in the soil can inhibit the nitrogen fixation process by soybean's symbiotic bacteria. Therefore, the use of nitrification inhibitors in soybean cultivation could be promising.

The subject of significant interest for practitioners and researchers is the patterns of soybean grain yield formation depending on the nitrogen fertilization system. This system is based on different forms and doses of nitrogen fertilizers applied before sowing, including the use of nitrification inhibitors, as well as top-dressing during the budding phase, combined with the use of microbiological inoculants in the new cultivation conditions of Male Polissya.

Our research was conducted during 2022–2024 at the branch of the Department of Agrochemistry and Soil Science (LNEU) on the field of the "BIK AGRO" farming enterprise (village of Shainohy). The objective of the study was to determine the optimal nitrogen fertilization system using different nitrogen fertilizer forms and microbiological inoculants to ensure maximum crop nutrition during critical growth and development phases, achieve high soybean productivity, and maintain soil fertility in the conditions of Male Polissya.

The experimental field's soil is a deep gleyic sod sandy-loamy soil on water-glacial deposits. Before the experiments, the content of easily hydrolyzable nitrogen was determined using the Cornfield method (DSTU 7863:2015) at depths of 0–20 cm and 20–40 cm. The nitrate nitrogen (Nn) content was determined potentiometrically using an ion-selective nitrate electrode. Mobile phosphorus compounds and exchangeable potassium were analyzed according to DSTU 4115-2002.

Soybean cultivation technology in our experiments was traditional. The nitrification inhibitor N-Lock™ (nitrapyrin) was applied at a rate of 1.7 l/ha before sowing. For seed inoculation, we used: HiCoat® Super Soy (BASF), containing nitrogen-mobilizing bacteria *B. japonicum*, Rise P (Agritema), containing phosphorus-mobilizing bacteria *B. amyloliquefaciens*. Statistical analysis of data was performed using Statistica 12 and Microsoft Excel. For yield data, ANOVA was applied using the Dispersion.exe program.

Phosphorus-potassium fertilization improves soil fertility. The fertilizer rate  $P_{60}K_{60}$  increased the arable layer content during the seedling phase by 11.0–15.0 mg/kg  $P_2O_5$  and 11.1–11.5 mg/kg  $K_2O$  compared to the natural nutrient levels. Against this background, phosphorus-mobilizing bacteria (Rise P inoculant) caused the highest increase in available phosphorus reserves during the seedling phase, reaching 139.1 mg/kg. The highest phosphorus reserves on the  $P_{60}K_{60}$  background persisted until harvest (132.2 mg/kg), compared to variants without inoculation with

phosphorus-mobilizing bacteria. Thus, the Rise P inoculant on the P<sub>60</sub> background contributed to a longer-lasting increase in soil fertility.

The soybean fertilization system with a minimal (N<sub>30</sub>) and double (N<sub>60</sub>) nitrogen rate in the form of ammonium sulfate, using nitrapyrin or inoculants, contributed to a reduction in nitrate formation in the plow layer and especially in the subsoil horizons during the emergence phase (by 21.1% compared to the N<sub>30</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> (ammonium sulfate) standard). The use of the nitrogen-fixing inoculant Hi-Coat Super Soy for seed treatment under these conditions resulted in even lower nitrate resources in the plow layer compared to N<sub>30</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> fertilization with nitrapyrin + an additional N<sub>30</sub> application during soybean budding. Doubling the nitrogen fertilizer rate from N<sub>30</sub> to N<sub>60</sub> increased nitrous oxide emissions into the atmosphere by 25%. The N<sub>30</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> fertilization system with ammonium sulfate + N-mobilizing bacteria controlled gaseous nitrogen emissions at the same level as the N<sub>30</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> variant without inoculant. Thus, the efficiency of the improved soybean fertilization system in maintaining environmental quality while using nitrogen fertilizers was confirmed.

The average annual air temperature from 2010 to 2023 was 9.0°C compared to 8.3°C during the 2010–2015 period, and the average maximum temperature reached 22.4°C, indicating a stable trend of increasing thermal resources in the Western Forest-Steppe within the Small Polissia region. Of the three years of research, the second year, 2023, was the most favorable in terms of thermal resources and moisture during the soybean growing season. Although May of 2023 and 2024 was dry, June in both years saw excessive precipitation, which supported soybean yield formation. July was wet in all study years, with 2023 showing a significant excess of the long-term norm by 19 mm. The 2022 growing season was the least favorable for soybean productivity due to relatively dry conditions in April and May and excessively wet conditions in September. Weather conditions influenced soybean vegetation duration, fertilizer efficiency, nitrapyrin, and inoculants. The double nitrogen rate, as well as the single rate with nitrogen and phosphorus inoculants, prolonged soybean vegetation in the favorable years of 2023 and 2024. The

nitrification inhibitor, in all cases of application with ammonium sulfate, accelerated the end of soybean vegetation by 6–7 days, while with ammonium nitrate, it prolonged vegetation by 4–5 days.

Nitrate concentration control using an inhibitor, which suppresses nodule formation, and the substitution of ammonium nitrate with ammonium sulfate did not achieve as significant results as the combination of HiCoat® Super Soy and *Rhizobium* inoculants on the  $N_{30}P_{60}K_{60}$  background. Under this variant, the nodule mass per plant reached its highest values—0.49 g during budding and 0.82 g during flowering. With the application of nitrapyrin at 1.7 L/ha before sowing, under a single ( $N_{30}$ ) and double ( $N_{60}$ ) nitrogen rate in the form of ammonium sulfate, the nodule mass during the flowering phase was 0.69 and 0.72 g, respectively. In contrast, on the ammonium nitrate ( $N_{30}$ ) background without the inhibitor, nodule formation was most suppressed (nodule mass during flowering was 0.39 g per plant).

On the minimal ammonium sulfate background ( $N_{30}+P_{60}K_{60}$ ) with the use of Hi-Coat Super Soy and *Rhizobium* inoculants, plant height (84.1 cm) and pod fixation height (14.5 cm) were the highest compared to other variants. This fertilization system, combined with seed inoculation, contributed to the largest number of pods (16.3 pods), seeds per plant (34.4 seeds), a 1000-seed mass ranging from 193.5–194.9 g, and seed mass per plant of 6.3–6.9 g.

Field diagnostics of the assimilation apparatus using the N-Tester™ device for assessing soybean nutrition showed that leaf optical activity was maximized under the fertilization system combining a  $P_{60}K_{60}$  background with  $N_{30}$  (applied before sowing) and seed treatment with Hi-Coat Super Soy and *Rhizobium* inoculants. Applying nitrapyrin with an initial nitrogen rate ( $N_{30}$ ) and subsequent top-dressing during the budding phase ( $N_{30}$ ) in the form of ammonium sulfate on a  $P_{60}K_{60}$  background significantly enhanced optical activity, indicating improved nitrogen nutrition for soybeans. During the third test, at the pod browning phase, leaf optical activity was the highest compared to the flowering and pod formation phases, confirming dynamic improvement in nitrogen nutrition up to seed formation. This

was corroborated by the highest visual assessment scores for the crop condition in the fertilization system variants of  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (ammonium sulfate and nitrapyrin before sowing), as well as additional top-dressing during budding ( $N_{30}$ ) or the combination of the two inoculants, HiCoat® Super Soy and *Rhizobium*, on the  $N_{30}P_{60}K_{60}$  background.

When  $P_{60}K_{60}$  was applied during plowing,  $N_{30}$  (ammonium sulfate) with nitrapyrin was added before sowing, and  $N_{30}$  was top-dressed during the budding phase, the average soybean grain yield for 2022–2024 reached 3.90 t/ha. A similar yield was achieved with the  $N_{30}P_{60}K_{60}$  fertilization system using the HiCoat® Super Soy inoculant without nitrapyrin or top-dressing. Over three years, this resulted in an increase of 0.35 t/ha compared to traditional  $N_{30}P_{60}K_{60}$  fertilization rates. The combined use of HiCoat® Super Soy and *Rhizobium* on the  $N_{30}P_{60}K_{60}$  background added an additional 0.05 t/ha, although this increase was within the statistical error margin (Level of Significant Difference ( $LSD_{05}$ ) = 0.13–0.16 t/ha). In springs favorable for nitrapyrin's action, the grain yield increase reached 0.33 t/ha compared to the traditional  $N_{30}P_{60}K_{60}$  fertilization system. Ammonium nitrate, both with and without nitrapyrin, resulted in lower soybean yields compared to ammonium sulfate across all application variants.

The highest protein content in soybean grain was recorded under two fertilization systems: when the minimal nitrogen rate of  $N_{30}$  in the form of ammonium sulfate was applied on a  $P_{60}K_{60}$  background in combination with HiCoat® Super Soy and *Rhizobium* inoculants (37.9–38.6%). The maximum protein content (38.6%) was achieved with the combined use of nitrogen- and phosphorus-mobilizing bacteria, which was 2.8% higher than the same fertilization system without inoculants. A high fat content in soybean grain was induced by the application of the phosphorus-mobilizing inoculant *Rhizobium*. Thus, improved phosphorus nutrition through phosphate mobilizers contributed to the formation of fatty compounds in the grain. Optimization of soybean nitrogen fertilization reduced grain oil content, and

nitrapyrin, while improving nitrogen nutrition, noticeably decreased crude fat accumulation.

The maximum crude protein yield of 1.58 t/ha in the most favorable year, 2023, was ensured by the fertilization system consisting of a  $P_{60}K_{60}$  background (during plowing) +  $N_{30}$  (ammonium sulfate before sowing) + nitrogen- and phosphorus-mobilizing inoculants, or the same system but without the phosphorus-mobilizer inoculant.

The mineral fertilization system  $P_{60}K_{60}$  (applied before plowing) +  $N_{30}$  (in the form of ammonium sulfate before sowing) combined with the use of the nitrogen-fixing seed inoculant HiCoat Super Soy (BASF) provided the maximum net profit from soybean grain sales – 51,754 UAH/ha, despite not having the highest yield (3.90 t/ha) and incurring moderate additional costs for fertilizers. A similar fertilization system, supplemented with the phosphorus-mobilizing seed inoculant RhizPi (Agritema), delivered a slightly lower profit, by only 750 UAH/ha, ranking second among the tested options. The application of the phosphorus-mobilizing inoculant significantly increased the availability of soil phosphate resources and maximized grain protein content (38.6%), but these advantages are not economically evaluated.

Regarding the use of nitrapyrin as a nitrogen stabilizer, it consistently increased net profit in all scenarios compared to equivalent fertilization systems without nitrapyrin. However, neither in moderate nor double nitrogen application rates did it provide higher profits than seed inoculation under moderate fertilization. The profitability of soybean production was high, ranging from 228% to 293%. The use of nitrogen fertilizers in the form of ammonium sulfate, doubling the nitrogen application rate, and applying nitrapyrin reduced profitability by 18–39% compared to the traditional  $N_{30}P_{60}K_{60}$  system. The use of the HiCoat Super Soy inoculant (BASF) increased profitability by 26%, achieving the highest profitability among fertilized options – 293% under a similar fertilization scheme. This scheme also provided the highest return on additional investment, at 8.00 UAH/UAH, exceeding

the traditional fertilization system by 0.37 UAH/UAH. The traditional fertilization system  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (ammonium sulfate) combined with the phosphorus-mobilizing inoculant RhizPi (Agritema) proved to be the closest competitor in terms of profitability and return on investment.

In energy efficiency calculations for agricultural practices aimed at increasing soybean grain production, the highest energy input compensation was achieved with low fertilizer rates of  $N_{30}P_{60}K_{60}$  combined with the use of two inoculants: nitrogen-fixing and phosphorus-mobilizing. The combination of HiCoat Super Soy and RhizPi demonstrated the highest energy efficiency coefficient. Similar results were achieved with systems using minimal fertilization and only one of the two inoculants.

Developed recommendations for agricultural practices propose that to enhance the return on mineral fertilizers in sod-podzolic loamy soils of the Small Polissya region (Western Forest-Steppe),  $P_{60}K_{60}$  should be applied before plowing, ammonium sulfate at a rate of  $N_{30}$  should be used before sowing, and HiCoat Super Soy and RhizPi inoculants should be applied. On poorer soils, if necessary, a split nitrogen application system ( $N_{30}$  before sowing +  $N_{30}$  as top dressing) can be implemented, and instead of inoculants, a nitrogen stabilizer in the soil, such as N-Lock™ (1.7 L/ha), should be applied before sowing. If ammonium nitrate is used instead of ammonium sulfate, either with a single application rate of  $N_{30}$  before sowing or with top dressing  $N_{30}$  during the budding phase, it should be combined with a nitrification inhibitor to prevent the suppression of nodule formation in soybeans.

**Keywords:** soybean, nitrogen fertilizer, soil, nitrapyrin, inoculant, nitrates, nitrous oxide, nitrogen nutrition testing, protein, fat, yield.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України

1. Коцюба Б. І. Вплив азотних добрив, нітрапірину та інокулянтів на зернову продуктивність сої у Малому Поліссі. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. Вип. 105, Част. 1, 2024. С. 324-337. DOI: 10.32782/2415-8240-2024-105-1-324-337.
2. Коцюба Б. І. Урожайність сої за різних систем азотного удобрення, застосування нітрапірину та інокулянтів насіння. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького. Серія: Сільськогосподарські науки*, 2024, т 26, № 101. С. 194-204. doi: 10.32718/nvlvet-a10131.
3. Коцюба Б. І. Чинники й закономірності формування зернової продуктивності сої на дерновому глейовому ґрунті Малого Полісся. *Агронаука і практика*. Вип. 3, Ч. 4, 2024. С. 17-31. DOI: 10.32636/agroscience.2024-(3)-4-3
4. Гнатів П. С., Литвин О. Ф., Іванюк В. Я., Лагуш Н. І., Шестак В. Г., Коцюба Б. І. Створення й апробація програмного забезпечення статистичного моделювання вірогідності результатів агрономічних експериментів. *Вісник ЛНУП. Агрономія*, 2022, 26: 157-162. Doi.org/10.31734/agronomy2022.26.157 (Здобувачем узагальнено матеріал, здійснено статистичну обробку даних та колективно сформульовані висновки).
5. Гнатів П. С., Іванюк В. Я., Полюхович М. М., Шестак В. Г., Оліфір Ю. М., Коцюба Б. І., Баранський Д. В. Оптимізація азотного удобрення темно-сірого опідзоленого ґрунту Західного Лісостепу за використання інгібітора нітрифікації. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького. Серія: Сільськогосподарські науки*, 2023, т. 25, № 98. С.132-141. doi: 10.32718/nvlvet-a9822. (Здобувачем зібрано й узагальнено теоретичний матеріал, описано методи досліджень та колективно сформульовані висновки)

**Статті у міжнародних виданнях, що включені до наукометричних баз  
(Scopus, Web of Science)**

6. Shestak V., Hnativ P., Ivaniuk V., Olifir Y., Szulc W., Rutkowska B., Spychaj-Fabisiak E., Vega N., Parkhuc B., Kachmar O., Kocyuba B., Bahaj T. 2023. Dynamics of the forms of nutrient nitrogen in Greyic Luvic Phaeozem when regulating their resources with fertilizers and nitrapyrin applied to winter barley. *Journal of Elementology*, 28(1): 41-58. DOI: 10.5601/jelem.2023.28.1.2352. (Scopus, Web of Science). (Здобувачем здійснено пошук та узагальнення наукових джерел, підготовлено ілюстрації до статті та колективно сформульовані висновки).

**Інші публікації**

7. Коцюба Б. І., Станкевич А. П. Вплив інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі на формування продуктивності сої у Малому Поліссі на Заході України. *«Мікробіологія в сучасному сільськогосподарському виробництві»*. Матеріали XVII Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції молодих вчених, 28 серпня 2024 року, м. Чернігів. 2024. С. 62-64 (Здобувачем підготовлено текст статті та сформульовано колективні висновки).

8. Kotsiuba B., Hnativ P., Ivaniuk V. Influence of nitrogen fertilizers, nitrapyrin, and inoculants on soybean yield formation in the Male Polissia region on gleyed soddy loam soil. *Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXV Міжнародного науково-практичного форуму, 02–04 жовтня 2024 року*. ЛНУП. [Електронний ресурс]. 2024. С. 212-216. (Здобувачем опрацьовано дані по профілю ґрунту, підготовлено текст статті в частині продуктивності сої, сформульовано колективні висновки).

9. Kotsiuba B. I., Hnativ P. S., Ivaniuk V. Ya. Ecologization of soybean cultivation technology on derno-gleyozem soil of the Male Polissya. *Матеріали IX-го Міжнародного з'їзду екологів*. 26.09.2024. <https://conferences.vntu>.

edu.ua/index.php/ecology/ecology2024/schedConf/presentations. *(Здобувачем опрацьовано дані агрохімічних показників ґрунту, зроблено розрахунки та підготовлено текст статті, сформульовано колективні висновки).*

10. Коцюба Б. І., Гнатів П. С., Іванюк В. Я. Зміна кислотності ґрунту під впливом систем удобрення сої, застосування стабілізатора нітратів та азотного інокулянта. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Актуальні проблеми агропромислового виробництва України: стратегії стійкості сільськогосподарського сектору під час війни та у післявоєнний період» (19 листоп. 2024 р.). Львів-Оброшине, 2024. (161 с.) С. 53-55 *(Здобувачем виконав експеримент, проаналізував агрохімічні показники ґрунту, зробив розрахунки та підготував текст статті, колективно сформулював висновки).*

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....</b>	<b>23</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>24</b>
<b>Розділ 1. СПОСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЖИВЛЕННЯ СОЇ У НОВИХ РЕГІОНАХ ЇЇ ВИРОЩУВАННЯ ТА У ЗАХІДНОМУ ЛІСОСТЕПУ .....</b>	<b>30</b>
1.1. Роль азоту у живленні сої на різних ґрунтах та у різних умовах гідротермічного режиму.....	31
1.2. Азотні сполуки у ґрунтах та запаси доступних форм азоту для ґрунтового живлення рослин.....	43
1.3. Сучасні синтетичні інгібітори мікробної активності перетворення азотистих сполук у ґрунті .....	48
1.4. Застосування азотних і фосфорних інокулянтів для покращення мінерального живлення сої.....	52
Висновки до розділу 1.....	57
<b>Розділ 2. МЕТОДИ ПОЛЬОВИХ І ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ СОЇ .....</b>	<b>59</b>
2.1. Програма польових експериментів і лабораторних досліджень.....	59
2.2. Агрохімічні методи дослідження.....	62
2.3. Профіль дернового глейового легкосуглинкового ґрунту на ділянці дослідів.....	64
2.4. Методи оцінки біохімічного складу зерна та економіко-енергетичної ефективності удобрення сої .....	67
2.5. Селекційно-генетичні й технологічні властивості сорту ЕС Ментор, використаного в досліді.....	70

Висновки до розділу 2.....	71
<b>Розділ 3. ВПЛИВ СИСТЕМИ МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ СОЇ НА ПАРАМЕТРИ АГРОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕРНОВОГО ГЛЕЙОВОГО ҐРУНТУ .....</b>	<b>72</b>
3.1. Вплив мінерального удобрення сої на вміст рухомого фосфору та обмінного калію .....	72
3.2. Вплив доз азотного мінерального удобрення та інокуляції насіння на формування ресурсу доступних форм азоту в ґрунті..	74
3.3. Зміни вмісту нітратів у профілі 0-60 см залежно від норм і форм внесення азотних добрив, впливу інгібітора та інокуляції насіння.....	77
3.4. Зміна кислотності ґрунту під впливом систем удобрення сої.....	83
3.5. Закономірності кореляцій параметрів азотного режиму ґрунту залежно від норм удобрення та застосування нітрапірину .....	85
Висновки до розділу 3.....	91
<b>Розділ 4. БІОМОРФОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОСЛИН СОЇ ПІД ВПЛИВОМ УДОБРЕННЯ, НІТРАПІРИНУ ТА ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ.....</b>	<b>93</b>
4.1. Температурний і вологісний режим у 2022-2024 роки росту й розвитку сої.....	93
4.2. Фенологічний розвиток сої .....	100
4.3. Ріст сої і висота утворення нижніх бобів залежно від удобрення, стабілізації азоту та інокуляції насіння.....	104
4.4. Вегетаційна динаміка маси бульбочок сої залежно від систем удобрення та інокуляції.....	106
4.5. Формування бобів та озерненість сої залежно від систем удобрення.....	109
4.6. Стан асиміляційного апарату сої та візуальна оцінка стану посівів .....	112

Висновки до розділу 4.....	119
<b>Розділ 5. ФОРМУВАННЯ ВРОЖАЮ ЗЕРНА СОЇ НА ДЕРНОВОМУ ГЛИБОКОМУ ГЛЕЙОВОМУ ҐРУНТІ МАЛОГО ПОЛІССЯ.</b>	<b>122</b>
5.1. Вплив систем удобрення, стабілізатора азоту та інокулянтів на вроджай зерна .....	122
5.2. Зв'язки дози азоту, вмісту доступних форм азоту та кислотності ґрунту у впливі на продуктивність сої .....	130
Висновки до розділу 5.....	137
<b>Розділ 6. БІОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЗЕРНА СОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ, ВНЕСЕННЯ НІТРАПІРИНУ ТА ВИКОРИСТАННЯ ІНОКУЛЯНТІВ.....</b>	<b>140</b>
6.1. Вміст сирого протеїну у зерні сої.....	141
6.2. Вміст сирого жиру, клітковини та інших речовин .....	144
6.3. Статистичний аналіз і графічне моделювання зв'язків між вмістом у зерні, збір корисних речовин з урожаєм.....	147
Висновки до розділу 6.....	155
<b>Розділ 7. ЕКОНОМІЧНА Й ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОЄДНАННЯ МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ СОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНГІБІТОРА НІТРИФІКАЦІЇ ТА ІНОКУЛЯНТІВ .....</b>	<b>158</b>
7.1. Економічні чинники вирощування сої в Малому Поліссі Заходу України.....	158
7.2. Економічні показники ефективності добрив, нітрапірину та інокулянтів.....	160
7.3. Енергетичні переваги використання добрив, інгібітора та інокулянтів у технології сої .....	167

Висновки до розділу 7.....	173
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>174</b>
<b>ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ .....</b>	<b>177</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>179</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>213</b>
Додаток А. Рисунки до розділу 2.....	214
Додаток Б. Таблиці до розділу 3.....	215
Додаток В. Рисунки і таблиці до розділу 4.....	216
Додаток Г. Таблиці і рисунки розділу 5.....	235
Додаток Д. Таблиці і рисунки до розділу 6.....	241
Додаток Е. Таблиці і рисунки до розділу 7.....	247
Список опублікованих праць за темою дисертації.....	250
Акт і довідка про впровадження.....	253

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Д. р. – діючі речовини

ІСГ Карпатського регіону НААН – Інститут сільського господарства  
Карпатського регіону Національної Академії аграрних наук

$K_{ee}$  – коефіцієнт енергетичної ефективності

ЛНАУ – Львівський національний аграрний університет (до 2022 року)

ЛНУП – Львівський національний університет природокористування

ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького – Львівський національний університет  
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького

п. с. – перед сівбою

ф. б. – фаза бутонізації

ЮНЕП – програма ООН з довкілля (ЮНЕП) (англ. UNEP, United Nations  
Environment Programme)

EPA – United States Environmental Protection Agency – Агентство з охорони  
навколишнього середовища Сполучених Штатів

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Міжурядова група  
експертів зі зміни клімату)

Naa – амонійна селітра

Nsa – сульфат амонію

N-Lock™ – нітрапірін

Yara N-Tester™ – польовий тестер азотного живлення листків

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Соя, як нова культура для Лісостепу Західного, просувається все більше на північ і стає дуже рентабельною для виробництва в рільництві заходу України (Бахмат і Чинчик, 2011; Лихочвор та ін., 2021; Петриченко та ін., 2008). Соя містить приблизно 40% білків у зерні, ключовим складником яких є азот. Тому потреба в асиміляції цього елемента рослинами у великій кількості доведена (Господаренко, 2024а).

На відміну від пшениці, кукурудзи та інших не бобових культур, посіви сої здатні здобути більшість необхідного азоту шляхом симбіотичних взаємовідношень з бактеріями роду *Rhizobium* (Господаренко, 2024б). Азотфіксація відбувається завдяки складному біотичному механізму взаємообміну між соєю та ґрунтовими бактеріями – *B. japonicum*. Бактерії отримують цукор від сої для використання в якості джерела енергії, а соя отримує азот від бактерій, які черпають його із повітря. Такі взаємовідношення вигідні як для сої, так і для бульбочкових бактерій. Приблизно 50-60% асимільованого рослиною азоту надходить до неї від фіксації елемента з атмосфери (Господаренко, 2024а; Salvagiotti et al, 2008). Решту 40-50% асимільованого азоту соя засвоює з ґрунту. Це означає певне вичерпування ґрунтових ресурсів азоту унаслідок мінералізації ґрунтової органічної речовини або з розкладання рослинних решток культур-попередників. Проте, часто сою успішно вирощують без внесення азотних добрив у ґрунт. Азотне удобрення інколи замінюють інокуляцією ризобіями насіння для сівби на полях, де раніше сої не вирощували (Кобилинський, 2024).

Системи удобрення сої, розроблені на основі численних досліджень, показують, що в ґрунті, зазвичай, недостатньо ресурсів мінерального азоту (Лихочвор та ін., 2021; Господаренко, 2024а). Тому фіксований бульбочковими бактеріями азот лише частково покриває потреби сої в цьому елементі. За планування високих врожаїв може виникати дефіцит азоту для живлення рослин. Водночас, спеціальні дослідження показали, що підвищений рівень

концентрації нітратного азоту в ґрунті може гальмувати процес фіксації азоту симбіотичними бактеріями сої, яка фізіологічно потребує великої кількості енергії (Ohyama et al, 2011, 2012; Fujikake et al, 2003). З огляду на це, застосування інгібіторів нітрифікації при вирощуванні сої може бути ефективним (Hege & Offenberger, 2011).

Для оптимального функціонування азотфіксуючих бактерій має велике значення і кислотність ґрунту, яку підвищують нітрати (Yashima et al, 2005; Della et al, 2020). Виробники зацікавлені, а науковці працюють над збільшенням здатності сої фіксувати адекватну кількість азоту для високої врожайності (Бабич і Бабич-Побережна, 2011а і 2011б; Бахмат, 2009; Іванюк, 2012а; Соя..., 2016).

Тому, предметом важливого зацікавлення практиків і науковців є закономірності формування врожаю зерна сої залежно від системи азотного удобрення, побудованої на різних формах і дозах азотних добрив, внесених у період бутонізації і цвітіння культури, у поєднанні з використанням мікробіологічних інокулянтів в нових для культури умовах Малого Полісся.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи факультету агротехнологій та екології Львівського національного університету природокористування за темою 2021-2025 рр.: «Розробити екобезпечні прийоми удосконалення технологій вирощування культур, що забезпечують оптимальний врожай та відтворення родючості ґрунтів в умовах зміни мезоклімату в західній Україні» (державний реєстраційний номер 0111U001253).

**Мета наших досліджень** – обґрунтувати оптимальну систему удобрення із використанням різних норм і форм азотних добрив, інгібітора нітрифікації та мікробних інокулянтів для максимальної продуктивності сої, збереження родючості ґрунту і безпеки довкілля у Малому Поліссі.

*Завдання дослідження:*

- вивчити сучасну наукову літературу і методики для розв’язання проблеми азотного живлення сої у Західному Лісостепу і Малому Поліссі;
- відслідкувати вплив погодних умов років дослідження і проаналізувати кліматичні тенденції в регіоні;
- дослідити вплив різних форм азотних добрив та інгібування нітрифікації на азотне мінеральне живлення сої і на вміст поживних елементів у ґрунті;
- дослідити вплив доз азотного мінерального удобрення у різні фази росту культури на формування симбіотичних бульбочок сої;
- вивчити вплив азотного живлення сої на процеси формування компонентів урожаю;
- дослідити вплив різних доз і форм азотного мінерального добрива та інокуляції насіння мікробними препаратами на урожай і якість зерна сої;
- визначити економічну та енергетичну ефективність розроблених елементів технології сої.

**Об’єкт досліджень:** врожайність сої залежно від систем азотного мінерального удобрення сої, впливу інгібітора нітрифікації та інокулянтів в умовах Малого Полісся.

**Предмет досліджень:** азотне удобрення сої за різних доз і строків внесення форм добрив, інгібування нітрифікації та оброблення насіння інокулянтами, зв’язки біометричних показників росту й розвитку, якісних характеристик зерна, агрохімічних показників ґрунту із зерновою продуктивністю культури.

**Робоча гіпотеза.** Тематика досліджень сформована на основі актуальної проблеми з’ясування найефективніших форм, норм і строків внесення азотних добрив під сою, а також доцільності застосування нітрапірину та інокулянтів. Передбачалося, що для отримання найвищого врожаю зерна високої якості потрібно поєднувати оптимальні дози внесення азотних добрив з урахуванням фаз критичного живлення рослин, застосування нітрапірину для стабілізації нітратоутворення, яке може шкодити розвитку симбіотичного апарату, та

ефективності інокулянтів сої. Ефективність застосування різних форм азотних добрив, їх норм внесення та інокулянтів сої в Малому Поліссі заходу України не вивчена і тому застосування їх не мало наукового обґрунтування.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В умовах району Малого Полісся (Лісостеп Західний) *уперше*:

- обґрунтовано багатоваріантну систему азотного удобрення сої, що включає внесення в один-два прийоми оптимальних норм і форм мінеральних добрив, інгібітора нітрифікації N-Lock™, азотфіксувального інокулянта ХайКот Супер Соя та фосформобілізаційного інокулянта Райс Пі, які у різних комбінаціях забезпечили врожайність культури в діапазоні від 3,55 до 3,95 т/га;

- доведена технологічна перевага застосування перед сівбою сої норми азоту  $N_{30}$  у формі сульфату амонію на фоні осіннього внесення  $P_{60}K_{60}$  та ефективність використання інгібітора нітрифікації (особливо у разі підживлення культури у фазі бутонізації), який знижує концентрацію нітратів в орному й підорному пластах на 21,1% (від 7,1 до 5,6 мг/кг), сприяє активізації бульбочкоутворення на 40% (від 0,43 до 0,72 г у фазі квітання), покращує асиміляцію азоту за показником фотооптичного тестування листків, і в підсумку забезпечує врожай зерна 3,90 т/га у середньому за три роки;

- з'ясовано закономірності формування якості зерна під впливом технологічних заходів, які за поєднання сульфату амонію  $N_{30}$  на фоні  $P_{60}K_{60}$  та інгібітора нітратів сприяють встановленню співвідношення протеїнів, жирів та клітковини 37,2 – 20,1 – 4,6%. За поєднання  $N_{30}$  на фоні  $P_{60}K_{60}$  з мікробними інокулянтами ХайКот Супер Соя (*B. japonicum*) і Райс Пі (*B. amyloliquefaciens*) це співвідношення поліпшувалося за рахунок зменшення часток клітковини та вологи і становило 38,6 – 20,3 – 3,3%.

- удосконалено методику оцінки ризиків для довкілля від втрат нітратної та закисної форми азоту за внесення азотних добрив та апробовані способи їх попередження;

– отримала подальший розвиток технологія економічно ефективного вирощування сої в умовах Малого Полісся заходу України.

**Методи досліджень.** У роботі використано такі сучасні методи:

Польовий – для спостережень за ростом і розвитком сої, погодними умовами досліджень, для оцінки елементів технології вирощування культури.

Лабораторний – для оцінки змін показників родючості ґрунту та якості зерна.

Вимірювально-ваговий – для дослідження динаміки росту рослин, формування елементів продуктивності та обліку урожайності.

Математико-статистичний – для з'ясування достовірності цифрових результатів досліджень і графічного моделювання закономірностей.

Розрахунково-порівняльний – для обчислення економічної та енергетичної ефективності нових елементів технології.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичні рекомендації на основі висновків дисертаційної роботи впроваджені у виробництво ПАФ ім. М. Шашкевича (с. Вузлове), що забезпечило надвишку врожаю сої 0,31-0,37 т/га, максимальну білковість зерна 38,1%, умовно чистий прибуток 2200-6100 грн/га та сукупний прибуток на площах 27 і 48 га відповідно 59400 і 292800 грн (акт впровадження).

Матеріали нових дисертаційних результатів залучені у програми таких дисциплін «Системи удобрення польових культур», «Рослинництво», «Аналітичний агрохімсервіс та управління якістю ґрунтів» та «Екологічні основи застосування добрив і моніторинг родючості ґрунтів» на профільних кафедрах Львівського національного університету природокористування (довідка про впровадження).

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є особистим науковим проектом, виконаним в рамках дослідницької програми на здобуття наукового ступеня доктора філософії на основі особистих теоретичних узагальнень, проведених польових і лабораторних досліджень. Здобувач

здійснив патентний пошук, огляд наукових джерел, опрацював сучасні методи, виконав польові експерименти і супутні аналітичні роботи. Автор виконав статистичні розрахунки точності досліджень, узагальнив результати та обґрунтував висновки і пропозицій для впровадження. Здобувач підготував та опублікував наукові праці. Особистий внесок у публікаціях обґрунтований.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовані: на XXV-му Міжнародному науково-практичному форумі «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій» (02–04 жовтня 2024 р., Львів-Дубляни) у Львівському національному університеті природокористування; на IX-му Міжнародному з'їзді екологів. Секція Агроєкологія (26 вересні 2024 р., Вінниця) у Вінницькому національному технічному університеті; на XVII-ій Всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції молодих вчених «Мікробіологія в сучасному сільськогосподарському виробництві» (28 серпня 2024 р., Чернігів); на XIII Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні проблеми агропромислового виробництва України: стратегії стійкості сільськогосподарського сектору під час війни та у післявоєнний період» (19 листоп. 2024 р., Львів-Оброшине).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових публікацій, у тому числі: три одноосібних та дві у співавторстві статті у фахових наукових виданнях України, одна стаття у міжнародному виданні, що включене до наукометричних баз Scopus і Web of Science, чотири публікації у матеріалах наукових міжнародних і вітчизняних заходів.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота має вступ, сім розділів, висновки, список використаної літератури і додатки. Загальний обсяг дисертації 254 сторінок, основної частини 160 сторінок. Вона ілюстрована 49 рисунками, 15 таблицями та шістьма додаткам на 40 сторінках. Список використаних джерел становить 275 назв, у тому числі 178 іноземних.

## Розділ 1

### СПОСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЖИВЛЕННЯ СОЇ У НОВИХ РЕГІОНАХ ЇЇ ВИРОЩУВАННЯ ТА У ЗАХІДНОМУ ЛІСОСТЕПУ

Соя є важливою культурою для харчування людини та корму для тварин [79; 5; 8]. Світове виробництво сої зростає, особливо, в Північній і Південній Америці. Зерно сої містить високий відсоток білків (близько 35–40%), і потребує значної кількості азоту для живлення порівняно з іншими культурами.

Рослини сої утворюють кореневі бульбочки за допомогою ризобій [12; 16; 20; 84], а ризобії можуть фіксувати атмосферний  $N_2$  і віддавати фіксований азот рослині-господарю. Крім того, соя може поглинати азот, як правило, нітрат із ґрунту або з добрив [8; 91].

Кількість загального засвоюваного азоту в пагонах пропорційна врожаю насіння сої через фіксацію азоту або поглинання азоту, а доступність азоту є дуже важливою для вирощування сої [53; 58; 193; 105]. Підтримання високої та тривалої активності азотфіксації є дуже важливим для високої продуктивності сої.

Проте, застосування хімічних азотних добрив зазвичай пригнічує утворення бульбочок і фіксацію азоту. Нітрат у прямому контакті з вузликовою частиною коренів спричиняє серйозне пригнічення росту бульбочок та фіксації азоту. Віддалена частина бульбочок, що не контактує з нітратами, не відчуває негативного ефекту або є він є незначним. Глибоке внесення азотних добрив із повільним вивільненням сечовини з покриттям, або нітрату кальцію сприяє, за даними [201], зростанню урожайності зерна та якості сої без пригнічення фіксації азоту.

У першому розділі проаналізуємо наукові відомості про роль азоту у живленні зернових бобових культур і формуванні їх продуктивності. Важливими є аспекти розуміння перетворення азотних сполук у ґрунтах та

доступні форми азоту для кореневого живлення. Вагомий вплив на ці процеси мають природно-кліматичні, гідротермічні умови і функції ґрунтової мікробіоти. Застосування синтетичних регуляторів мікробної трансформації азотних сполук давно відомі у США і ЄС. Їх використовують для запобігання вимиванню нітратів та емісії закису азоту в атмосферу. Вагомі дослідні результати удобрення зернових бобових культур, у тому числі сої у країнах Євросоюзу і у Світі опубліковані у зарубіжних виданнях. Але для нас найважливіший досвід вирощування високих врожаїв сої в Україні, зокрема в Малому Поліссі та Західному Лісостепу.

### **1.1. Роль азоту у живленні сої на різних ґрунтах та у різних умовах гідротермічного режиму**

Соя (соєві боби – *Glycine max* (L.) Merr.) походить зі Східної Азії [79], але зараз широко культивується в тропічних, субтропічних і помірних кліматичних районах з оптимальною середньою температурою 20-30°C. Зерно сої є одним із найважливіших джерел білка для людей і свійських тварин. Крім того, соя є основною олійною культурою на планеті, що забезпечує 58% світового виробництва зерна олійних культур [141; 5; 8]. Сою вирощують у широкому діапазоні широт, від екватора до високих широт не менше 50 град. пн.ш. [79; 199; 201], хоча кожен сорт адаптують до вузького діапазону широт.

Сою, як джерело азоту, культивували в усьому світі з давніх часів через високий вміст білків та ліпідів [264]. Це одна із найважливіших сільськогосподарських культур у світі. Світове виробництво зерна у 9-ти лідируючих країнах, куди входить Україна, становило понад 356 млн тонн на рік [243; 141]. Найбільше сої вирощують (рис. 1.1) у Бразилії (124,0 млн. т), США (96,8 млн. т) і Канаді (51,0 млн. т). Україна виробляє від 3,7 млн. тонн соєвого зерна станом на 2021 рік до 4,8 млн. т станом на 2023 рік [170].

Вельми потужним стимулом до виробництва сої є економічна мотивація. На початок 2024 року ціна зерна сої коливається в межах 9000-10000 грн /тонну [77]. Але на виробничу собівартість зерна безпосередньо впливають затрати на знаряддя і техніку, паливно-мастильні матеріали, посівний матеріал, амортизацію. Ці параметри обов'язково враховують для отримання вигідної для підприємства нової закупівельної ціни на сою [170; 253].

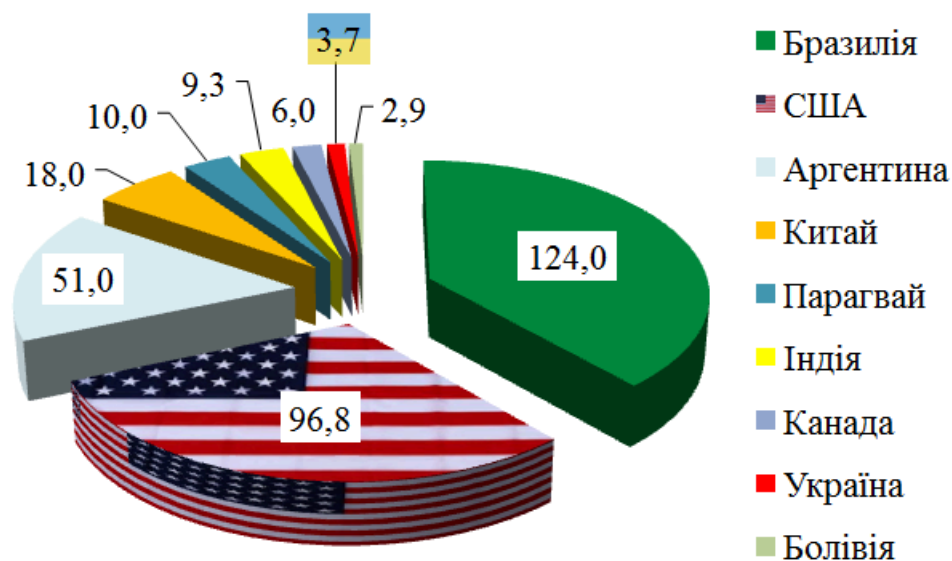


Рис. 1.1. Найбільші обсяги виробництва зерна сої у деяких країнах, млн. т [243; 141]

Виробництво рослинної олії із сої сягає найбільших обсягів серед рослинних олій (30%) [79; 4; 5; 199]. Соя використовується безпосередньо як їжа в Японії та деяких країнах Азії. Нещодавно соєвий білок був визнаний як здоровий і смачний і використовується в таких продуктах, як тофу і соєвий соус. Соевий шрот, який залишається після екстрагування рослинної олії, містить близько 50% білка з добре збалансованими амінокислотами. Тому соєвий шрот часто використовують, як корм для тварин.

Оскільки соєві боби є важливим джерелом білків для людей і худоби, глобальний попит на багату білком соєву муку неухильно зростає [4; 243; 141]. Протягом десятиліть селекції, орієнтованої на врожайність, середня

концентрація білків в зерні сої знизилася [191; 221]. Щоб максимізувати цінність соєвого шроту для кінцевих споживачів, необхідна максимальна концентрація білків у шроті 47,5%, а нижча якість соєвого шроту може підштовхнути ринок кормів до заміни соєвого шроту альтернативними джерелами білка. Таким чином, виробникам сої потрібні стратегії для підтримки або підвищення концентрації білків у зерні.

Добре відомо, що вирощування сої покращує родючість ґрунту [9]. Бульбочки утворюються рослиною сої, а атмосферний азот фіксується азотфіксуючими бактеріями в коренях-бульбочках [82; 258; 161; 108; 197; 223]. Газоподібний перетворюється на  $\text{NH}_4^+$  нітрогеназою з цих бактерій, що фіксують азот, і цей  $\text{NH}_4^+$  надходить у ґрунтове середовище.

Соя є рослиною короткого дня, і цвітіння викликається, коли довжина дня коротша за критичну. Ця чутливість до фотоперіоду слабка або відсутня у сортів сої, адаптованих до високих широт, які повинні починати цвітіння на початку літа для дозрівання в безморозну пору [108; 9]. Сою, зазвичай вирощують на окультурених землях, де агрогенні ґрунти – це гетерогенне середовище, в якому умови, що впливають на ріст і різноманітність мікробів, сильно коливаються в просторі та часі.

Азотні добрива відіграють важливу роль у підтриманні потреби зернових бобових культур у поживних речовинах і є основним джерелом живлення для утворення білків та перетворення енергії [2; 18; 250]. Статистика показує, що зростання внесення азотних добрив призвело до збільшення врожайності агрокультур у світі більше, ніж на 40% [18; 273; 186; 89].

Азот є однією з основних поживних речовин, необхідних для росту та розвитку сої. Рослини сої отримують азот із трьох джерел [148; 198; 108; 220]: 1) азот, отриманий від біотичної фіксації газоподібного азоту кореневими бульбочками [223]; 2) потреба сої в азоті може бути задоволена азотом ґрунту, або 3) з мінеральних чи органічних добрив [200]. Високий рівень азоту в ґрунті перешкоджає симбіотичній фіксації азоту, і за цих умов ґрунт забезпечує

більшість потреб рослини в азоті [258; 222]. І навпаки, фіксація газоподібного азоту забезпечує більшість потреб рослин в азоті в умовах низького вмісту азоту в ґрунті. Третє джерело – азот із застосованого добрива [200; 248; 249; 205; 187]. Для отримання оптимальної врожайності сої необхідно використовувати як біологічну фіксацію газоподібного азоту, так і засвоєння азоту корінням сої [110]. Азотні добрива, що застосовуються до сої, базуються на потребах рослин в азоті під час розвитку бутонізації до утворення бульбочок, що є вирішальним для росту та розвитку сої [82; 105]. Фіксація газоподібного азоту починається у сої через 14 днів після сівби лише тоді, коли її культивувати в умовах оптимальної температури та вологості. Тому невелика кількість азотних добрив під час сівби може бути корисною для раннього вегетативного росту [148].

I. M. Didur et al [131] досліджували в умовах правобережного Лісостепу вплив системи удобрення на продуктивність сої. Автори встановили ефект від різних норм мінеральних добрив і різних способів обробки комплексом мікроелементів Мікрофол Комбі. Досліджено формування врожайності зерна сої сортів різних груп стиглості. Автори провели енергетичний аналіз і визначили, що найбільш ефективною є модель технології вирощування сої обох сортів Горлиця та Вінничанка, що передбачає внесення мінеральних добрив із розрахунку  $N_{30}P_{60}K_{60}$ , передпосівний період. Обробка насіння комплексом мікроелементів Мікрофол Комбі (150 г/т), разом з підживленням тим же препаратом у нормі 0,5 кг/га у фазі бутонізації, що забезпечувала найвищий показник енергії посівів. Коефіцієнт становить 2,53 для сорту Горлиця та 2,75 для сорту Вінничанка, тобто відповідно 0,89 і на 0,99 більше контролю. Автори пишуть, що погодні умови в роки досліджень були контрастними, з відхиленням середньодобових температури й опадів від середніх багаторічних показників. Але ті умови були досить сприятливими для продуктивності сортів сої. Ґрунт у досліді I. M. Didur et al [131] був бідніший, за виключенням рухомого фосфору, а  $pH_{\text{сол.}}$  становить 5,0-6,0. Висновки були зроблені наступні: найкращі умови для забезпечення врожайності зерна у кількості 3,01–3,22 т/га

сформувалися за умови внесення мінеральних добрив з розрахунку  $N_{30}P_{60}K_{60}$ , передпосівної обробки насіння комплексом Мікрофол Комбі мікроелементи (150 г/т), разом з підгодівлею тим же препаратом у нормі 0,5 кг/га у фазі бутонізації, що забезпечує найвищий показник енергетичного коефіцієнта висіву.

Е. Е. Kenedy et al [168] з'ясували вплив азотних добрив на фізіологію сої, компоненти врожайності, урожайність зерна та вміст білків в умовах південно-східної частини США. Автори підсумовують, що фізіологія сої, урожайність і якість отриманого зерна можуть сильно відрізнятися і залежать від генетики, умов та технології вирощування культури. Удобрення азотом нечасто застосовують на сої. Але воно може вплинути на врожайність і споживчу якість зерна.

Результати внесення азотних добрив сильно відрізняються в різних дослідженнях [232]. Щоб перевірити, чи певні фізіологічні реакції можуть бути пов'язані з позитивною агрономічною реакцією на азотні добрива, були проведені численні польові дослідження в різноманітних умовах. Оцінювали 5 генотипів V-VII груп стиглості. Незважаючи на те, що гідротермічні умови та генотип мали значний вплив на більшість фізіологічних ознак та вимірних компонентів врожайності, внесення азоту істотно взаємодіяло з погодними умовами. Зокрема це позначалося на концентрації протеїнів в зерні, концентрації олії, врожайності. Внесений азот впливав на відсоток азоту, отриманого з атмосфери в листках протягом періоду наповнення зерна. Напрямок впливу азоту на концентрацію білків відрізнявся в різних погодних умовах, збільшуючи концентрацію білків за сприятливої погоди та знижуючи концентрацію білків у прохолодних дощових умовах. Ефект застосування азоту не відрізнявся для різних сортів, включених у дослідження. Реакції фотосинтезу та фіксації азоту на застосування азоту не були чітко пов'язані з реакцією концентрації білків в зерні [151]. Спеціальна рекомендація щодо норм азоту для

прогнозованих гідротермічних умов є найкращим варіантом для покращення білковості зерна.

Suryantini & H. Kuntastuti [214] вивчили вплив внесення азотних добрив на виробництво сої за різних попередників. На реакцію посівів сої на азотні добрива на полях впливає структура посівів. Результати дослідження виявили, що вирощування сої після попередника, що виснажує ґрунт, потребує більшої кількості азотних добрив. 30 кг/га карбаміду або 90 кг/га амонійної селітри підвищило врожай зерна від 0,5 т/га (контроль без удобрення) до 3,4 т/га. При цьому, в разі сівби сої після сої вона не потребувала додаткової дози азотних добрив для підвищення врожайності зерна і забезпечувала до 3 т/га зерна.

Z. Gai, J. Zhang & C. Li [148] дослідили вплив норм основного азотного добрива на активність коренів сої, фотосинтез листків та врожайність зерна. Автори наводять припущення, що азот, який надходить із симбіотичної  $N_2$ -фіксації, не завжди є достатнім для максимізації врожайності зерна сої. На північному сході Китаю прохолодна температура ґрунту під час сівби може обмежити активність ґрунтових мікробів і, отже, потенційно затримати фіксацію азоту та, можливо, вегетативний ріст на ранній стадії [251].

Існує багато факторів, що впливають на азотфіксацію сої та реакцію на внесенне азотне добриво. Автори [147; 209; 109] повідомили, що рН ґрунту, температура та вологість впливають на реакцію сої на внесенне азотне добриво.

У дослідженні R. L. Cooper [124; 197] було зазначено, що азот, внесений перед сівбою, був корисним для росту сої, враховуючи, що бульбочки на коренях сої не утворювалися принаймні через 9 днів після появи сходів. Крім того, стартове азотне добриво може постачати азот до тих пір, поки не почнеться біологічна фіксація газоподібного азоту кореневою бульбочкою [161].

Багато дослідників ретельно вивчали вплив азотних добрив на врожайність зерна сої. Застосування стартового азоту спрямоване на забезпечення сої легкодоступним ґрунтовим азотом під час розвитку сходів і, як було показано, підвищує врожайність зерна сої [248; 247; 134]. Проте внесення азотних добрив

під час сівби може знизити фіксацію газоподібного азоту сої та її врожай. Результати в південній Алабамі показали, що врожайність зерна та ріст рослин були вищими, коли в якості стартового добрива застосовували азот. На додаток до врожайності зерна сої, стартове азотне добриво збільшило висоту рослин і біомасу. D. R. Jeffery et al [165] зазначили, що велика кількість азотних добрив значно підвищує врожайність зерна сої при зрошенні і на богарі, а фіксація газоподібного азоту може обмежувати врожайність зерна сої, вирощуваної як в зрошуваних, так і в незрошуваних середовищах Середнього Півдня США. Польові експерименти, проведені Р. Вогоомандан et al [111] вказали, що густота рослин 45 особин на метр квадратний і низький рівень азотних стартових добрив (40 кг/га) були оптимальними і підвищували врожайність зерна сої в умовах їх дослідів. Дослідження, проведені в прохолодному середовищі на півночі Великих рівнин, показали, що низькі норми (<15 кг/га) стартового азотного добрива під час сівби підвищили врожайність зерна сої порівняно з відсутністю застосування азотних добрив протягом 9 з 11 років.

Дослідники N. K., Fageria V. C., Baligar & R. B. Clark [138] узагальнювали вплив азотних добрив на врожайність зерна сої, але результати були непереконливими. Були численні повідомлення про вплив азотних добрив на бульбочки коренів сої. Однак доступно мало інформації про вплив стартового азотного добрива на фотосинтез листя, активність коренів і їх взаємозв'язок з урожаєм зерна. Потрібна конкретна інформація про те, як азотні добрива впливають на врожайність зерна сої. Фотосинтез є основним шляхом для виробництва рослинами сухої речовини, і, за оцінками, від 75 до 95% сухої ваги врожаю виходить за рахунок фотосинтезу [167; 151]. Азот, отриманий із добрив у цьому дослідженні, ймовірно, впливає на активність коренів сої, фотосинтез листя та, як наслідок, на її врожайність. Висновки з досліджень були зроблені такі. Гідротермічні умови протягом вегетаційного періоду суттєво вплинули на врожайність зерна сої ( $P < 0,05$ ), причому у 2013 році врожайність зерна була вищою. Стартові азотні добрива значно підвищили врожайність зерна в 2014

році. Цю значну реакцію врожайності зерна на надходження азоту в 2014 році автори пояснили значним збільшенням активності коренів, швидкості фотосинтезу, індексу площі листя та питомої ваги листя на стадіях розвитку від квітання до побуріння бобів у досліді. Застосовані азотні добрива під час сівби суттєво вплинули на активність коренів, фотосинтетичні параметри на ранній стадії бутонізації і квітання, але значної відповіді не спостерігалось на стадії побуріння бобів у 2013 році. Це могло бути пов'язано з різними опадами на пізній стадії вегетації між двома роками. Приріст урожаю зерна за рахунок  $N_{25}$ ,  $N_{50}$  і  $N_{75}$  становив 40,39 кг/га, 77,93 кг/га і 49,87 кг/га відповідно в 2013 році та 18,71 кг/га, 83,27 кг/га і 61,96 кг/га відповідно в 2014 році порівняно з контролем без азоту. Різниця в урожайності зерна, отримана в дослідженні, може бути адекватною для компенсації додаткових витрат на добрива. Таким чином, зазначається, що внесення стартового азотного добрива під час сівби входить у діючу практику виробництва. Результати показали, що в Китаї під час сівби необхідно внести певну кількість стартового азотного добрива.

Велику увагу дослідженням та оцінці амонійного і нітратного живлення рослин приділяли українські вчені [70; 71; 52; 53; 54; 58; 27; 40]. Дослідженнями було встановлено, що з форм азотних сполук для рослини однаково важливі як аміак, так і нітрати. У дослідях, проведених з метою виявлення переваги, чи рівнозначності для рослини окисненої чи відновленої форми азоту, амонійний азот як правило застосовується частіше, ніж нітратний.

На рисунку 1.2 показано основні фізіологічні процеси засвоєння поживних речовин рослинами сої, пов'язані з ростом і формуванням врожаю зерна. Щоб реалізувати високий потенціал врожайності, соя повинна підтримувати високі темпи фотосинтезу та накопичувати велику кількість азоту у різних формах – окиснених чи відновлених.

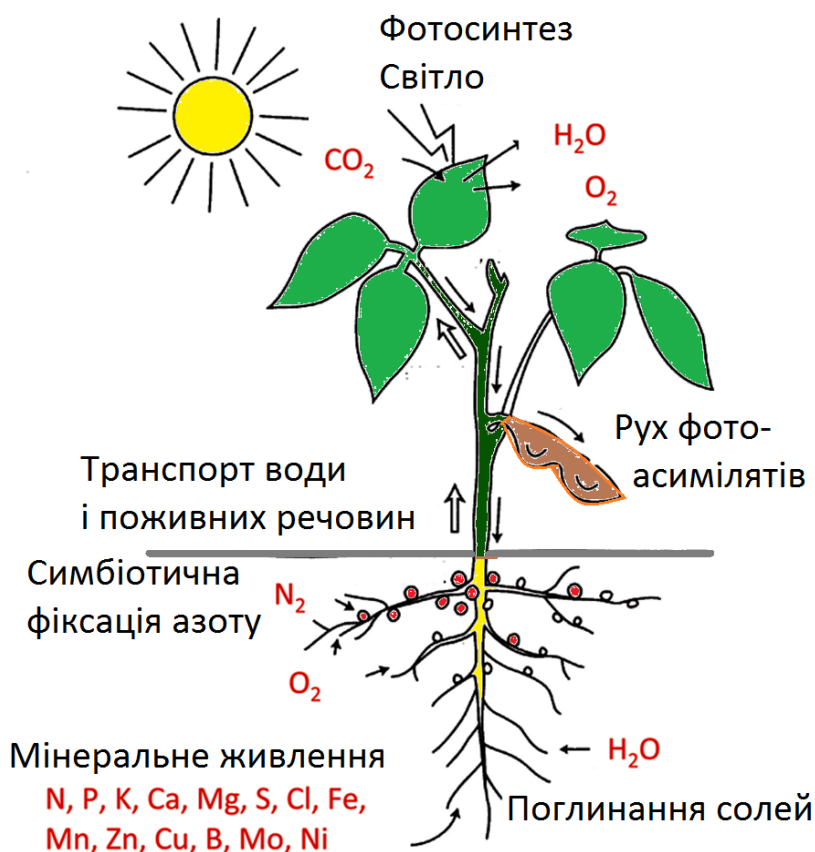


Рис. 1.2. Схема фізіологічних процесів асиміляції поживних речовин соєю з різних джерел [201] .

Насінина сої велика і зберігає поживні речовини в сім'ядолях, щоб підтримувати початковий ріст приблизно через 7–10 днів після сівби. Розвиток сої поділяється на період вегетативного розвитку та період репродуктивного розвитку на початковій стадії квітування. Стадії розвитку сої описали T. D. Setiyono et al [227] методом P. D. Lancashire et al [177]. У випадку сої вегетативний ріст листків, стебел і вузлів збігається з репродуктивним ростом до стадії формування зерна. Період вегетативного росту та репродуктивного росту різняться залежно від сорту та місця культивування, але вегетативний період росту становить приблизно два місяці. Період репродуктивного розвитку становить близько три місяці у типовому кліматі для вирощуванні сої [41].

Високий урожай сої вимагає великої кількості азоту, і рослини повинні продовжувати засвоювати азот як на вегетативному, так і на репродуктивному етапах. Загальна кількість азоту, асимільованого пагонами рослин, сильно корелює з урожаєм зерна сої [201]. Рослини сої засвоюють лише приблизно 20% загального поглиненого азоту від початку росту до фази квітування. Тому безперервне засвоєння рослинами азоту після початку фази квітування є необхідне для нормального росту та високої врожайності зерна сої.

Для отримання високого врожаю зерна сої дуже важлива хороша бульбочкоутворюваність, висока і тривала активність фіксації азоту, оскільки доступність азоту в ґрунті, як правило, недостатня для підтримки росту сої. Азот з насіння та хімічні стартові добрива втрачаються за кілька тижнів після сівби. На формування бульбочок сої та ріст бульбочок впливають різні умови ґрунту.

Для високого врожаю зерна сої необхідний як оптимальний вегетативний, так і репродуктивний ріст. Фотосинтез листям і достатнє, але не надлишкове поглинання води та поживних речовин корінням є дуже важливими для підтримки енергійного росту рослин. Крім того, соя може фіксувати атмосферний азот ( $N_2$ ) за допомогою кореневих бульбочок, які є симбіотичними органами з ґрунтовими бактеріями, так званими ризобіями [78].

За повідомленням Т. Ohyama et al [201], А. J. Ohlrogge & Е. J. Camprath розрахували потребу в поживних речовинах високоврожайної сої, яка давала 8,96 т/га загальної сухої речовини, включаючи 3,4 т/га зерна та 5,60 т/га побічної вегетативної частини. Для виробництва одного кг зерна сої потрібно приблизно 1024 г карбону, 963 г кисню та 131 г водню через фотосинтез із  $CO_2$  у повітрі та  $H_2O$  з ґрунту. З поживних речовин, отриманих із ґрунту, N, K, Ca, Mg, P і S потрібні близько 93, 32, 23, 10, 9 і 7 г відповідно. Хоча кількість мікроелементів, таких як Cl, Fe, Mn, Zn, Cu, B і Mo, дуже мала, але вони вкрай необхідні для росту сої.

Е. Е. Kenedy et al [168] вважають, щоб покращити рівень врожайності та вміст корисних речовин в зерні, необхідно більше зрозуміти, як фізіологія рослин пов'язує внесення азотних добрив і результати складу зерна в різних регіонах виробництва сої. У США більшість досліджень, які об'єднують фізіологію в дослідження азотних добрив і складу зерна, були зосереджені на вирощеній на Середньому Заході соєві боби раннього терміну дозрівання [246; 125]. Кліматичні та едафічні умови на південному сході США відрізняються від середнього заходу США [100], а соя, вирощена на півдні США, як правило, має вищу концентрацію протеїну в насінні, ніж соєві боби, вирощені на Середньому Заході [220]. Отже, автори у цьому дослідженні з'ясували: 1) реакцію сої більш пізньої групи зрілості на внесення азотних добрив у різних середовищах на південному сході США та 2) взаємозв'язок між асиміляцією вуглецю, фіксацією азоту, врожайністю та врожайністю, компонентів і складу зерна в цих умовах сівби.

Україна впроваджує Директиви Ради Європи 91/676/ЄЕС від 12 грудня 1991 р. про захист вод від забруднення, спричиненого нітратами з аграрних джерел (Нітратна директива..., 2020). Нітратною директивою передбачена низка документів, які є керівними в секторах економіки. Зокрема, це «Методика визначення зон, вразливих до забруднення нітратними сполуками» і «Кодекс кращих аграрних практик» [11].

За узагальненнями В. Павленка [69] 239 дослідів в 25-ти країнах світу підтверджують позитивний вплив інгібіторів нітрифікації на метаболізацію азоту в ґрунті, засвоєння азоту з добрив та ефективність азотних добрив, зниження втрат шляхом денітрифікації і вимивання нітратів, покращення азотного живлення культур, підвищення їх врожаю і якості зерна. В Україні опубліковані поодинокі дослідження дії стабілізаторів азоту, наприклад лише при удобренні кукурудзи [55] та ячменю озимого [93;228].

А. Głowacka et al [152] дослідили вплив внесення азоту та сірки на ознаки продуктивності сої в кліматичних умовах південно-східної Польщі –

безпосередній близькості до Малого Полісся. Результати досліджень підтверджують сприятливий вплив сірки на врожайність бобових рослин, таких як люпин вузьколистий, квасоля польова [206], квасоля звичайна та квасоля. Інші автори також підтвердили позитивний вплив удобрення бобових сіркою на вміст і засвоєння азоту.

Вплив внесення азоту на врожайність і якість сівби сої також є частим предметом досліджень [205]. Більшість досліджень реакції сої на внесення азотних і сірчаних добрив проводилася в країнах з теплим кліматом [209; 176]. Існує кілька досліджень, проведених в умовах помірного клімату, особливо з новими генетично не модифікованими сортами, як впливало застосування азоту та сірки на врожайність та хімічний склад зерна сої [188].

Наприклад, основна мета дослідження A. Głowacka et al [152] полягала в тому, щоб визначити, скільки (і коли) азотних і сірчаних добрив потрібно використовувати для отримання найкращих продуктивних характеристик при вирощуванні сої в кліматичних умовах південно-східної Польщі. Результати показали, що найвищий урожай зерна був отриманий у комбінації з 60 кг азоту, внесеного  $\frac{1}{2}$  до сівби +  $\frac{1}{2}$  після появи сходів (ВВСН 73-75) і  $\frac{3}{4}$  перед сівбою +  $\frac{1}{4}$  після появи сходів. У цих комбінаціях сірка суттєво не впливала на врожайність зерна. У решті внесення азоту внесення сірки значно збільшило врожайність зерна. Беручи до уваги врожайність і хімічний склад зерна сої, автори рекомендували [152] удобрення азотом 60 кг/га двома порціями –  $\frac{1}{2}$  або  $\frac{3}{4}$  перед сівбою, а решту – під час розвитку бобів і зерна – у поєднанні з внесенням сірки.

В умовах Малого Полісся на Заході України, використання інгібіторів не практикували раніше, а імпорту промислових препаратів коливається з роками. Проте, про ефективність різних форм, строків і способів внесення інгібіторів нітрифікації разом з мінеральними добривами під цукрові буряки є дані в центральній Україні [21] та у Пасмовому Побужжі [228]. Але проблема

виросування високих врожаїв сої на оптимальних фонах азотного живлення без втрат азоту в умовах Малого Полісся не опрацьована [46; 82; 171; 172; 228].

## 1.2. Азотні сполуки у ґрунтах та запаси доступних форм азоту для ґрунтового живлення рослин

Потреба сої в азоті для продукування зерна велика. Тому високий урожай сої вимагає великої кількості азоту з різних джерел. Рослини засвоюють азот як у ранніх фазах вегетації, так і в фазах квітання й плононошення. Багато польових даних показали [201], що загальна кількість азоту, асимільованого пагонами рослин, сильно корелює з урожаєм зерна сої (рис. 1.3). Одна тонна зерна сої потребує асиміляції приблизно 70–90 кг азоту, що приблизно в чотири рази більше, ніж у зернових [161].

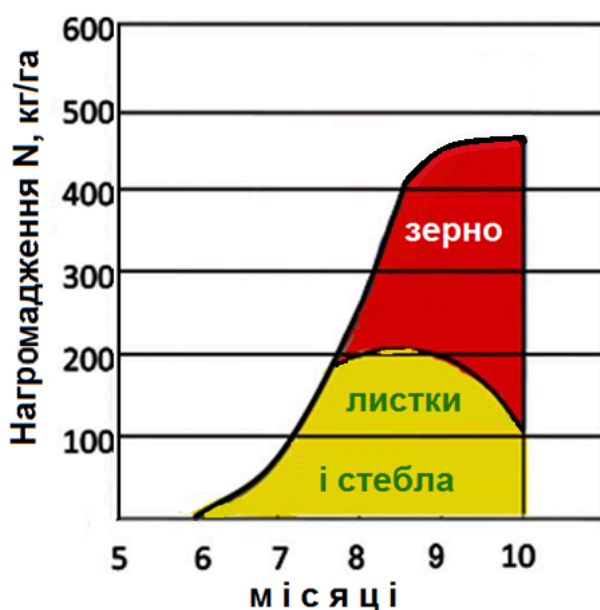


Рис. 1.3. Динаміка нагромадження азоту у надземній масі сої упродовж червня-вересня за дослідженнями Т. Охуама [201].

Вченими показано співвідношення між загальною кількістю азоту у фазі сходів сої і на стадії квітання та врожайністю зерна [201]. Встановлена

лінійна кореляція ( $r = 0,86$ ) між урожаєм зерна та кількістю накопиченого азоту в пагоні. F. Salvagiotti et al [223] розглянули зв'язки між урожайністю зерна, поглинанням азоту, фіксацією азоту та азотними добривами на основі 637 опублікованих даних. За цими даними було отримано середнє збільшення врожайності зерна сої на 13 кг на кг збільшення азоту в надземній частині, що еквівалентно 77 кілограмам азоту, необхідного для вирощування однієї тонни зерна.

У практиці [119; 178; 204; 255] все частіше застосовують методи оцінювання фотосинтетичного апарата рослин за показниками його фотооптичних властивостей для діагностування асиміляції азоту.

Низка дослідників, застосувавши метод фотоіндукованої флуоресценції [167; 14; 274; 56; 66], встановили значну залежність активності хлорофілу від зміни екофакторів: освітленості, температури, водного режиму, живлення, сольового стресу. Важливо, що індукована флуоресценція живих листків дозволяє без порушення нативності об'єкта спостереження досліджувати фотооптичні властивості асиміляційного апарату рослин [167; 160]. За результатами досліджень низки авторів [66] встановлено, що в посуху і за азотного голодування відбувається зниження стаціонарної енергізованості фотосинтетичних мембран, що є причиною зміни параметрів флуоресценції листків рослин [101]. У їх повідомленні описаний флуорометр. Аналіз опублікованих робіт [56] з цієї тематики дає підставу розглядати флуоресцентні параметри, як фізичні показники фізіологічного стану, котрий може відображати функціональну адаптацію асиміляційного апарата до умов зовнішнього середовища.

Польові дослідження в штаті Айові (США) були проведені в п'яти місцях упродовж 1999-2000 років [220]. При сівбі в рядки вносили 45 і 90 кг д.р. азоту на гектар і порівнювали з контролем без азоту. Дослідження показало незначний і нестабільний вплив норми внесеного азотного добрива на врожайність зерна та компоненти якості на окремих дослідках. Не було істотного впливу на

врожайність зерна – Надвишка від застосування азоту становила лише на 39 кг/га. Концентрації протеїну, олії та клітковини в зерні були однаковими як із застосуванням азоту, так і без нього. Питання потреби у внесенні додаткового азоту для підвищення врожайності сої було у центрі уваги багатьох досліджень протягом останніх чотирьох десятиліть. Однак більшість експериментів були вузькоспецифічними для конкретного регіону та зосереджені на впливі одного фактора, пов'язаного з азотом, що призвело до обмежених локальних висновків.

S. Mourtzinis, G. Kaur, J. M. Orlowski et al [193] зібрали дані окремих експериментів, проведених у США, які вивчали вплив внесення азоту на врожайність сої. Створена база інформації включала 207 лоркалітетів досліджень (схеми експерименту і роки) для загалом 5991 показників урожаю сої, удобреної азотом. Автори оцінили одноразове або розділене удобрення азотом ґрунту, позакореневе внесення підживлення, терміни внесення (перед сівбою, по вегетації тощо). Норма азоту була вивчена в діапазонах від  $N_0$  до  $N_{560}$ . Із загальної мінливості врожайності 68% впливу було пов'язано з умовами зони, погодою і ґрунтом, тоді як лише невелика частка цієї мінливості ( $< 1\%$ ) була віднесена до кожної змінної норми азоту. Усереднене для всіх експериментів одноразове внесення азоту і розділене внесення азоту дали на 60 і 110 кг/га більшу врожайність, ніж контрольний варіант без азоту.

Розділене внесення азоту [193] більш, ніж одним методом (наприклад, внесення перед сівбою в ґрунт і позакореневе внесення) призвело до збільшення урожаю на 120 кг/га, порівняно з ділянками з відсутністю азоту. Загалом, детальний аналіз показав, що удобрення азотом мали достовірний, але незначний вплив на врожайність сої. Враховуючи зростаючу потребу щодо збільшення виробництва харчових продуктів і білка, вкрай важливо продовжити перевірку ефективності прийомів (спосіб внесення, час і норма) внесення азоту під сою у дослідженнях. Це автори рекомендують робити у різних природних умовах та за різних системи вирощування у важливих сільськогосподарських регіонах [193].

Зв'язок між загальною кількістю асиміляції азоту та врожаєм зерна в посівах сої у фазі дозрівання бобів описали S. Tamagno et al [246; 109; 223]. Рослини сої засвоюють лише близько 20% загального азоту до початкової стадії від сходів до квітання. Тому безперервне засвоєння азоту після початкової фази квітання є необхідним для гарного росту та високої врожайності зерна сої.

Для нормального росту й розвитку сої, отримання високого врожаю зерна дуже важливими є сприятливі умови бульбоутворення і тривала активність фіксації азоту [246; 222; 197]. Це спричинено недостатніми ресурсами азоту в ґрунті, а азот в насінні та хімічні стартові добрива використовуються за кілька тижнів після сівби. На формування бульбочок сої та ріст бульбочок впливають ресурси вологи, рН, живлення, а також кліматичні умови, такі як сонячна радіація, температура, кількість опадів тощо. Соя утворює кореневі бульбочки, пов'язані з ґрунтовими бактеріями, брадирізобіями, і може фіксувати атмосферний азот. Соя може поглинати та використовувати неорганічний азот, такий як нітрати та аміак із ґрунту чи добрив. Як правило, високий урожай сої отримують на полі з високою родючістю ґрунту або з внесенням органічних добрив.

Постачання низької та постійної концентрації азоту з ґрунту або органічного гною може підтримувати ріст сої без пригнічення утворення бульбочок та активності фіксації азоту. Тим не менш, висока концентрація мінерального азоту пригнічує утворення бульбочок і азотфіксацію, особливо нітрати. Найбільш поширений на гірських ґрунтах, неорганічний азот серйозно пригнічує утворення бульбочок і азотфіксацію [259; 246; 222; 134].

Автори [199] провели порівняння моделей асиміляції азоту, що надходить від насіння + стартовий N + ґрунтовий N та від фіксації  $N_2$  між варіантами з низькою та високою врожайністю. Рослини сої засвоюють азот із трьох джерел: азот, отриманий із симбіотичної фіксації газоподібного азоту кореневими бульбочками [19; 20], азот, що поглинається з мінералізованого азоту ґрунту, і

азот, отриманий із добрив під час внесення. Одна тонна зерна сої потребує асиміляції приблизно 70–90 кг азоту, що приблизно в чотири рази більше, ніж у небобових зернових. Для максимального врожаю зерна сої необхідно використовувати як фіксацію газоподібного азоту кореневими бульбочками, так і поглинання азоту коренями з ґрунту [267;163]. Як підоснова фізіологічних процесів, фіксація  $N_2$  часто недостатня для підтримки інтенсивного вегетативного росту, що призводить до зниження врожайності зерна. З іншого боку, велика кількість азоту часто пригнічує розвиток бульбочок і активність фіксації азоту, а також прискорює старіння бульбочок, що також призводить до зниження врожайності зерна. Крім того, велике надходження азоту з добрив або з ґрунту спричиняє надмірно рясний ріст пагонів, що призводить до вилягання та поганого формування стручків. Таким чином, азотні добрива під сою не вносяться або вносяться лише невелика кількість азотних добрив як «початковий азот».

Початкове утворення бульбочок переважно відбувається в базальній частині головних коренів, але ці вузлики руйнуються раніше, і багато бульбочок утворюється на бічних коренях під час репродуктивної стадії [239].

Добре відомо, що розвиток кореневих бульбочок і активність фіксації азоту пригнічуються, коли бульбочкові корені піддаються впливу високих концентрацій комбінованої форми азоту, особливо нітрату, основної хімічної форми неорганічного азоту в ґрунтах [198; 164; 223]. Була висунута гіпотеза, що виникають численні ефекти інгібування нітратів, такі як зменшення кількості бульбочок, маси бульбочок і активність фіксації атмосферного азоту, а також прискорення старіння або розпаду вузликів, тому інгібування нітратів не можна пояснити простим способом [164; 222]. Крім того, на вплив нітратів на ріст бульбочок впливають концентрація нітратів, розміщення в середовищі та період обробки [261; 262], а також види бобових рослин.

Було запропоновано багато гіпотез щодо причин інгібування нітратами утворення бульбочок і фіксації азоту, таких як дефіцит вуглеводів у бульбочках,

інгібування за допомогою зворотного зв'язку продуктом метаболізму нітратів, таким як аспарагін або уреїди (алантоїнова кислота та алантоїн) [252], а також зниження дифузії кисню у вузлики, що обмежує дихання бактероїдів [153].

### **1.3. Сучасні синтетичні інгібітори мікробної активності перетворення азотистих сполук у ґрунті**

G. W. Randall et al [212; 213] у своїх дослідженнях з'ясував, що оскільки азот має найбільшу здатність з усіх поживних речовин бути втраченим з ґрунту, використання інгібіторів стало популярним у агросекторі і підтвердив дані. Такі розробки для мінімізації втрат азоту продиктовані турботою про навколишнє середовище, та через високі ціни на добрива.

Більшість розроблених інгібіторів ефективно працюють, запобігаючи втратам нітратів та амонію [143]. Денітрифікація та вимивання є найпоширенішими процесами, які викликають найбільше занепокоєння щодо втрат азоту ґрунтом. Обидва ці процеси відбуваються в умовах вологого ґрунту. Денітрифікація [245] полягає у відновленні нітратів до нітритів ( $\text{NO}_2^-$ ) до газоподібних форм, тоді як вимивання – це просто профільне переміщення азоту із ґрунтовою водою. Вимивання часто викликає більше занепокоєння, оскільки нітрат розчинний у воді і може легко проникати ґрунтові води і зрештою потрапляє у поверхневі та ґрунтові водні джерела [143].

Інгібітори нітрифікації сповільнюють перетворення амонію в нітрат шляхом інгібування активності бактерій *Nitrosomonas*. Загальні назви таких сполук такі: дициандиамід (DCD) і нітрапірін [275]. Інгібітори втрати азоту дають виробникам можливість застосовувати азот, коли це найбільш зручно для їх внесення. Таким чином, ефективність осіннього та ранньовесняного застосування азоту може бути збільшуватися при застосуванні інгібіторів завдяки зменшенню його втрат [190].

Rory F. Degenhardt et al [126] описують, що втрата азоту з ґрунту є значною перешкодою для максимізації врожайності та прибутковості рільництва у Канаді. Підтримання азоту в стабільній і доступній для рослин формі  $\text{NH}_4^+$  за допомогою інгібіторів нітрифікації обмежує потенційні втрати азоту ґрунтом через денітрифікацію або вимивання. У період з 2013 по 2015 рік Rory F. Degenhardt et al [126] було проведено двадцять одне дослідницьке випробування в основних регіонах вирощування зернових і олійних культур Канади для оцінки ефективності двох комерційно доступних нітрапіринових продуктів, eNtrench™ і N-Serve, для стабілізації ґрунтового азоту у формі  $\text{NH}_4^+$  і убезпечення від втрати азоту. Сечовина, сечовина+аміачна селітра (КАС) або аміачні добрива вносили восени і навесні в ґрунт. Осіннє застосування нітрапірину призвело до збільшення азоту на 21-63%  $\text{NH}_4$  і на 10-19% більше загального мінерального азоту під час весняного відбору проб після відтавання ґрунту порівняно з не стабілізованим добривом. Весняне застосування нітрапірину призвело до більшого накопичення  $\text{NH}_4$  протягом принаймні 8 тижнів після обробки, і воно підвищило загальний мінеральний азот до 25%, порівняно з контролем без інгібіторів. Результати свідчать про те, що eNtrench і N-Serve є корисними інструментами для виробників, які хочуть захистити свої інвестиції в азот, оптимізувати потенційну врожайність і підвищити гнучкість часу внесення азоту.

Отже нітрапірин у комерційних препаратах eNtrench і N-Serve був успішно протестований під час випробувань на полях у регіонах Канади, де вирощуються зернові та олійні культури. Осіннє та весняне внесення сечовини, КАС та аміаку підтримувало азот у формі  $\text{NH}_4^+$  протягом критичних періодів втрат і, отже, зберігало більше мінерального азоту, доступного рослинам, у ґрунті порівняно із застосуванням не стабілізованих добрив [212; 213].

За даними мережі численних дослідів на легких супіщаних ґрунтах частка використаного азоту добрив становить до 54%, на суглинкових – 74% [185]. Розрахунковий коефіцієнт використання азотних добрив до тепер був на

низькому рівні і коливався від 42 до 47% [194; 273]. Це засвідчує, що більше половини азоту з добрив втрачається кількома ймовірними шляхами. Це – вимивання  $\text{N-NO}_3$  [265], звітрювання в атмосферу закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ) та аміаку [210; 242; 256]. Малий коефіцієнт засвоєння рослинами азоту з азотних добрив не тільки зумовлює економічні втрати, але й створює вагомі проблеми у довкіллі [25; 97; 136; 149; 275], оскільки стає фізичним чинником негативних змін у кліматі планети [121; 122]. Це і забруднення водних екосистем [265; 275], евтрофікація вод, кліматичні аномалії, втрата біотичного різноманіття, забруднення атмосфери [120; 130] та ґрунтів [95; 96; 149; 242; 273].

Звітрювання закису азоту  $\text{N}_2\text{O}$  з ґрунтів залежать від мікробної ензимної нітрифікації та процесів денітрифікації, а також із небіотичною хемоденітрифікацією. Мікробне продукування  $\text{N}_2\text{O}$  внаслідок ензимних реакцій залежить від наявності в ґрунті великої кількості азоту добрив у формах амонію і нітратів [117; 214; 269; 270; 260]. Розрахунок річних потоків закису азоту в циклі екосистем здійснили Р. М. Groffman et al [154], а з оброблюваних ґрунтів у помірному кліматі – С. Roelandt, B. van Wesemael & M. Rousevell [217] та К. Butterbach-Bahl et al [118]. Автори довели, що викиди парникових азотних газів залежить від родючості ґрунтів [192; 135; 146; 216], гідротермічного режиму та форм добрив [173; 174; 180], а також від характеру рослинного покриву, що асимілює азот [224; 245].

В деяких аграрних регіонах світу від 1980 до 2010 року обсяги асиміляції азоту аграрними культурами в рільництві зросли у два рази, але внесення азотних добрив було збільшено у три рази [179; 186; 250]. Втрати азоту з азотних добрив, внесених під культури, на першому етапі оцінюють у 35-40% у вигляді  $\text{NH}_3$ , на другому етапі 10% втрачається від випаровування  $\text{N}_2\text{O}$  і наступний етап – вимивання 15-25%  $\text{NO}_3^-$  на перезволожених ґрунтах. Тому актуальність правильного і своєчасного застосування інгібіторів нітрифікації для запобігання втрат азоту важливе упродовж тривалого періоду часу і традиційно вважається економічно ефективним [93].

Як допоміжні засоби, стабілізатори азоту можуть істотно уповільнювати процес нітрифікації амонійного азоту в ґрунті і їх широко використовують, як запобіжник втрат азоту та покращення коефіцієнта використання азоту з добрив, а також підвищення віддачі синтетичних добрив врожайністю культур [130; 146; 208; 229; 230; 321; 236]. Стабілізатори ензимної активності мікробів-нітрифікаторів ефективні для покращення безпеки довкілля і нарощування виробництва зерна озимої пшениці в центральній Монтані (США) [67], маніпулюючи способами і термінам внесення азотних добрив та у Баварії (Німеччина) [158].

Асортимент інгібіторів нітрифікації на ринку сьогодні різноманітний [191]. Найбільш використовуваними та дослідженими стали три комерційні інгібітори нітрифікації [231]. Повідомляють, що нітрапірин був першим комерційним інгібітором, який з'явився 1974 року як N-Serve® (виробник Dow Agrosiences LLC, Індіанаполіс, IN). Нітрапірин є летким, швидко злітається, і тому в основному використовується для внесення в ґрунт у вигляді робочого розчину.

2-хлор-6-(трихлорметил) піридин – нітрапірин, є бактерицидною субстанцією для внесення в ґрунт, функціонує, як інгібітор утворення ензимів аміномонооксигенази і нітритоксидоредуктази. Завдяки пригніченню утворення ензимів він запобігає гідролізу сечовин археями, *Nitrosomonas*, *Nitrospira* та можливо й іншими. Його дія на бактеріоценоз ґрунту і пригнічення нітрифікації триває 8–10 тижнів. Нітрапірин розкладається як у ґрунті, так і в рослинах [44; 137]. Технологи пропонують добре відомі його препарати N-Serve™, Instinct™, N-Lock™, які використовують від 1974 року.

Нітрапірин сповільнює та частково призупиняє процес нітрифікації – перетворення амонію на нітрит, утримуючи більше азоту у доступній формі, що вноситься із синтетичними добривами, у легкозасвоюваній для аграрних культур формі [236; 238; 266]. Окрім того, стабілізація нітрифікації запобігає втраті ґрунтового азоту через вимивання або змив нітратів ( $\text{N-NO}_3$ ), або

газоподібних викидів азоту ( $N_2$ ) та закису азоту ( $N_2O$ ) [228; 183; 184; 189; 196; 236; 268; 271; 272].

Уже 45 років у США нітрапірин використовують фермери, а також науковці досліджують його в різних країнах, як інгібітор нітрифікації з метою підвищення врожайності культур і зменшення впливу на довкілля азотних добрив, які використовують в сільському господарстві [86; 196; 254]. У тривалому польовому експерименті [145] за різних технологій використання угідь доведений короткостроковий вплив інгібіторів нітрифікації на кількість і експресію окиснювачів аміаку та нітритів [212; 213].

Деградація нітрапірину швидка. Він розкладається як у ґрунті, так і в рослинах. Сама сполука, як правило, не зберігається в природі. Первинним розпадом є гідроліз трихлорметилової функціональної групи, в результаті чого в першу чергу утворюється 6-хлорпіколінова кислота, яка є єдиним виявленим залишком в метаболізмі рослин.

#### **1.4. Застосування азотних і фосфорних інокулянтів для покращення мінерального живлення сої**

За оброблення інокулянтами насіння важливо, щоб якомога більше бактерій вижило після сівби до початку проростання сої, ключовою характеристикою якості продукту є щільність ризобій. Використання вищої за норму, дози інокулянту [42] не становить загрози навколишньому середовищу та зазвичай призводить до збільшення утворення бульбочок і врожайності зерна до 25%. Також інокуляція позитивно впливає на польову схожість і виживання рослин, їх висоту й індивідуальну продуктивність, зменшує витрати на хімічні засоби захисту та підвищує родючість ґрунту.

Усі сорти дослідів [84] позитивно відреагували на використання інокулянтів, особливо хороші показники у сої були з інокулянтом Хай Кот

Супер + Хай Кот Супер Extender і суміші Хай Кот Супер + Хай Кот Супер Extender.

Як узагальнює М. Фурдига [88], дослідження з дієвості Райс Пі® мають позитивні результати на соняшнику, кукурудзі, пшениці, сої та інших культурах, що вказує на його ефективність. Цей препарат вирішує проблеми доступності фосфору в ґрунті для культур. Експериментально обґрунтовано вплив Райс Пі® на доступність для рослин важкодоступних форм фосфору та засвоєння його за низьких температур. Препарат забезпечує формування високої продуктивності за рахунок вдалого старту на початкових фазах вегетації. Він загалом покращує живлення та захист культур від впливу абіотичних факторів середовища.

Дія інокулянтів складна і багатоступенева [195]. Зокрема, бактеріальні організми, що фіксують газоподібний атмосферний азот, його не засвоюють, а у формі аміаку постачають до цитоплазми клітини-господаря, де він швидко трансформується у глютамінову кислоту і глютамін [182]. Далі у формі амідних чи уреїдних (у сої) сполук, транспортується в організм рослин [156].

Фіксація азоту або біологічна фіксація азоту – це хімічний процес, за допомогою якого молекулярний азот, який має міцний потрійний ковалентний зв'язок, перетворюється на аміак ( $\text{NH}_3$ ) або споріднених азотистих сполук, як правило, у ґрунті чи водних системах [22; 235], але також у промисловості. Азот у повітрі – це молекулярний азот, відносно неактивна молекула, метаболічно марна для всіх мікроорганізмів, крім кількох. Біологічна фіксація азоту або діазотрофія є важливим процесом, опосередкованим мікробами, який перетворює газоподібний азот на аміак за допомогою білкового комплексу нітрогенази. У бульбочках коренів бобових газоподібний азот з атмосфери перетворюється на аміак, який потім асимілюється в амінокислоти (будівельні блоки білків), нуклеотиди (будівельні блоки ДНК і РНК, а також важлива енергетична молекула АТФ) та інші клітинні компоненти, такі як вітаміни, флавіони та гормони [240; 257].

Yuki Ono et al [202] випробували застосування амонійної селітри та сечовини і встановили, що вони по різному змінюють концентрацію уреїдів, сечовини, амінокислот та інших метаболітів у соку ксилеми та в органах рослин сої. Рослини сої утворюють кореневі бульбочки з симбіотичними ґрунтовими бактеріями, такими як *Bradyrhizobium*, і вони можуть фіксувати атмосферний азот.

Yuki Ono, Masashige Fukasawa & Kuni Sueyoshi [202] експериментально довели, що рослини сої утворюють кореневі бульбочки та фіксують атмосферний азот, одночасно використовуючи комбінований азот, поглинений коренями. Автори у дослідженні показали, що рослини сої з бульбочками отримували 5 мМ азоту, як нітрату, амонію або сечовини протягом трьох діб. Концентрації метаболітів як у соку ксилеми, так і в кожному органі були подібними між обробкою амонієм і сечовиною. Позитивні кореляції спостерігали між концентраціями уреїдів і сечовини в соку ксилеми, а також у коренях і листі, хоча жодних кореляцій не спостерігалось між концентраціями сечовини та аргініну.

Поточна оцінка глобальної ефективності використання фосфору для виробництва зернових не реалізована. Ефективність використання фосфору автори [129] визначали за світовими площами зібраних зернових, загальним виробництвом зерна та споживанням фосфорних добрив від 1961 до 2013 року. Ефективність використання фосфору у світі на зернових культурах розраховувалася як балансовим, так і різницеvim методами. Використовуючи балансовий метод, поглинання фосфору врожаєм зернових культур ділили на внесені фосфорні добрива.

За інформацією F. Solangi et al [234], за дефіциту фосфору бобові знижують фіксацію азоту з атмосфери в обмін на більшу перевагу поглинанню ґрунтового азоту коренями.

У 1961 році світове споживання фосфорних добрив [129] становило 4 770 тис тонн і зросло до 16 662 тис. тонн у 2013 році. Це означає 3,5-кратне

збільшення внесення фосфору протягом 53 років. Ефективність використання фосфору, оцінена балансовим методом, становить 77%. За допомогою різницевого методу оцінка ефективності фосфору для виробництва зернових у світі оцінила 16%.

Фосфор є важливим макроелементом для рослин, і тому є важливим компонентом добрив, особливо для ґрунтів з його дефіцитом. Фосфобактерії регулярно пропонуються як біоінокулянти для рослин, які вирощуються на ґрунтах з дефіцитом фосфору, як більш екологічна альтернатива внесенню фосфору. Хоча відомо, що інокуляція фосфобактерій може впливати на ріст і живлення фосфором рослини-господаря, основні реакції на молекулярному рівні досі не були повністю з'ясовані.

P. J. Barra, S. Pontigo, M. Delgado, L. & Parra-Almuna et al [106] вирощували рослини протягом 45 діб у присутності та без удобрення фосфором та інокуляції фосфобактеріями в двох ґрунтах з різною біодоступністю фосфору. Результати показали, що незалежно від наявності фосфору в ґрунтах, інокуляція фосфобактерій забезпечує «ефект посилення» фосфорного удобрення на розвиток, живлення та пом'якшення окисного стресу в рослин. Це було підтверджено вищою біомасою, підвищеним вмістом фосфору та меншим пошкодженням клітин у тканинах інокульованих рослин. Таким чином, замість того, щоб бути альтернативою внесенню фосфатів добрив, фосфобактерії можуть бути перспективним доповненням до фосфорного удобрення в ґрунтах з дефіцитом елемента і потенційно зменшити норми внесення фосфатів.

Вісім штамів бактерій, що демонструють високі рівні мобілізації фосфоритів, були виділені з ґрунтів [107]. П'ять штамів виділяли неорганічний фосфор до 600 мкг/мл з фосфориту як єдиного джерела фосфору. Три штами викликали значне збільшення сухої маси пагонів і живої ваги бульбочок. Приріст сухої маси врожаю коливався від 40 до 134%. Біомінералізація фосфоритів цими елітними штамами може стати екологічно чистою

альтернативною хімічним добривам, головним чином на нейтральних і лужних ґрунтах [107].

Фосфор є важливою поживною речовиною з низькою біодоступністю в ґрунті для рослин. Використання фосформобілізуєчих грибів виникло як екологічна стратегія підвищення біодоступності цього поживного елемента [127]. Вплив інокуляції фосфор мобілізуєчими грибами та його комбінації з організмами, що транспортують фосфор (арбускулярні мікоризні гриби) на ріст рослин, відомий. Оцінка впливу фосформобілізуєчих грибів на створення та ефективність симбіозу з рослинами була дуже позитивною. Показники якості ґрунту були вищими при мікробній коінокуляції, зокрема вміст лужної фосфатази зріс, що свідчить про корисну роль грибів у ґрунті. Ця робота підкреслює важливість взаємодії мікробів у ризосфері для стійкості врожаю та покращення якості ґрунту. Подібні дані опубліковані F. Ameen et al [99] для аридних ґрунтів, у яких доступність фосфатів обмежена слабкою їх розчинністю.

Було зроблено висновок [102], що одночасна присутність у бактерій двох найкращих властивостей, що сприяють росту рослин, може мати додатковий ефект не лише на ріст і врожайність пшениці, але й на поглинання фосфору.

Штам *Azotobacter* (SR-4) був визнаний [132] найефективнішим азотфіксатором, оскільки 35,08 мг азоту на грам вуглецю було утворено після 72 годин його життєдіяльності. У польових випробуваннях на рослинах штами продемонстрували значне збільшення висоти рослин, довжини і ширини листя, розміру і кількості плодів на рослині порівняно з контрольними (необробленими) рослинами. Крім того, рослини, спільно інокульовані азотфіксуючим *Azotobacter* і фосфоросолубілізуєчим штамами *A. niger*, мають вищу продуктивність, ніж рослини, оброблені кожним із інокулянтів окремо. Висновок авторів наступний: інокуляція насіння *A. niger* і *Azotobacter* може замінити дорогі та токсичні для навколишнього середовища хімічні добрива екобезпечними та економічно ефективними інокулянтами.

В умовах Західного Лісостепу, де за рік випадає 600-700 мм, а за теплий період 350-500 мм дощів, проблемою може бути вимивання нітратів, особливо на високих фонах удобрення. Надлишковий вміст азоту в ґрунті негативно впливає на стійкість рослин до вилягання і ураження хворобами [50]. Непродуктивні втрати азоту можуть становити 40-70%.

Отже, вивчення впливу мінерального живлення на продуктивність сої в природно-кліматичних умовах достатнього зволоження є актуальне на сучасному етапі динамічних змін клімату і розвитку агровиробництва.

### **Висновки до розділу 1**

1. Питання азотного удобрення сої та джерел асиміляції рослиною різних форм елемента, яке у світових регіонах вирощування культури досліджують давно, вперше постає у Малому Поліссі на Заході України. Це зумовлено великим інтересом зерновиробників регіону до сої, яка поступово просувається на північ разом зі зміщенням північної межі теплої сприятливої для культури зони.

2. Дернові глейові ґрунти південної частини Малого Полісся багаті гумусом, азотом і не кислі. Ці властивості ґрунту в умовах достатку вологи спонукають з'ясувати, чи потребує соя стартового (передпосівного) внесення азотних добрив і в якій нормі і формі, чи доцільне підживлення у вегетацію, або чи достатньо обробки посівного зерна інокулянтами.

3. Численні наукові джерела повідомляють про активне поширення і високу ефективність стабілізаторів нітрифікації за внесення азотних добрив для сповільнення вивільнення різних форм елемента і продовження тривалішої присутності менших концентрацій нітратів на початкових фазах росту сої. Для цієї бобової азотфіксувальної культури практично немає результатів дослідження дії інгібіторів на бульбочкоутворення та врожай зерна. У Малому Поліссі на Заході України таких досліджень взагалі не проводили, але ефективність нітрапірину у Західному Лісостепу доведена на прикладі

покращення живлення ячменю озимого на високих фонах азоту зі збереження стійкості стеблостою та отриманні найвищого врожаю зерна.

4. Виникла потреба розробити програму та здійснити дослідження впливу норм і форм азотних добрив, дії нітрапірину та ефективності азотно-форсфорних інокулянтів на динаміку продукційних процесів, врожай зерна сої та його якість і надати практичні пропозиції виробництву.

Результати досліджень за розділом 1 викладено у публікаціях [46; 171; 172]

## Розділ 2

### МЕТОДИ ПОЛЬОВИХ І ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ СОЇ

Програма досліджень систем удобрення сої передбачала визначення впливу природно-кліматичних і гідротермічних умов вирощування культури у Малому Поліссі, що межує з північною частиною Західного Лісостепу, враховує основні питання активності азотфіксації. Передбачено спостереження за ростом та розвитком рослин, біометрію надземної і підземної фітомаси, встановлення якості зерна. Усі цифрові матеріали отримані у повторюваних польових експериментах і лабораторних аналізах та опрацьовані сучасними статистичними методами.

#### 2.1. Програма польових експериментів і лабораторних досліджень

Робоча гіпотеза нашого наукового пошуку ґрунтується на необхідності вирішення актуальної проблеми виявлення найефективніших форм, норм і строків внесення азотних добрив під сою, а також невідомі аспекти дії нітрапірину та інокулянтів у комбінаціях з формами азоту у мінеральних добривах. Передбачається, що для отримання найвищого врожаю зерна високої якості потрібно з'ясувати оптимальну норму внесення та найкращу форму азотних добрив з урахуванням фаз розвитку рослин, застосування нітрапірину та ефективності інокулянтів сої, вмісту доступного азоту упродовж критичного періоду живлення культури та збереження родючості ґрунту. Ефективність застосування різних форм азотних добрив, їх норм внесення та інокулянтів при сівбі сої в Україні не вивчена і застосування їх ускладнене у практиці.

Технологія застосування інгібіторів нітрифікації на посівах сої в Україні не вивчена і застосування їх ускладнене у практиці. Для досягнення цієї мети ми

запланували вивчити стан проблеми у європейських країнах, США та Японії, дослідити динаміку азоту в дерновому глейовому ґрунті упродовж вегетації сої під впливом рівня і строків азотного удобрення та нітрапірину у формі N-Lok Макс, оцінити вплив рівнів та строків внесення форм азотних добрив на кислотність ґрунту, з'ясувати вплив форм азотних добрив на ріст і розвиток рослин, формування структури врожаю, встановити рівень урожайності та якість зерна залежно від системи удобрення і дати економічну та біоенергетичну оцінку ефективності вирощування культури залежно від системи удобрення.

Основним об'єктом дослідження є системи азотного мінерального удобрення сої в умовах Малого Полісся, які планується вивчити, а також з'ясувати ефективність інгібування нітрифікації та оброблення насіння азотфіксувальними та фосфоромобілізаційними інокулянтами, погодні умови років дослідження, біометричні показники росту й розвитку, якісні характеристики зерна, агрохімічні показники ґрунту.

Досліди проведені при кафедрі агрохімії та ґрунтознавства в рамках ОНП «Агрономія» третього рівня вищої освіти (спеціальність 201 – Агрономія) у Львівському національному університеті природокористування (ЛНУП – Дубляни) впродовж 2022-2024 року. Дослідне поле розташоване у Малому Поліссі, яке за агроґрунтовим районуванням є провінцією Полісся Західного. За фізико-географічним районуванням зони широколистяних лісів, Західноукраїнського краю, Мале Полісся є областю. Ділянка знаходилася біля села Шайноги, на полі з координатами: 50°12'07.8" N та 24°32'52.9" E. (Physical-geographical zoning..., Agro-soil zoning...; <https://www.google.com/maps/place/>). Польові дослідні заклади за загальноприйнятою методикою в агрономії [36; 28].

Поділянкове внесення мінеральних фосфорно-калійних добрив восени здійснювали за допомогою ручного механічного розкидача фірми Solo за схемами дослідів (табл. 2.1) перед оранкою (дод. А, рис. А.1), а азотні добрива

внесені навесні під передпосівну культивуацію, у спеціальних варіантах – у підживлення у фазі бутонізації сої.

Таблиця 2.1

## Схема польового експерименту

№	Варіант досліджу	N, кг/га
1.	Контроль – без удобрення	0
2.	Фон – P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> (*п.ор.)	0
3.	<b>Фон + N<sub>30</sub> – *Nsa (*п.с.)</b>	<b>30</b>
4.	Фон + N <sub>30</sub> – Nsa+нітрапірин (п.с.)	30
5.	Фон + N <sub>30</sub> – Nsa (п.с.)+N <sub>30</sub> – Nsa (ф.б.)	60
6.	Фон + N <sub>30</sub> – Nsa+нітрапірин (п.с.)+N <sub>30</sub> – Nsa (ф.б.)	60
7.	Фон + N <sub>30</sub> – *Naa (п.с.)	30
8.	Фон + N <sub>30</sub> – Naa+нітрапірин (п.с.)	30
9.	Фон + N <sub>30</sub> – Naa+нітрапірин (п.с.)+N <sub>30</sub> – Naa (ф.б.)	60
<b>10.</b>	Фон + N <sub>30</sub> – Nsa (п.с.)+N-мобілізуючі бактерії	30
11.	Фон + N <sub>30</sub> – Nsa (п.с.)+P-мобілізуючі бактерії	30
12.	Фон + N <sub>30</sub> – Nsa (п.с.)+N-мобілізуючі+P-мобілізуючі бактерії	30

Примітка \*: п.ор. – під оранку; Nsa – сульфат амонію; п.с. – перед сівбою; ф.б. – фаза бутонізації; Naa – амонійна селітра.

Технологія вирощування сорту ЕС Ментор – зональна, з оранкою на 20-22 см. Інокуляція насіння виконана за рекомендованою виробником нормою за кілька діб до сівби. Для інокуляції насіння використали препарати ХайКот Супер Соя (виробник БАСФ) (інокулянт+екстендер 12,8 л/га), який містить азотмобілізуючі бактерії (*Bradyrhizobium japonicum* (Kirchner 1896) Jordan, 1982) та Райс Пі (виробник Агрітема) (норма витрати 0,2 кг/т неасіння), який містить фосформобілізуючі бактерії (*Bacillus amyloliquefaciens* Priest et al., 1987). Сівба в оптимальні строки виконана з рекомендованою нормою висіву 550 тис. схожих насінин на га, або 130 кг/га фізичної ваги. Інгібітор нітрифікації

N-Lock™ – нітрапін, вносили ранцевим оприскувачем з витратою водного робочого розчину з розрахунку 300 л/га за схемою досліду у нормі 1,7 л/га під передпосівну культивуацію.

Розмір посівно ділянки 36 м<sup>2</sup>, облікової 25 м<sup>2</sup>. Повторення варіантів триразове, розміщення ділянок систематичне зі зміщенням (дод. А, рис. А.1).

Біометричні та фенологічні спостереження за ходом росту і розвитком рослин здійснювали згідно рекомендацій В. О. Єщенка [36]. За початок фази брали час, коли у неї вступило не менше 10% рослин, повну фазу визначали, коли вона є у 75% рослин [177; 29]. Стан посівів сої упродовж вегетації 2022-2024 років візуально оцінювали за 5-бальною шкалою, запропонованою В. О. Єщенком [36].

У фазі повного досягання бобів здійснили поділянковий суцільний облік урожаю та продублювали облік методом пробних снопів. У відібраних п'ятикратно з площадок 0,5×0,5 м снопах камерально підраховували і виміряли кількість рослин, а у довільно відібраних 25 рослин з пробної площадки обліковували: довжину стебла, висоту прикріплення нижнього боба; кількість бобів на рослині, кількість зернин на рослині; масу зерен з однієї рослини, масу 1000 зерен (за методикою ДСТУ [30]. Біохімічні показники зерна визначали за методикою [29; 76].

## **2.2. Агрохімічні методи дослідження**

Після вибору поля перед внесенням добрив, у фазі сходів і перед збиранням було взято агрохімічні проби ґрунту з глибини 0-20, 20-40, 40-60 см. Аналізи виконали в агрохімічній лабораторії філіалу кафедри агрохімії та ґрунтознавства ЛНУП в Інституті сільського господарства Карпатського регіону НААН.

Зразки ґрунту відбирали і готували до роботи за стандартною методикою ДСТУ [35]. Визначення рН<sub>сол.</sub> проводили потенціометричним методом згідно

ДСТУ [34] при співвідношенні ґрунту до розчину 1:2,5 у соляній витяжці 1 моль/л розчину KCl. Вміст нітратів встановили потенціометрично за допомогою йонселективного нітратного електрода у соляній витяжці 1% розчину алюмокалієвого галуноу при співвідношенні ґрунту до розчину 1:2,5 за ДСТУ [32]. За показниками йономіра і калібрувального графіка робили визначення вмісту нітратів. Стандартні розчини для калібрування приладу і калібрувальний графік приготували з використанням  $1 \cdot 10^{-1}$  М  $\text{KNO}_3$  за методом поступового 10-разового розбавлення його дистильованою водою до концентрації  $1 \cdot 10^{-2}$  М,  $1 \cdot 10^{-3}$  М,  $1 \cdot 10^{-4}$  М. Вміст нітратів у ґрунті, в мг/кг, встановлювали пластах ґрунту 0–20, 20–40 і 40–60 см за величиною  $p\text{NO}_3$  або за формулою (2.1):

$$\text{N-NO}_3 = \text{ant log } (4,54 - p\text{NO}_3). \quad (2.1)$$

Обсяг річного звітрювання закису азоту з ґрунту в атмосферу  $E_{\text{N}_2\text{O}}$  (кг/га) розраховували за формулою (2.2), запропонованою А. Ф. Bouwman [112; 113; 114]:

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = 1 + 0,0125 \cdot N_{\text{д.р.}}, \quad (2.2)$$

де:  $N_{\text{д.р.}}$  – норма удобрення у діючій речовині азоту або запаси нітратів у орному шарі ґрунту.

Запаси нітратів  $Z_{\text{N-NO}_3}$  (кг/га) вираховували за формулою (2.3) обчислення запасів гумусу [31; 61] з використанням перевідних коефіцієнтів мг/кг у відсотки і тонни у кілограми:

$$Z_{\text{N-NO}_3} = N_{\text{N-NO}_3}(\text{мг/кг}) \cdot 0,0001(\%) \cdot 1000(\text{кг}) \cdot 1,47(\text{г/см}^3) \cdot 20(\text{см}), \quad (2.3)$$

де:  $N_{\text{N-NO}_3}$  – вміст  $\text{N-NO}_3$  в орному (0-20 см) шарі ґрунту у мг/кг; 0,0001 – коефіцієнт переводу у%; 1000 – коефіцієнт переводу у кг; 1,47 – щільність орного шару модельного ґрунту у г/см<sup>3</sup>; 20 – товщина орного шару в сантиметрах.

До внесення добрив і закладання дослідів вміст легкогідролізного азоту за методом Корнфільда аналізували згідно ДСТУ [33] у товщі 0–20 см і 20–40 см. Рухомі сполуки фосфору й обмінного калію визначали за стандартними методами ДСТУ [35].

### 2.3. Профіль дернового глейового легкосуглинкового ґрунту на ділянці дослідів

Дерновий глейовий ґрунт дослідного поля (рис. 2.1) утворений на пониженому елементі рельєфу в надзаплавній терасі річки Західний Буг, сформувався на алювіяльних, флювіогляціяльних суглинкових відкладах під лучною, лучно-болотною і дерев'янистою рослинністю в умовах надлишкового постійного підґрунтового і періодично поверхневого зволоження [3; 24].



Рис. 2.1. Локалізація дослідного поля для трирічних досліджень

На властивості і будову дернового ґрунту, впливав намулок паводкових вод. У глейовому ґрунті оглеєним є весь профіль, під перехідним горизонтом залягає сизий і в'язкий глей. За гранулометричним складом ґрунт належить до

легкосуглинкових, вміст мулу і фізичної глини поступово зменшується з глибиною і знову підвищується у ґрунтотвірній породі.

За кислотністю він належить до слабокислих ( $pH_{\text{сол.}}$  5,6-5,8), гідролітична кислотність – дуже низька (1,0-2,8 мг-екв на 100 г ґрунту), вміст гумусу [31] – середній (3-4%). Запаси легкогідролізних сполук мінерального азоту – 121–131, рухомих сполук фосфору – 124–135 та обмінних сполук калію – 104–109 мг/кг ґрунту за методом Чірикова [35].

Таблиця 2.2

**Показники дернових глейових ґрунтів на водно-льодовикових відкладеннях**

Показники	Генетичний горизонт			
	Hgl	HPgl	P(h)Gl	PGl
Шар ґрунту, см	4-10	20-30	50-60	100-110
Вміст часток, % <0,01 мм	25,0	24,0	17,3	29,3
<0,001 мм	17,3	16,3	13,4	19,7
pH сольовий	5,8	5,7	5,9	5,8
Сума увібраних катіонів, мг-екв на 100 г ґрунту	16,0	10,5	8,1	7,6
Гідролітична кислотність, мг-екв на 100 г ґрунту	2,8	2,0	1,1	1,0
Гумус (за Тюрінім), %	3,2	3,0	0,2	0,2

У слабоповерхнево-оглеєних різновидах оглеєння починається з поверхні. Характеризується наявністю рідких іржаво-вохристих плям і дрібних залізисто-марганцевих конкрецій. В середньоповерхнево-оглеєних ґрунтах є велика кількість грубих залізисто-марганцевих бобовин. За ступенем розвитку профілю виділяють дернові глейові ґрунти ( $H+HP = 50$  см) і дернові глеюваті ( $H$

+ НР > 50 см). Якісна оцінка дернових глейових ґрунтів свідчить, що їх потенційна родючість досить висока і залежить від потужності горизонтів Н+НР, гранулометричного складу і породи, на якій вони утворилися.

На дослідному полі нами описаний дерновий глибокий глейовий піщанисто-легкосуглинковий ґрунт на водно-льодовикових відкладах, а за класифікацією WRB (2022) – це Gleyic Phaeozems (Loamic, Agric) [3; 24; 59]:

	Hg1 – 0-40	Орний пласт до 25 см окультурений, гумусовий оглеєний горизонт, темно-сірий з іржавим відтінком, залізисто-марганцеві конкреції, вологий, піщанисто-легкосуглинковий, ущільнений, пронизаний корінцями рослин, червоточини, копроліти, перехід ясний за забарвленням.
	HPgl – 41-53	Перехідний горизонт брудно-сірого з сизуватим відтінком забарвлення, піщанисто-легкосуглинковий, в'язкий, щільний, оглеєння у формі вохристих і сизих плям, корінці рослин, червоточини, копроліти, перехід поступовий за забарвленням, затічний.
	P(h)G1 – 54-91	Слабогумусована ґрунтотворна порода, сиза з сірими плямами, неоднорідна, сира, супіщана, безструктурна, щільна, сильнооглеєна, рясні вохристі плями, перехід поступовий за забарвленням, затічний.
	PG1 – 92-123	Сильнооглеєна ґрунтотворна порода – водно-льодовикові відклади сизуватожовтого забарвлення, неоднорідна, мокра, супіщана, безструктурна, щільна,.

Морфо- та фізико-хімічна діагностика дослідного ґрунту (рис. 2.2) дозволила зробити висновок, що описаний ґрунт за своїми основними показниками цілком придатний для вирощування високого врожаю сої.



Рис. 2.2. Вигляд профілю і шурфа дернового глейового легкосуглинкового ґрунту на водно-льодовикових відкладах.

#### **2.4. Методи оцінки біохімічного складу зерна та економіко-енергетичної ефективності удобрення сої**

Біохімічні показники сухої маси зерна сої отримали після висушування за температури 50–60°C до повітряно-сухого стану, готову кількість зерна розмелювали й розділяли на дві рівні частини. З кожного паралельного зразка відбирали потрібний об'єм матеріалу для аналізу в двох повторностях. Хімічні аналізи виконували за класичними методами у новіших модифікаціях [29; 76].

Вміст сирого протеїну і вологи у зерні визначений на інфрачервоному аналізаторі Спектран-119М, що працює за принципом аналізу дифузного відбиття у зразках у ближній ІЧ-ділянці спектра. Розмелювали проби зерна на млині У1-ЕМЛ (із ситами 0,8 мм) для отримання 20 г розмеленого борошна для аналізу.

Уміст сирової клітковини в зерні визначали методом Ганнеберга-Штомана, сирого жиру – методом Рушковського. Вміст безазотистих екстрактивних речовин (БЕР) встановлювали, як різницю між сумою всіх визначених речовин та частки вологи у сухій масі зерна.

Обчислення економічної вигоди здійснювали за реальними витратами по технології вирощування сої в умовах Західного Лісостепу. Використовували дані по основних показниках: виробничі затрати, собівартість, умовний чистий прибуток, рівень рентабельності [75; 5]. Для розрахунків брали ринкові ціни на добрива, препарат N-Lok Макс, інокулянти та закупівельну ціну на зерно сої 2023/24 маркетингового року (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

**Ринкова вартість добрив та продукції у 2022 маркетинговому році, які використані у методиці розрахунку економічної ефективності варіантів**

Матеріали досліджу	Од. вим.	Грн.
Амонійна селітра (34%)	тонн	17900
Сульфат амонію (21%)	тонн	15600
Суперфосфат потрійний (46%)	тонн	38000
Калій хлористий (61%)	тонн	20800
Вартість одноразового внесення добрив	—	230
N-Lok Макс	літр	760
Вартість внесення	—	180
ХайКот Супер Соя	літр	3690
Райс Пі	літр	2000
Соя (зерно)	тонн	18200

Враховували додаткові поточні затрати на транспортування та внесення агрохімікатів.

Енергетичну оцінку систем удобрення сої здійснили з урахуванням енергетичних еквівалентів добрив, інших витратних матеріалів за методичними рекомендаціями біоенергетичної оцінки технологій вирощування сої [60; 81]. Для розрахунків використали рекомендовані традиційні показники, представлені в таблиці 2.4.

*Таблиця 2.4*

**Загальноприйняті нормативи для методики розрахунку енергетичної ефективності вирощування сої**

Показник	Од. вим.	Значення
Середній коефіцієнт вмісту сухої речовини	—	0,88
Вміст загальної енергії в зерні сої	МДж/кг сух. реч.	20,6
Енергетичний еквівалент азотних добрив	МДж/кг д. р.	86,8
Енергетичний еквівалент фосфорних добрив	МДж/кг д. р.	12,6
Енергетичний еквівалент N-Lok Макс (у середньому по пестицидах)	МДж/літр	127
Енергетичний еквівалент бактерій	МДж/кг	117
Внесення добрив	МДж на га	193
Внесення пестицидів	МДж на га	223

Статистичний аналіз ANOVA, кореляцію Пірсона (з критеріями Чеддока) і моделювання динаміки клімату виконали за допомогою пакетів Microsoft Excel, Statistics-12 в онлайн-режимі. Для урожайних даних застосували програму Dispersion.exe., розробленою за нашою участю [16; 228], апробованою у попередніх польових дослідженнях та розміщену в Інтернеті (<https://github.com/dimbaida/variance-anlysis>).

## **2.5. Селекційно-генетичні й технологічні властивості сорту ЕС Ментор, використаного в досліді**

У досліді використали високоврожайний сорт сої ЕС Ментор. Сорт зареєстрований в Реєстрі сортів України 2013 року [37; 85; 90].

Сорт має потенціал врожайності 4,5 т/га. Середні показники господарської врожайності в Україні – 2,2-4,2 т/га. Зерно містить білка 42,8%, вміст жиру 20,5%. Призначений на кормові та продовольчі цілі.

Сорт з напівдетермінантним (напівобмеженим) типом росту. Висота рослин 69-77 см. Для рослин властиве інтенсивне гілкування. Висота кріплення першого боба – 12,2-16,5 см. Забарвлення насінини і рубчика жовте. Насіння дуже велике, маса 1000 зернин 161-200 г. Норма сівби за ширини міжрядь 18 см – 550 тис. схожих насінин на гектар. Тривалість фази «сходи цвітіння» – 50 діб, вегетація – 105 діб. Оптимальна сума активних температур 2600°C. До рекомендованих зон вирощування належить і Полісся.

Сорт посухостійкий, стійкий до осипання, до вилягання рослин та до розтріскування бобів. Генетичною особливістю сорту є формування 70-80% бобів у середньому і верхньому ярусах рослин.

Сорт сої ЕС Ментор належить до середньостиглих сортів з вегетаційним періодом 126-135 днів. Він пластичний та має імунітет до хвороб. Стійкість сорту ЕС Ментор до ураження хворобами, стресів (в балах, максимум – 9): склеротініоз – 8; бактеріоз – 7; вірусні хвороби – 8; пероноспороз – 6; осипання – 7; енергія початкового росту – 8; вилягання – 9; розтріскування бобів – 8.

Сорт сої ЕС Ментор поєднує високий стабільний врожай та вміст білків.

## **Висновки до розділу 2**

1. Дослідна ділянка з дерновим глибоким глейовим піщанисто-легкосуглинковим ґрунтом локалізована на південній межі Малого

Полісся і повністю репрезентує умови цього району. Описана ґрунтова відміна має типові агрохімічні властивості для екстраполяції висновків на цілу природну зону.

2. Вибрані сучасні та стандартизовані методи досліджень і поширений у виробництві, середньостиглий сорт сої ЕС Ментор.

3. Застосовані сучасні статистичні методи аналізу даних та графічного моделювання виявлених закономірностей. Використаний алгоритм дисперсійного аналізу, який нами удосконалений і опублікований [16].

Результати досліджень за розділом 2 викладено у публікації [16; 228].

### Розділ 3

## ВПЛИВ СИСТЕМИ МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ СОЇ НА ПАРАМЕТРИ АГРОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕРНОВОГО ГЛЕЙОВОГО ҐРУНТУ

Оптимальне кореневе живлення сої упродовж активної вегетації забезпечує повну реалізацію біопотенціалу сорту Ментор. Основним джерелом живлення біофільними елементами є атмосферний та ґрунтовий азот, ґрунтові ресурси фосфору і калію та інших елементів. Вносячи азотні мінеральні добрива, ми втручаємося у процес азотфіксації, оскільки нітрати пригнічують розвиток азотфіксувальних симбіонтів на коренях. Завдання цього розділу – пояснити закономірності впливу азотних та фосфорно-калійних мінеральних добрив, форм, доз і строків їх внесення на агрохімічні властивості ґрунту, з'ясувати динаміку показників різних форм азоту, рухомого фосфору й обмінного калію. Водночас слід встановити вплив азотних мінеральних добрив у взаємодії зі стабілізатором нітрифікації – нітрапірином у формі препарату N-Lock™, азотфіксувальних та фосформобілізаційних інокулянтів на вміст основних елементів живлення у ґрунті, зокрема форм азоту, упродовж активної вегетації сої. З'ясуємо ступінь впливу взаємодії сульфатних та нітратних добрив з нітрапірином на емісію закису азоту та реакцію ґрунтового розчину за показником  $pH_{KCl}$ .

### 3.1. Вплив мінерального удобрення сої на вміст рухомого фосфору та обмінного калію

За регулярного внесення високих норм азоту, фосфору і калію, окрім винесеного з врожаєм, у ґрунтах накопичуються запаси поживних речовин та гумусу [18; 94; 103; 62]

За нашими дослідженнями внесення фосфорно-калійних добрив у нормі  $P_{60}K_{60}$  перед сівбою сої зумовлювало підвищення ресурсів рухомого фосфору на початку вегетації 2023 року на 27% (від 124 мг/кг ґрунту на неудобреному варіанті до 135,2 на удобреному фоні – рис. 3.1). Рівень вмісту фосфору – 134,9-135,2 мг/кг ґрунту навесні встановився на інших удобрених варіантах.

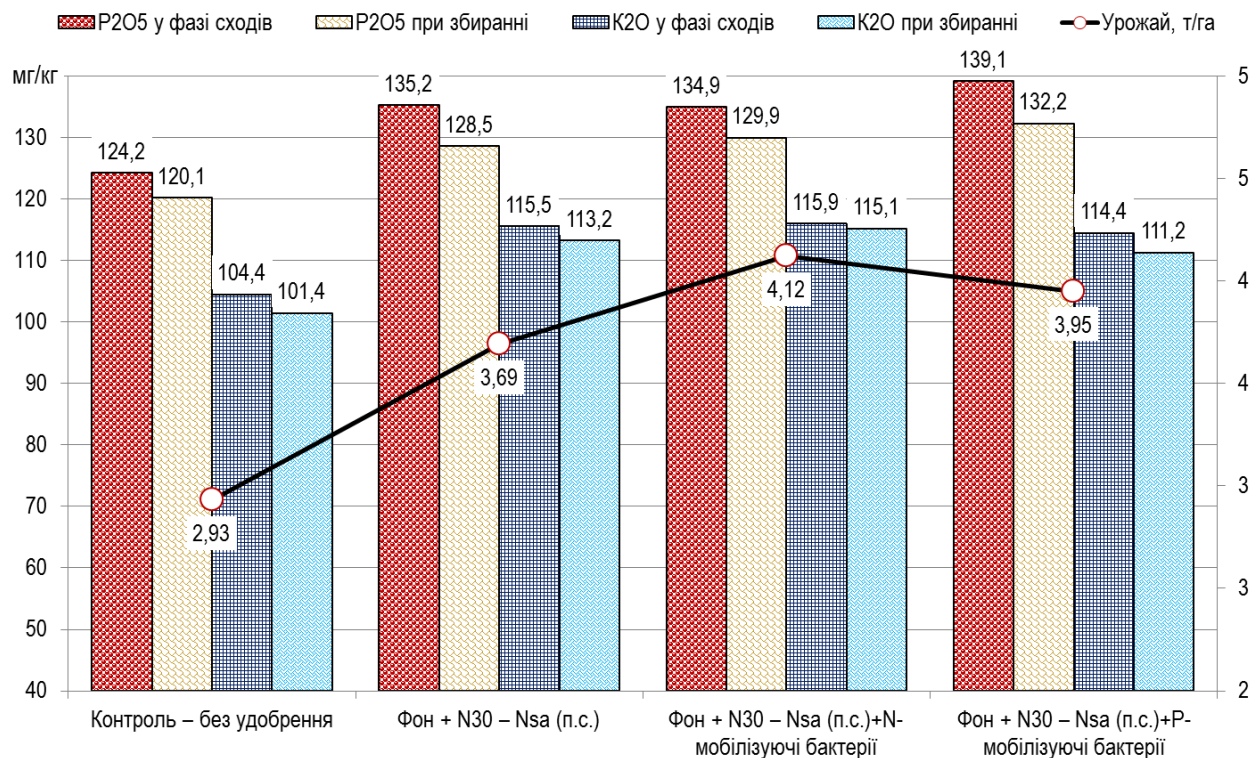


Рис. 3.1. Зміни вмісту рухомих фосфатів та обмінного калію у орному (0-20 см) шарі ґрунту упродовж вегетації залежно від систем удобрення сої у 2023 році ( $p < 0,05$ ).

Проте, застосування інокулянта Райс Пі (виробник Агрітема), який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens* на фоні  $P_{60}$  сприяло підвищенню вмісту рухомих фосфатів ще додатково на 3,9 мг/кг ґрунту. Інокуляція насіння сої забезпечила вищий вміст рухомих фосфатів в орному шарі до самого збирання врожаю, що підтверджує позитивну роль бактеріальних препаратів у мобілізації фосфатних ресурсів ґрунту.

Відсутність фосфорного добрива у системі удобрення сої спричинює найнижчий вміст рухомих фосфатів в орному шарі ґрунту як у фазі сходів, так і при збиранні врожаю, що свідчить про виснаження ґрунту.

Ресурси обмінного калію (рис. 3.1) в орному шарі дернового глейового ґрунту зросли від внесення  $K_{60}$  на 11,1-11,9 мг/кг. Коливання вмісту цього елемента залежно від інших факторів і впродовж вегетації були не значними. Проте навіть за мінімального врожаю сої на контролі без добрив зменшення ресурсів обмінного калію в орному і підорному шарах до збирання врожаю було найвагомим – до 101,4 мг/кг ґрунту.

Формування фітомаси сої в ході росту і розвитку рослин потребувало використання ґрунтового фосфору та калію, Тому їх ресурси в орному і підорному шарах до збирання врожаю зменшилися (рис. 3.1). Отже, робимо висновок, що ресурси ґрунтового фосфору та калію, які вагомо збільшувалися при внесенні  $P_{60}$  під осінню оранку, виснажилися до збирання врожаю.

### **3.2. Вплив доз азотного мінерального удобрення та інокуляції насіння на формування ресурсу доступних форм азоту в ґрунті**

Вирощування сої і без азотного удобрення покращує родючість ґрунту [82; 245]. Атмосферний  $N_2$  фіксується азотфіксувальними бактеріями на коренях у бульбочках [54; 51]. Газоподібний азот  $N_2$  перетворюється на  $NH_4^+$  нітрогеназою за участі бактерій, які його розщеплюють. Він згодом надходить у ґрунтове середовище у доступній для живлення інших культур формі. Біофіксація азоту або діазотрофія – це біохімічний процес за участі ензимного білкового комплексу нітрогенази [264; 203], за допомогою якого молекулярний азот ( $N_2$ ), який має міцний потрійний ковалентний зв'язок, перетворюється на аміак ( $NH_3$ ) або споріднені азотисті сполуки, як правило, у ґрунті чи водних системах [264].

Проте мінеральні азотні добрива і ґрунтові ресурси доступного азоту все ж відіграють важливу роль у підтриманні потреби зернових бобових культур [2], у

тому числі сої, у поживних речовинах і є вагомим джерелом живлення для утворення білків та перетворення енергії [250]. Статистика показує, що зростання внесення азотних добрив призвело до збільшення врожайності агрокультур у Світі більше, ніж на 40% [144; 273]. Ефективність добрив, внесених під культури, коливається залежно від змін клімату зон і погодних умов вегетації [53].

Suryantini & H. Kuntastuti [241] з'ясували що вплив азотних добрив на врожай сої тим сильніший, чим більше виснажений ґрунт після попередника. У цьому випадку культура потребує більшої норми азотних добрив. Внесення 30 кг/га карбаміду або 90 кг/га амонійної селітри сприяло підвищенню врожаю зерна на 0,5 т/га відносно контролю без удобрення та забезпечувало збір 3,4 т/га. У разі повторної сівби сої після сої вона не відгукувалася на додаткової дози азотних добрив для підвищення врожайності зерна і забезпечувала до 3,0 т/га зерна.

Потрібно розробити наукове обґрунтування впливу мінімальних та підвищених норм азотного удобрення на продуктивність сої у районі Малого Полісся. На ресурси легкогідролізного азоту – основного елемента живлення в амонійній та нітратній формах, впливають як норми мінерального азотного удобрення, так і оброблення насіння азотними інокулянтами. Оптимальний запас доступного азоту визначає величину максимального врожаю у ранньо- чи пізньостиглих сортів, як Ментор.

В орному шарі ґрунту нашого дослідження за відсутності удобрення зберігається природний середній вміст легкогідролізного азоту – 121 мг/кг сухої маси (рис. 3.2). У нашому експерименті без внесення азотного добрива в ґрунт спостерігаємо найнижчий вміст легкогідролізного азоту в орному пласті до збирання урожаю.

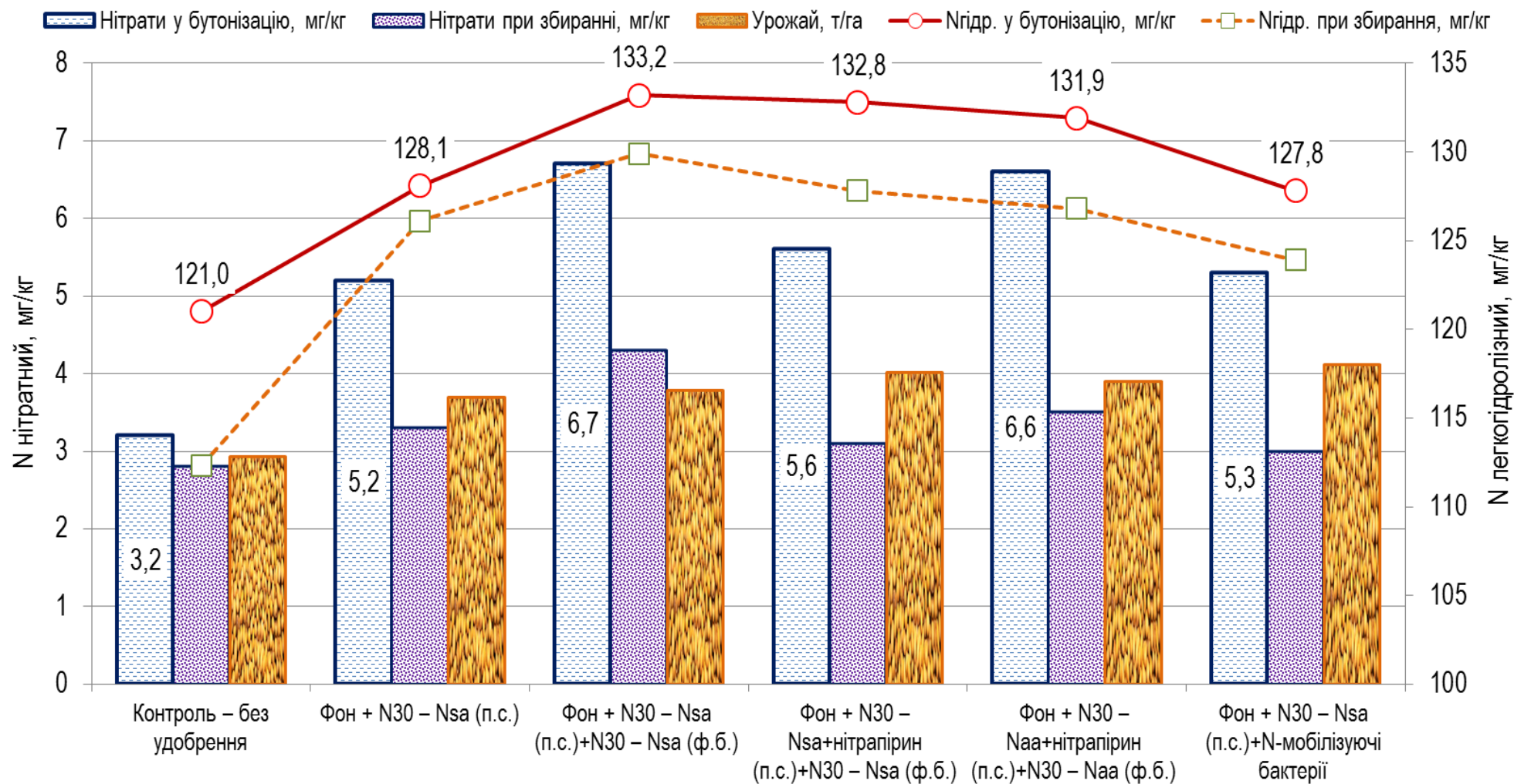


Рис. 3.2. Зміни вмісту нітратів та легкогідролізного азоту в орному (0-20 см) шарі ґрунту під впливом азотного удобрення, нітрапірину та інокуляції сої упродовж вегетації у 2023 році ( $p < 0,05$ ).

Він був мінімально низький навіть за внесення амонійної селітри  $N_{30}$  (основне)  $N_{30}$  (підживлення у фазі бутонізації), але за застосування інгібітора нітрифікації – 120,9 мг/кг ґрунту). Нітрапірин на фоні внесення  $N_{30}$  перед сівбою значно вагомніше знижував утворення нітратів за використання сульфату амонію, ніж за використання амонійної селітри.

Внесення азоту перед сівбою в нормі  $N_{30}$ , а також підживлення  $N_{30}$  підвищує запас доступного азоту на 7,1-12,1 мг/кг ґрунту у фазі бутонізації, що є хорошим фоном для старту активної вегетації сої. Застосування нітрапірину після внесення сульфату амонію істотно, а амонійної селітри менш істотно знижує утворення нітрат-йонів в орному шарі. Рівень їх вмісту опускається до рівня за мінімального азотного удобрення  $N_{30}$ . До збирання вміст нітрату в ґрунті вагомо зменшується за внесення нітрапірину. Це підтверджує високу ефективність інгібітора нітрифікації щодо обмеження накопичення небажаних для сої нітратів у період активного бульбочкоутворення.

Інокуляція насіння азотмобілізаційними бактеріями *B. japonicum* у препараті ХайКот Супер Соя на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію) не підвищувала ресурси легкогідролізного азоту в орному шарі порівняно з нормою  $N_{30}P_{60}K_{60}$  перед сівбою та  $N_{30}$  в підживлення у фазі бутонізації.

### **3.3. Зміни вмісту нітратів у профілі 0-60 см залежно від норм і форм внесення азотних добрив, впливу інгібітора та інокуляції насіння**

В умовах фізико-географічної області Малеого Полісся, де середньорічні опади становлять 600-700 мм, а за період додатніх температур – 350-500 мм дощів, небезпечним є вимивання нітратів, особливо за високих норм азотного удобрення. Надлишкові ресурси азоту в ґрунті негативно впливають на стійкість рослин до вилягання і ураження хворобами [53; 52]. Втрати агроєкосистемами азоту за межі малого біогеохімічного циклу місцями сягають 40-70%. Тому вивчення впливу мінерального живлення на продуктивність сої в

природно-кліматичних умовах достатнього й надлишкового зволоження є актуальним в умовах динамічних змін клімату і розвитку агровиробництва.

Звітрювання та вимивання є найпоширенішими глобальними процесами, які спричиняють найбільше занепокоєння щодо втрат азоту ґрунтом. Обидва ці явища відбуваються в умовах вологого ґрунту. Денітрифікація полягає у відновленні нітратів до нітритів ( $\text{NO}_2^-$ ) [245], а згодом до газоподібних форм, тоді як вимивання – це просто профільне переміщення азоту із ґрунтовою водою. Вимивання часто спричинює більше занепокоєння, оскільки нітрат розчинний у воді і може легко проникати в ґрунтові води і зрештою потрапляти у поверхневі стоки та ґрунтові водні джерела.

Нітрат-іони не адсорбуються ґрунтовим вбирним комплексом і, перебуваючи у розчиненому стані, легко переміщуються по профілю ґрунту з капілярною і гравітаційною водою. Рухливість нітратів залежить від кількості [72], часу внесення азотних добрив та властивостей ґрунту. У глинистих і суглинкових ґрунтах з меншою водопроникністю міграція нітратів поза ризосферу дещо сповільнена. Найшвидше нітрати змиваються вниз по профілю навесні. Тому їх велика кількість у цю пору не бажана, хоча у такій формі азот найлегше засвоюється рослинами.

Динаміка вмісту нітратів впродовж року згідно з Г. Господаренком [21; 22] має два піки концентрації – навесні та восени. Враховуючи, що вміст амонійного азоту упродовж року практично змінюється мало, паралельно із вмістом нітратів впродовж сезону змінюється і вміст усього доступного мінерального азоту.

Наші дослідження поширення нітратів у профілі ґрунту показали, що внесення амонійної селітри більше насичувало орний і підорний шари, порівняно з сульфатом амонію (рис. 3.3). Мінімальна норма азотного удобрення  $\text{N}_{30}$  та інокуляція насіння сприяли мінімізації утворення нітратів у ґрунті, що є сприятливим для бульбочкоутворення на корінні сої. Нітрапірін призупиняв

поширення нітратів нижче 40 см як за внесення амонійної, так і нітратної форми азоту, відповідно до 3,0 мг/кг та до 5,2 мг/кг.

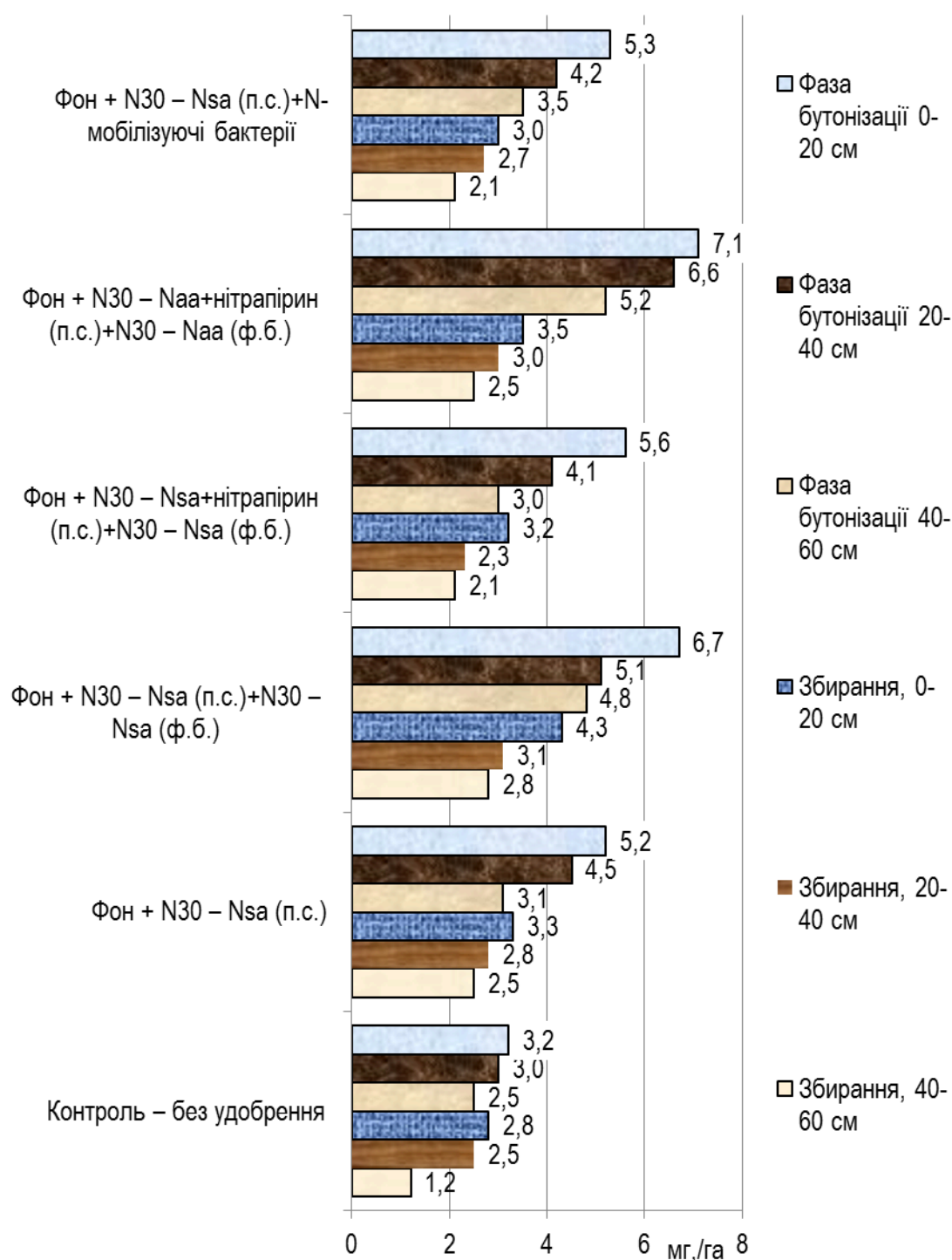


Рис. 3.3. Зміни вмісту нітратів у ґрунті під впливом азотного удобрення сої, нітрапірину та інокуляції азотфіксувальними бактеріями упродовж весняно-літньої вегетації у 2023 році ( $p < 0,05$ ).

Наявність нітратів в орному шарі у фазі бутонізації визначає норма азотного удобрення, а формула (2.1) (див. розд. 2.) дозволяє обчислити їхні запаси в орному (0–20 см) шарі з урахуванням фізичних властивостей дернового глейового ґрунту. Результати обчислення на рисунку 3.4 показують, що сумарна норма азоту  $N_{30+30}$  навіть за інгібування нітратоутворення нітрапірином створює запас нітратів 18,5 кг/га, що спричинює певне пригнічення бульбочкоутворення (рис. 3.4).

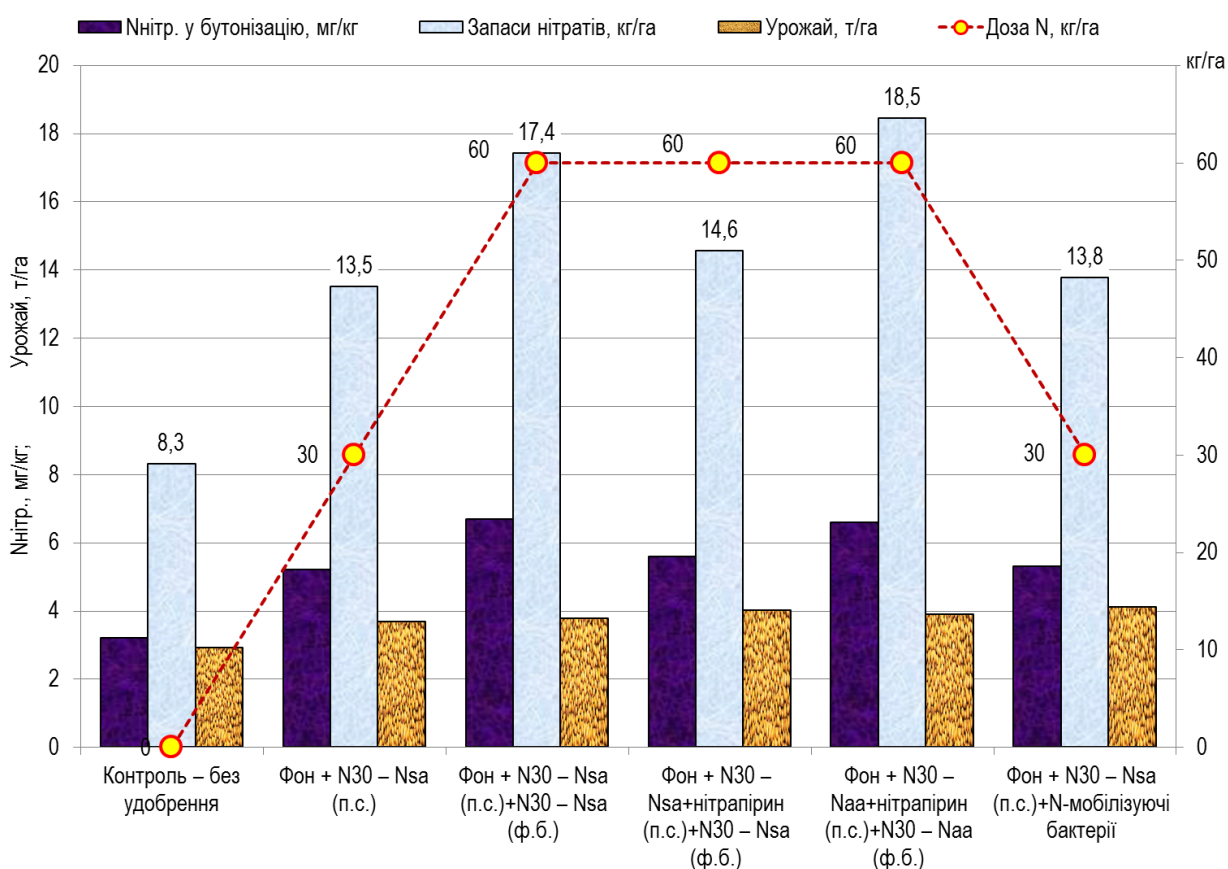


Рис. 3.4. Зміни запасів нітратів в орному шарі ґрунту під впливом азотного удобрення сої, нітрапірину та інокуляції азотфіксуючими бактеріями упродовж весняно-літньої вегетації у 2023 році ( $p < 0,05$ ).

Наші експерименти доводять стійке пригнічення мікроорганізмів, які синтезують ензими нітрифікації. У ґрунті сповільнюється процес нітрифікації за наявності підвищених ресурсів азотних сполук. Відтермінування періоду високого вмісту нітратів при дії інгібіторів нітрифікації в ґрунті є важливою

умовою покращення умов росту й розвитку бульбочкових симбіонтів, а відповідно і підвищення врожаю зерна сої. Своєчасне внесення інгібітора нітрифікації в ґрунт зменшує ймовірність вимивання нітратів інтенсивними опадами. Це дозволяє запобігти втратам частини поживного азоту через вимивання за межі кореневої системи і підвищити ефективність використання азоту мінеральних добрив.

Окрім вимивання небезпеку для довкілля створюють викиди закису азоту  $N_2O$  з ґрунтів у наслідок денітрифікації. Вони практично залежать від мікробної нітрифікації та процесів денітрифікації разом з небіотичною хемоденітрифікацією. Мікробне виділення  $N_2O$  залежить від наявності в ґрунті великої кількості азоту добрив у формах амонію і нітратів [115; 114; 224]. Структура ґрунту впливає на швидкість втрат  $N_2O$  [150]. Грубозернистий ґрунт схильніший до втрат  $N_2O$ , тоді як дрібноструктурний ґрунт має здатність утримувати закис азоту та зменшувати його емісію.

Оцінки річних обсягів закису азоту в масштабі екосистем із агроґрунтів у помірному кліматі здійснили С. Roelandt et al [217] та К. Butterbach-Bahl et al [118]. Викиди азотних газів залежать від трофності ґрунтів [133; 192; 135; 146], температури ґрунту та форм добрив [180], а також від щільності рослинного покриву, що асимілює азот [224].

У наших експериментах підвищені запаси нітратів та високі норми азотних добрив спричиняють значну емісію закису азоту в атмосферу. Розрахунок викиду  $N_2O$  за формулою (2.2) (див. розділ 2) показали, що внесення  $N_{60}$  у два прийоми та вміст нітратів у ґрунті зумовлюють викиди в обсязі 1,8 кг/га газоподібного закису азоту в атмосферу (рис. 3.5).

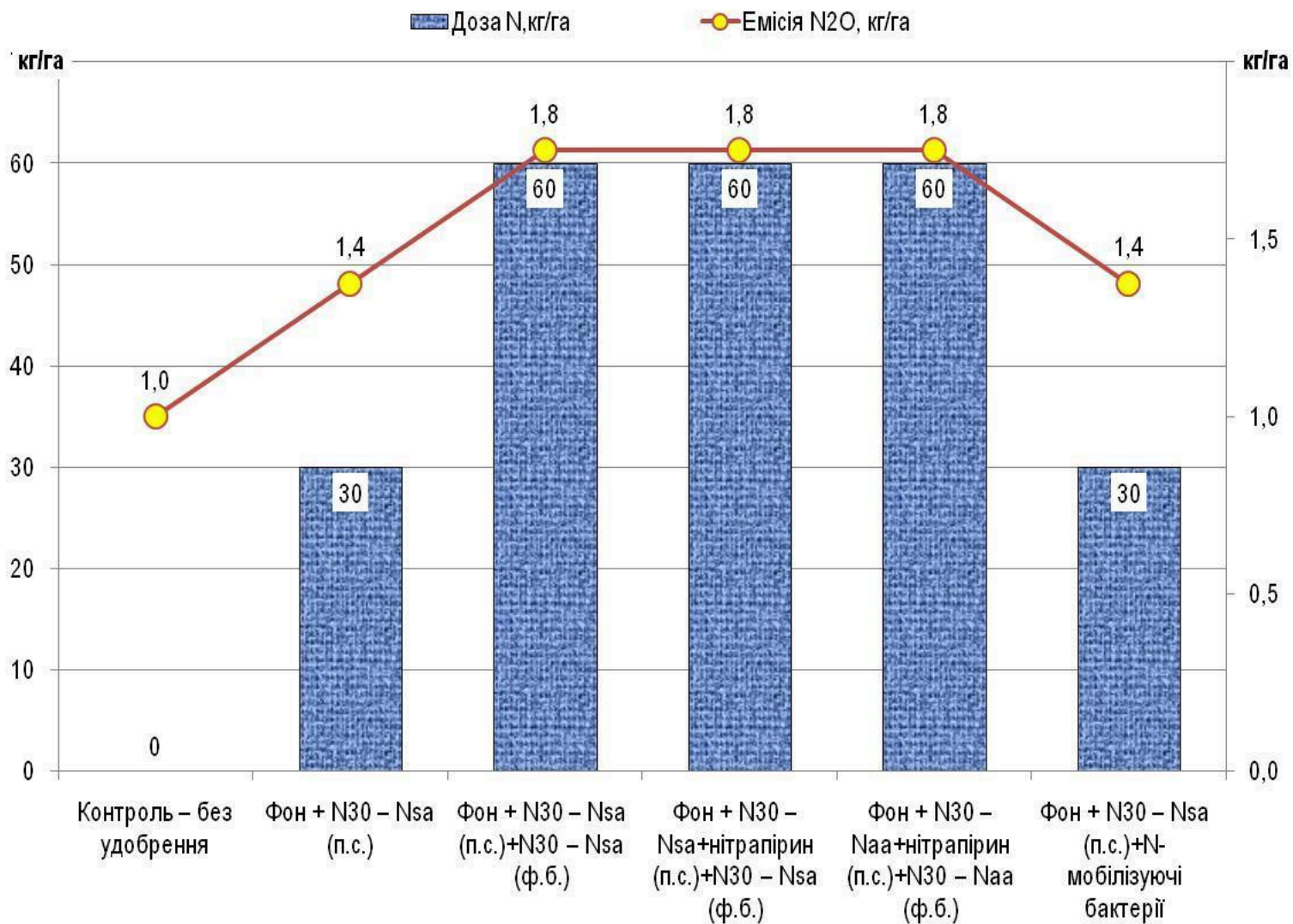


Рис. 3.5. Зміни обсягів емісії закису азоту з ґрунту під впливом азотного удобрення сої, нїтрапїрїну та інокуляції азотфіксувальними бактеріями упродовж весняно-літньої вегетації у 2023 році ( $p < 0,05$ ).

Цей газ належить до небезпечних парникових газів, тому світова екоспільнота дуже занепокоєна збільшенням його викидів в агросекторі.

Безпосереднє звітрювання парникового газу  $N_2O$  – закису азоту, з ґрунтів залежать від активності мікробної нітрифікації та денітрифікації [245], в тому числі разом з небіотичною хемоденітрифікацією. Мікробне продукування  $N_2O$  залежить від сприятливих гідротермічних умов, наявності в ґрунті великої кількості азоту мінеральних та органічних добрив у формах амонію і нітратів [117; 214; 269; 270; 275].

Завдання аграрного виробництва не допустити непродуктивних втрат газоподібного азоту, оскільки це не лише підвищує віддачу дорогих мінеральних добрив, а й захищає атмосферу від забруднення небажаними газовими компонентами.

#### **3.4. Зміна кислотності ґрунту під впливом систем удобрення сої**

Дернові глейові ґрунти за кислотністю належать до слабокислих ( $pH_{\text{сол.}} 5,5-5,8$ ), а за гідролітичною кислотністю – близькі до нейтральних (1,0-2,8 мг-екв на 100 г ґрунту) [48]. Для оптимізації удобрення сої важливо з'ясувати вплив азотних добрив, нітрапірину та препаратів інокуляції насіння на зміни в кислотності орного і підорного пластів дернові глейового ґрунту.

За нашими дослідженнями збільшення кислотності орного і підорного пластів ґрунту можливе під дією азотних добрив. Натомість нітрапірин нейтралізує підкислення ґрунтового розчину нітратами, оскільки пригнічує їх продукування. Було встановлено, що на тлі удобрення сульфатом амонію підкислення ґрунту було значно меншим, ніж при внесенні амонійної селітри (рис. 3.8).

У фазу бутонізації удобрення амонійною селітрою в один і в два прийоми найсильніше підкислило реакцію орного шару ґрунту – до  $pH_{\text{сол.}} 5,62-5,63$  проти  $pH_{\text{сол.}} 5,65$  за внесення сульфату амонію. Нейтралізуюча дія нітрапірину на ґрунтовий розчин чіткіше проявлялася за внесення сульфату амонію. За

мінімального азотного удобрення сульфатним добривом різниця у  $pH_{\text{сол.}}$  становила 0,04 одиниці.

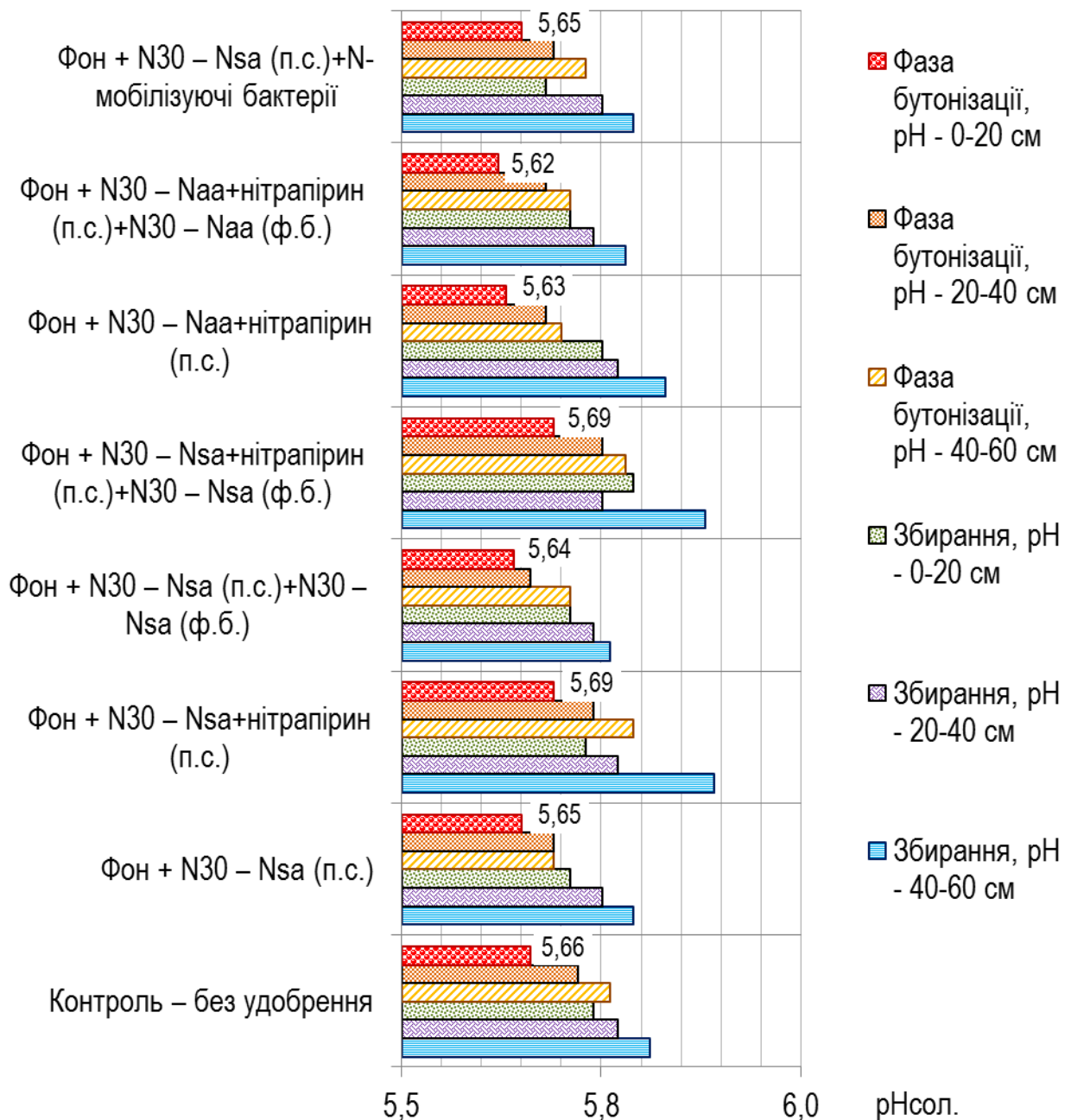


Рис. 3.8. Зміна кислотності ґрунту за впливу азотного удобрення та нітрапірину упродовж вегетації 2023 року ( $p < 0,05$ ).

Азотмобілізаційні бактерії на фоні  $N_{30}$  (сульфат амонію) та  $P_{60}K_{60}$ , використані для інокуляції насіння сої не спричинили підкислення орного шару навіть без внесення нітрапірину, який пригнічує утворення кислих нітратів.

Загальною тенденцією є зменшення кислотності горизонтів від поверхні до 60 см. Сульфат амонію у поєднанні з нітрапірином сприяє нейтралізації підорних горизонтів, що опосередковано свідчить про обмеження вимивання нітратів у нижні горизонти.

До збирання врожаю кислотність ґрунту спадала і найбільше підлужування встановлено на контролі без добрив та за азотного удобрення ( $N_{30}$ ) сульфатом амонію, особливо з використанням нітрапірину.

Отже, як можна зробити попередні висновки, вивчення фізико-хімічних змін під впливом форм азотних, фосфорних та калійних добрив, нітрапірину та інокуляції на кислотність орного і підорного пласту дернового глеєвого ґрунту, показало, що фонове удобрення сої  $P_{60}K_{60}$ , подвоєні норми азоту ( $N_{30+30}$ ) та нітрапірин діють на реакцію ґрунту, залежно від виду добрив.

У публікаціях [209; 155] повідомляється, що кислі мінеральні добрива змінюють фізико-хімічні параметри у ґрунтах. За результатами експериментів [228; 135] інгібітор нітрифікації, який спричинює зменшення утворення нітратів, зумовлював стійку нейтралізацію кислотності до збирання врожаю.

### **3.5. Закономірності кореляцій параметрів азотного режиму ґрунту залежно від норм удобрення та застосування нітрапірину**

Розрахунки кореляційних коефіцієнтів ( $r_{\pm}$ ), що представлені в додатку Б (табл. Б.1), підтвердили зв'язок норм внесення азоту з багатьма змінами агрохімічних властивостей ґрунту. Так, вміст легкогідролізного та нітратного азоту в орному пласті ґрунту практично прямо пропорційно залежить від обсягу внесення добрив ( $r = 0,93-0,99$ ), тісний зв'язок вмісту легкогідролізного азоту зберігається до збирання врожаю (табл. 3.1). Орний і підорний пласти ґрунту достовірно тісно підкислюються як і фазі бутонізації, так і до збирання під впливом збільшення норм внесення азоту.

Агрохімічні та фізико-хімічні показники корелювали між собою (табл. 3.2). Збільшення концентрації нітрат-йонів у орному та підорних пластах ґрунту

збільшувало кислотність профілю по різному. У фазі бутонізації бачимо середню негативну кореляцію показника  $pH_{\text{сол.}}$  та вмісту нітратів у підорному шарі ґрунту ( $r = -0,53$ ). При збиранні врожаю обернена кореляція була у орному та глибокому (40-60 см) горизонтах ( $r = -0,58 - -0,60$ ).

Таблиця 3.1

**Показники кореляції ( $r = \pm$ ) врожаю сої з нормами азотного удобрення, змінами вмісту форм азоту та зміщенням  $pH_{\text{сол.}}$  в орному та підорному шарах ґрунтів**

Показник	Доза азоту	Урожай зерна
Урожай, т/га	0,74	X
Нітрати у фазі бутонізації (0-20 см), мг/кг	0,93	<b>0,76</b>
Нітрати при збиранні (0-20 см), мг/кг	0,66	0,27
Нгідр. у фазі бутонізації (0-20 см), мг/кг	0,99	<b>0,79</b>
Нгідр. при збиранні (0-20 см), мг/кг	0,91	0,83
Фаза бутонізації, pH - 0-20 см	0,00	-0,16
Фаза бутонізації, pH - 20-40 см	-0,20	-0,16
Фаза бутонізації, pH - 40-60 см	-0,19	-0,07
Збирання, pH - 0-20 см	0,17	-0,24
Збирання, pH - 20-40 см	-0,23	-0,72
Збирання, pH - 40-60 см	-0,60	-0,70

Отже, при збиранні врожаю наслідки утворення в ґрунті нітратів впливали на ґрунт у бік підкислення.

Концентрація легкогідролізного азоту менше підвищувала кислотність ґрунту та найсильніше в глибинному пласті 40-60 см ( $r = -0,59 - -0,58$ ).

Оскільки виявлені тісні перехресні зв'язки багатьох чинників азотного живлення та кислотності у профілях (дод. Б; табл. Б.1), ми застосували

моделювання подвійного впливу різних форм доступного азоту, норм внесення, змін кислотності ґрунту та врожаю зерна.

Таблиця 3.2

**Показники кореляції ( $r = \pm$ ) врожаю сої з нормами азотного удобрення, змінами вмісту форм азоту та зміщенням  $pH_{\text{сол.}}$  в орному та підорному шарах ґрунтів**

Показник	Нітрати в орному шарі		Нгідр. в орному шарі	
	у фазі бутонізації, мг/кг	при збиранні, мг/кг	у фазі бутонізації, мг/кг	при збиранні, мг/кг
Фаза бутонізації, рН - 0-20 см	-0,32	-0,58	-0,10	-0,30
Фаза бутонізації, рН - 20-40 см	-0,53	-0,72	-0,24	-0,35
Фаза бутонізації, рН - 40-60 см	-0,45	-0,60	-0,23	-0,39
Збирання, рН - 0-20 см	-0,17	-0,16	0,12	-0,05
Збирання, рН - 20-40 см	-0,42	-0,02	-0,27	-0,33
Збирання, рН - 40-60 см	-0,78	-0,48	-0,59	-0,58

На підставі наявності тісних зв'язки чинників азотного живлення ми застосували 3Д-моделювання подвійного взаємовпливу різних факторів.

Як показано на рисунку 3.9, 3Д-модель синергії форм азоту свідчить, що за меншого рівня вмісту легкогідролізного азоту підвищення концентрації нітратів у ґрунті не істотне.

За вищого вмісту легкогідролізного азоту, який спричинений підвищенням норм внесення азотних добрив спостерігаємо стрімке зростання кількості нітратів у ґрунті. Регресійна залежність добре описується формулою (3.1) (рис. 3.9):

$$N_{\text{нітр.}}, \text{ мг/кг} = 23,8079 + 0,0065 \times \text{Доза N(кг/га)} + 0,2244 \times N_{\text{гідр}}(\text{мг/кг}). \quad (3.1)$$

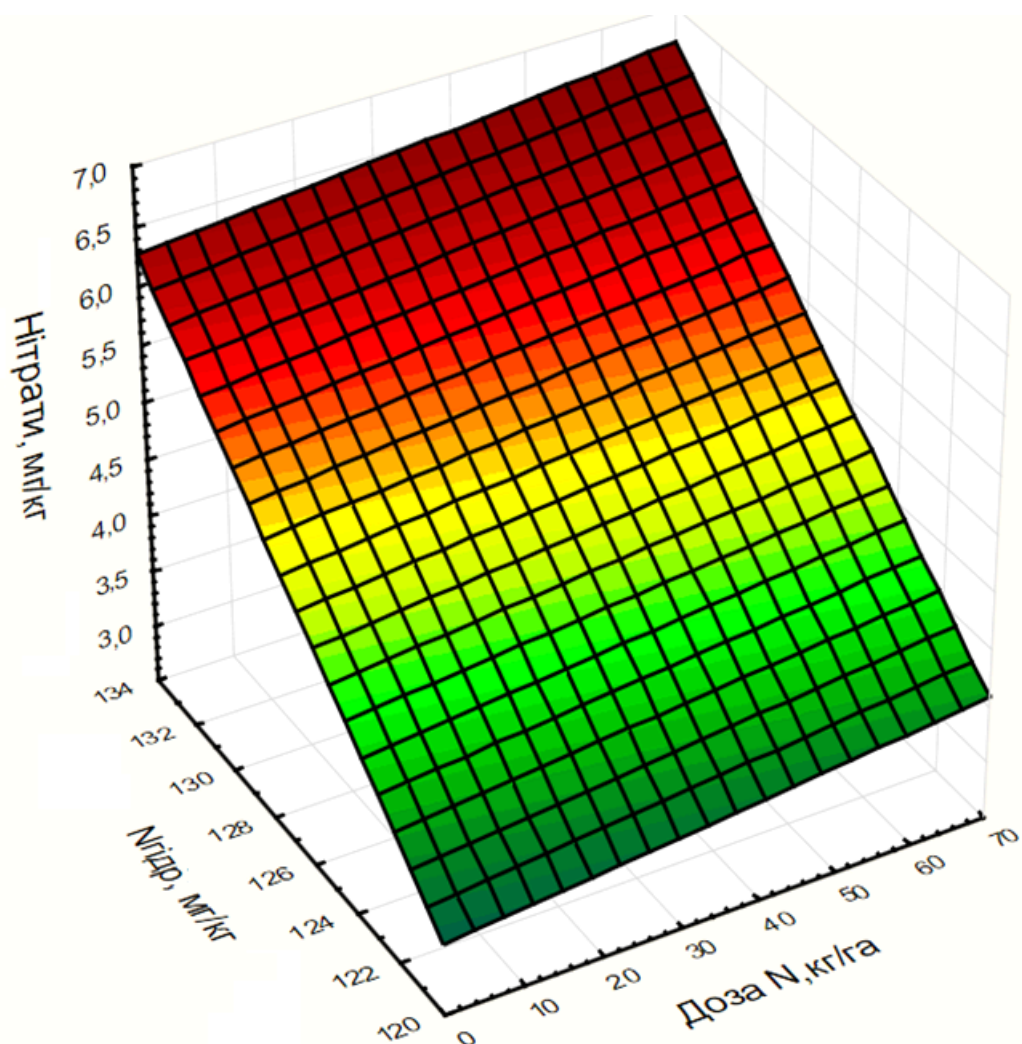


Рис. 3.9. Просторова 3Д-модель регресії показника вмісту нітратів у зв'язку зі змінами вмісту легкогідролізних форм азоту у фазу бутонізації в орному (0-20 см) пласті дернового глейового ґрунту та нормою азотного удобрення.

Як показано на рисунку 3.10 ґрунт підкислювався дуже вагомо за подвоєння вмісту нітратів, але застосований діапазон доз внесення азоту не сильно впливав на цю тенденцію.

Формула (3.2) площинної регресії підтверджує це невеликим коефіцієнтом регресії дози азоту:

$$pH_{\text{сол.}} = 6,0451 + 0,1249 \times N_{\text{нітр.}} + 0,0013 \times \text{Доза N(кг/га)} \quad (3.2)$$

Як показано на рисунку 3.11, 3Д-модель синергії форм азоту свідчить, що за меншого рівня вмісту легкогідролізного азоту підвищення концентрації нітратів у ґрунті спричинює сильніше його підкислення. За вищого вмісту цієї форми азоту  $pH_{\text{сол.}}$  змінюється в бік до нейтрального.

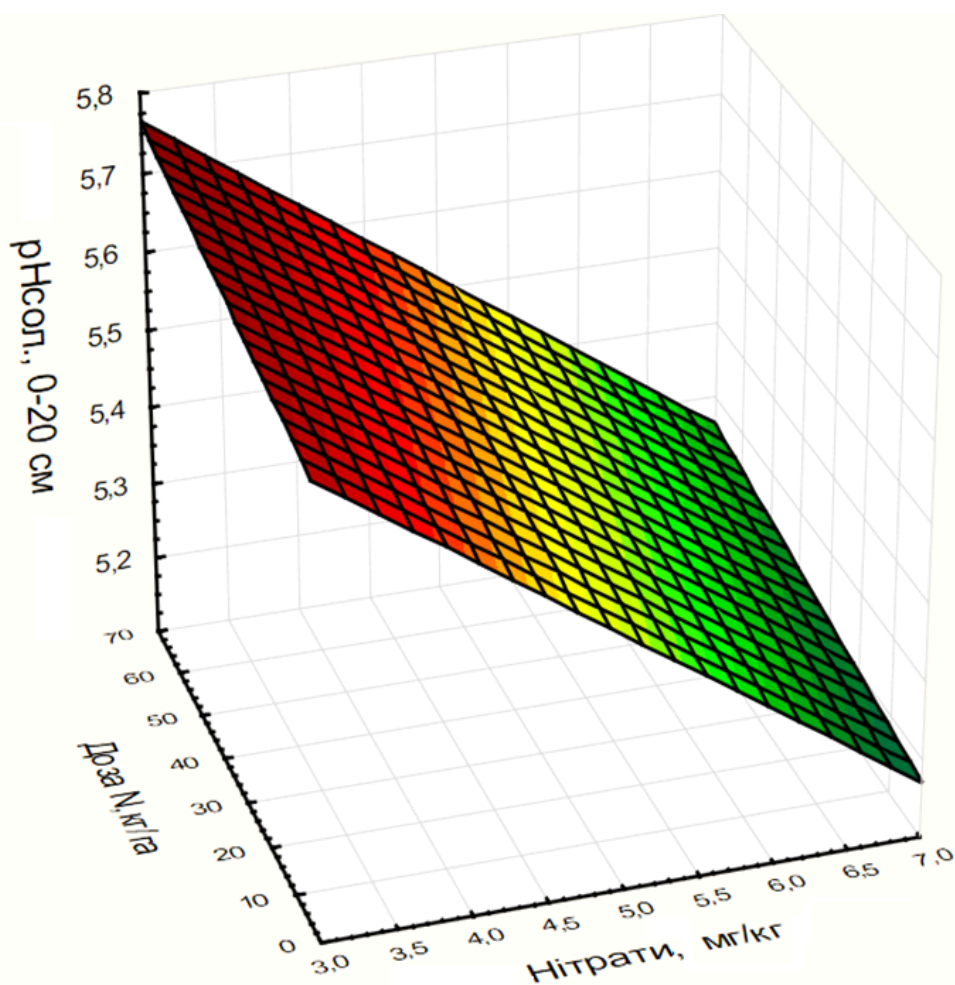


Рис. 3.10. Просторова 3Д-модель регресії показника  $pH_{\text{сол.}}$  у зв'язку зі змінами вмісту нітратного азоту у фазі бутонізації в орному (0-20 см) пласті дернового глейового ґрунту та нормою азотного удобрення.

Формула (3.3), що описує площинну регресію  $pH_{\text{сол.}}$  від взаємодії форм азоту у ґрунті підтверджує це з вагомими коефіцієнтами регресії форм азоту:

$$pH_{\text{сол.}}(\text{бутоніз. - 0-20 см}) = 4,063 + 0,0147 \times N_{\text{гидр.}} + 0,0599 \times N_{\text{нітр.}} \quad (3.3)$$

В науковій літературі немає даних щодо впливу підвищених і високих норм азотного удобрення сої на дернових глейових ґрунтах Малого Полісся у Західному Лісостепу на запаси форм азоту – основного елемента живлення, який надходить з двох джерел для рослин.

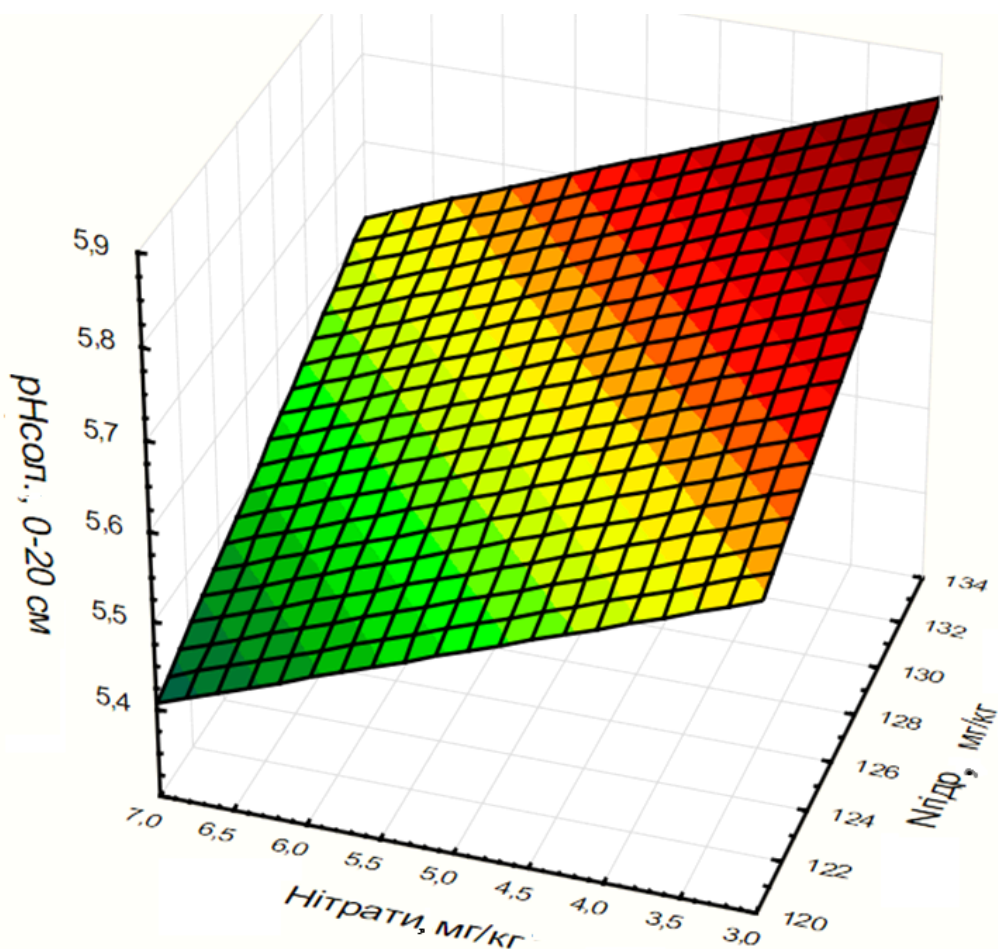


Рис. 3.11. Просторова 3Д-модель регресії показника  $pH_{\text{сол.}}$  у зв'язку зі змінами вмісту доступних форм азоту у фазі бутонізації в орному (0-20 см) пласті дернового глейового ґрунту.

Досліджувані нами системи удобрення сої істотно змінюють поживний режим ґрунту від початку вегетації. В інших умовах вирощування сої доведено [6; 9], що під впливом систематичного використання добрив помітно поліпшувався поживний режим ґрунтів.

Дієвість стабілізаторів азоту – інгібіторів нітрифікації, в регулюванні азотного живлення культур доведена багатьма дослідженнями за рубежом. Їхній позитивний вплив на ефективність азотних добрив дослідили U. Nege & K. Offenberger [158] на озимій пшениці у Баварії (Федеративна республіка Німеччина) та A. Roche et al [215] на ячмені ярогому в Ірландії.

Отже, ми переконалися [171], як раніше інші автори [103; 18; 23], що хімічні властивості ґрунтів визначають створення умов інтенсивного поглинання рослинами поживних речовин, що є надзвичайно важливим у забезпеченні сприятливих умов початкового розвитку сої, яка негативно реагує на синтетичні нітрати в ґрунті.

### Висновки до розділу 3

1. Фосфорно-калійне удобрення є обов'язковим для отримання найвищого врожаю сої. Ґрунт без внесення фосфорних і калійних добрив у фазі бутонізації містив 124,2 в орному та 120,1 мг/кг рухомих фосфатів та 104,4 і 101,4 мг/кг обмінного калію в підорному шарі. Внесення фосфорно-калійних добрив у нормі  $P_{60}K_{60}$  додає в орному шарі відповідно 11,0-15,0 та 11,1-11,5 мг/кг поживних речовин.

2. Фосформобілізаційні бактерії спричинили максимальне підвищення запасу доступних фосфатів (139,1 мг/кг), активізувавши мікробіологічні процеси в орному шарі ґрунту. Найвищі запаси фосфатів зберігалися і до збирання врожаю (132,2 мг/кг), порівняно з варіантами без інокуляції фосформобілізаційними бактеріями *B. amyloliquefaciens*. Отже фосформобілізаційний інокулянт на фоні  $P_{60}$  сприяв кращому забезпеченню сої фосфором.

3. Система удобрення сої з мінімальною та подвійною нормою азоту, внесеного у формі сульфату амонію, з використанням стабілізатора нітратів та бактеріяльних інокулянтів забезпечила тимчасове обмеження накопичення

нітратів в орному та підорних горизонтах ґрунту (на 21,1% порівняно з контролем  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію). Застосування на цьому фоні азотфіксувального інокулянта ХайКот Супер Соя не змінює істотно запаси нітратів в орному шару ґрунту.

4. Подвоєння норми азотного удобрення від  $N_{30}$  до  $N_{60}$  збільшило обсяги емісії закису азоту в атмосферу на 25%. Система удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  з використанням сульфату амонію + N-мобілізаційні бактерії стримувала викиди газоподібного азоту на рівні контрольного варіанту без інокулянта. Дослідження підтверджують ефективність удосконаленої системи удобрення сої стосовно забезпечення рослин NPK та збереження якості природного довкілля в аграрній сфері.

Результати досліджень за розділом 3 викладено у публікаціях [171; 172; 46; 48; 228].

## Розділ 4

### **БІОМОРФОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОСЛИН СОЇ ПІД ВПЛИВОМ УДОБРЕННЯ, НІТРАПРИНУ ТА ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ**

Гідротермічні умови 2022-2024 років формувалися під впливом десятирічної інерції динаміки глобального клімату, регіональних змін ландшафтного мезоклімату від 2020 року [211; 1; 104; 122], тому були дуже різними для отримання високих врожаїв зерна сої.

Змістом четвертого розділу є опис особливостей гідротермічного режиму 2022-2024 років проведення досліджень та інтенсивність впливу коливань на ріст і розвиток сої, утворення та ефективність азотфіксувальної роботи бульбочкових бактерій. Огляд параметрів і динаміки погоди упродовж періоду від 2010-2024 років дає уявлення про тривалу тенденцію, яка позначилася на погоді 2022-2024 років. Залежно від зміни гідротермічних умов зміщувалися фази розвитку сої, формувалися параметри рослин і структура врожаю.

#### **4.1. Температурний і вологісний режим у 2022-2024 роки росту й розвитку сої**

Серед чинників, впливових на агровиробництво, кліматичні умови є найважчими для контролю, і вони є більш обмежувальними факторами максимальної врожайності [1]. Абіотичні стреси, такі як посуха, надмірні дощі, екстремальні температури та слабе освітлення, можуть значно знизити врожайність агрокультур.

2023 рік став першим роком в історії спостережень, коли кожен день був як мінімум на 1°C тепліший, ніж у доіндустріальний період 1850-1900 років [237]. Крім того, приблизно половина днів були більш, ніж на 1,5°C тепліші за рівень 1850-1900 років, а два дні в листопаді – більше, ніж на 2°C тепліші. У 2023 році

було на  $0,60^{\circ}\text{C}$  тепліше, ніж в середньому за 1991-2020 роки, і на  $1,48^{\circ}\text{C}$  тепліше, ніж у доіндустріальний період 1850-1900 років.

Середньорічна температура повітря була найвищою за всю історію спостережень або близька до найвищої на значній частині всіх океанських басейнів і всіх континентів, крім Австралії. Кожен місяць з червня по грудень був теплішим, ніж відповідний місяць у будь-якому попередньому році. Глобальна середня температура поверхні моря залишалася стійкою та незвичайно високою, досягнувши рекордних рівнів для цієї пори року з квітня до грудня [237].

2023 рік став другим найтеплішим роком у Європі: температура на  $1,02^{\circ}\text{C}$  вища за середній показник за 1991-2020 роки, на  $0,17^{\circ}\text{C}$  холодніша, ніж у 2020 році, найтеплішому році за всю історію спостережень. Європейська зима (грудень 2022 року – лютий 2023 року) була другою найтеплішою зимою за всю історію спостережень. За вісім місяців 2023 року рівень льоду в Антарктиці був рекордно низьким для відповідної пори року [123].

Клімат області Малого Полісся помірно континентальний. Середня температура взимку  $-4^{\circ}\text{C}$ , а в теплі місяці  $18-19^{\circ}\text{C}$ . За холодне півріччя (листопад – квітень) загальна кількість опадів становить 220 мм, а за тепле півріччя (травень – жовтень) на височини випадає від 350 до 400 мм. Сніговий покрив може триматися до 80 днів на рік, а вегетаційний період тепер триває понад 150-160 днів [68].

За даними державної метеостанції “Львів” теплові ресурси Львівщини за рік становлять  $2865^{\circ}\text{C}$  при  $t > 5^{\circ}\text{C}$  і  $2595^{\circ}\text{C}$  при  $t > 10^{\circ}\text{C}$ . За історичний період метеоспостережень безморозний період триває 156 діб, останні заморозки бувають орієнтовно 24.05, перші – 15.09. Середньорічна температура повітря [59; 68] –  $7,9^{\circ}\text{C}$ , середньомісячна за липень –  $17,5^{\circ}\text{C}$ , за січень –  $-4,5^{\circ}\text{C}$ . Абсолютний максимум температури становив  $38^{\circ}\text{C}$ , мінімум –  $-34^{\circ}\text{C}$ . Середня глибина промерзання ґрунту становила 27 см, максимальна – 85 см, товщина снігового покриву впродовж зими була 4–9 см [68].

Річна сума середньобогаторічних опадів становить 748 мм, на липень припадає 102 мм (дод. В, рис. В.1) [59; 68]. Проте, останніми десятиліттями кліматична ситуація на Львівщині помітно змінюється. З півночі, північного сходу та зі сходу повторюваність вітрів у Львові найменша і становить відповідно 6, 7 та 9%.

Як повідомляють автори [15; 211], зміни мезоклімату за 10 років посприяли активному просуванню на північ таких теплолюбних культур, як соняшник, кукурудза і соя, персик тощо. За 14 років (рис. 4.1) відбувалося відчутне підвищення середньорічної температури, але виявилася тенденція до зменшення річної суми опадів (рис. 4.2). Тож межа кліматичних зон, ймовірно, змістилася майже 200 км.

За нашими спостереженнями [159] середньорічна температура повітря за 2010-2023 роки становила 9,0 проти 8,3°C у період 2010-2015 років (рис. 4.1). Середня максимальна температура сягнула 22,4°C, мінімальна опустилася до -4,2°C. Середня максимальна температура повітря упродовж усіх років мала тенденцію до зниження [80; 65]. Упродовж останніх 13-ти років [159] 2010 рік був найбільше дощовим (рис. 4.2). Вісім років мали опади вище середнього рівня. Проте, маловологі 2011, 2015, 2019, а особливо 2022 рік були дуже сухими. Кліматична норма у Малому Поліссі становить 748 мм. За 2010-2023 роки випало в середньому 751 мм.

Середньомісячні температури упродовж з квітня до вересня включно за період 2010-2024 років теж вагомо відрізнялися між собою (дод. В, рис. В.2, В.3 і В.4). Останніх чотири роки бачимо стрімке підвищення температур весняно-літнього вегетаційного періоду. Опади у весняно-літній період від 2020 року ставали щораз меншими (дод. В, рис. В.5). Аномально теплим у вегетацію був 2018 рік та 2024 рік польових досліджень (дод. В, рис. В.2).

В період проведення трирічних досліджень (2022-2024 рр.) метеорологічні умови були різними (дод. В., табл. В.1). Загалом 2022 рік був найсухішим за 14 років [80; 65].

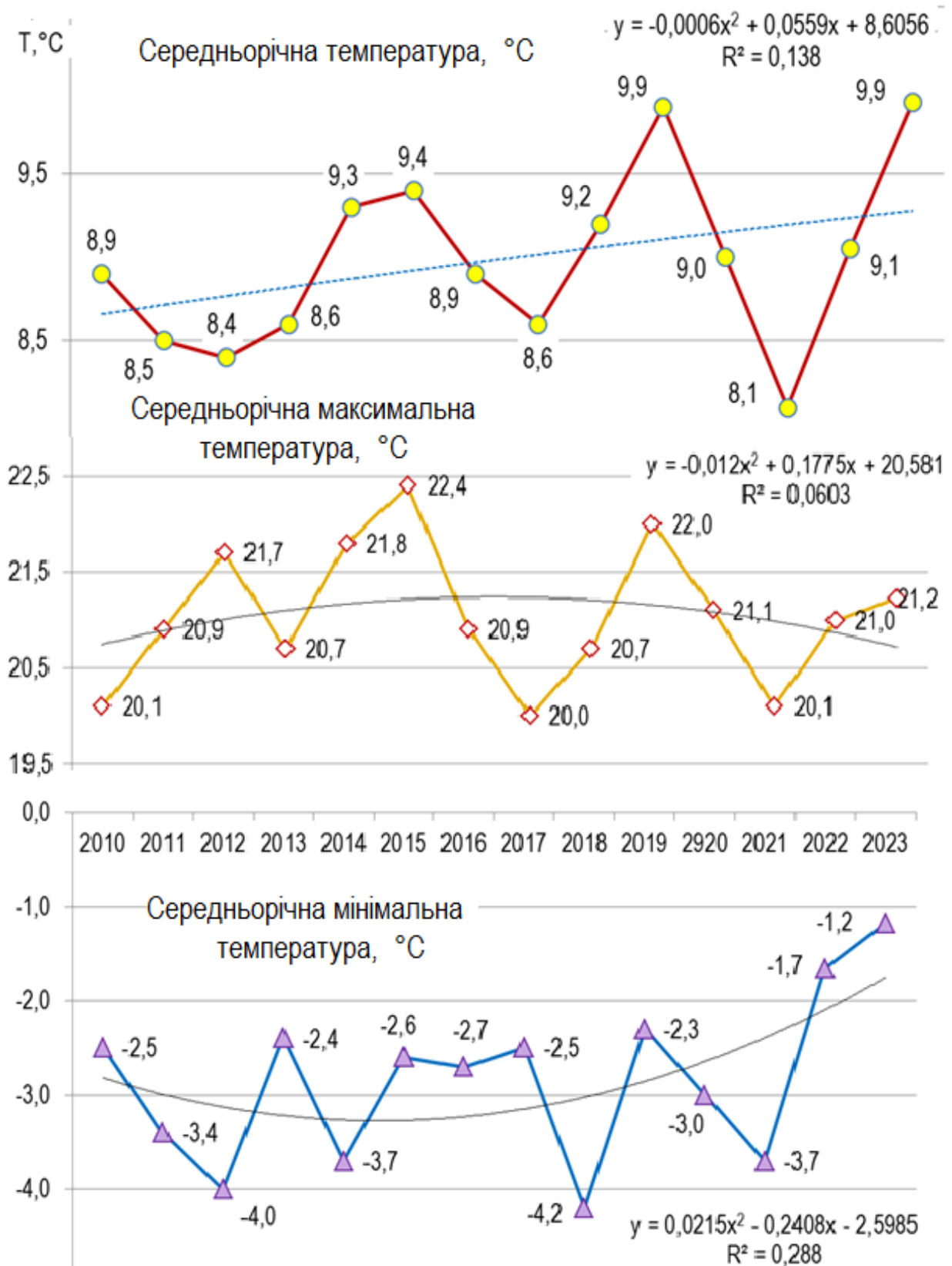


Рис. 4.1. Динаміка середньої температури року упродовж 2010-2023 рр.  
(метеопост Львів).

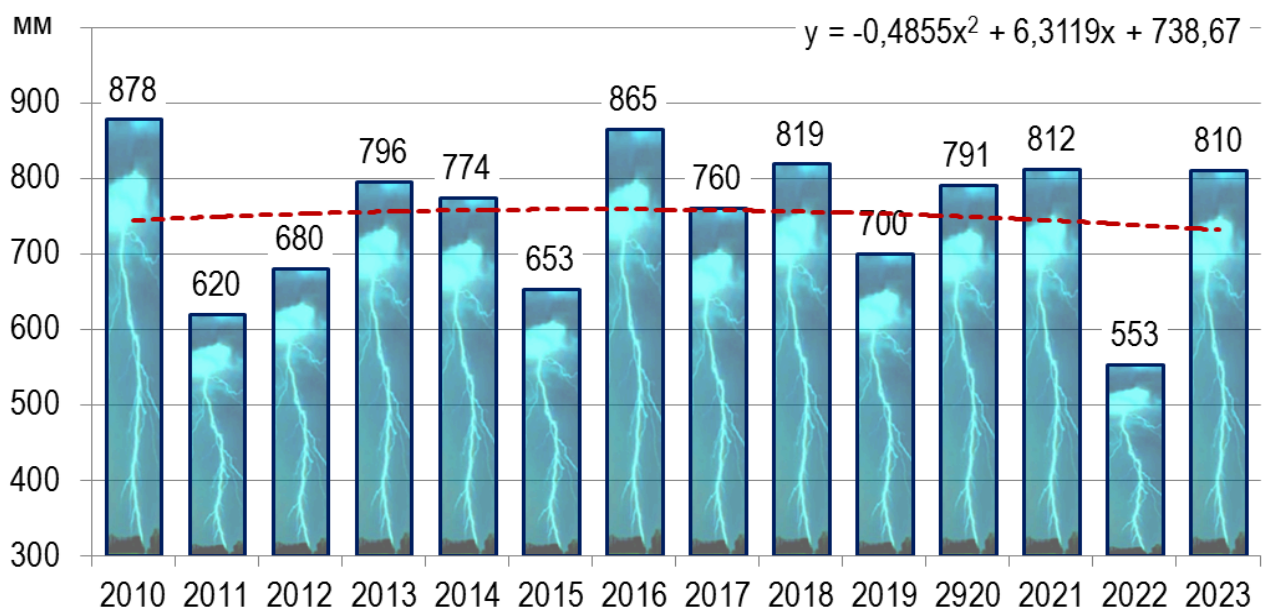


Рис. 4.2. Динаміка суми опадів упродовж 2010-2023 рр. (метеопост Львів).

Проте у весняно-літню вегетацію найменше опадів випало 2024 та 2015 та 2016 року (дод. В, рис. В.5). Достатньо теплим і збалансовано вологим виявився 2023 рік, що позитивно позначилося на продуктивності сої (дод. В., табл. В.1).

Щодо суми та розподілу атмосферних опадів дуже вологими загалом були 2013, 2018 і 2023 роки, перезволоженими – 2010, 2016 роки, а найсухішим були 2011, 2015 і 2022 рік. Середньорічна кількість опадів упродовж 14 років мала тенденцію до зменшення (рис. 4.2). Сума річних опадів від 2010 до 2023 року коливалася від мінімальної 2022 року (553 мм) до максимальної (878 мм) в перший рік спостережень. Сухий 2022 рік спричинив зниження врожайності сої, не зважаючи на достатній тепловий ресурс вегетаційного періоду. Загалом рівняння поліноміальної регресії температур і опадів (рис. 4.1 і рис. 4.2) показує тенденцію до аридизації гідротермічного режиму мезоклімату у Західному Лісостепу.

Вегетаційна динаміка температур 2022 року досліджень була традиційною, але саме серпень відрізнявся середньомісячною температурою – 20°C (рис. 4.3). Це позитивно відобразилося на формуванні врожаю сої, не зважаючи на травневий і червневий дефіцит опадів (рис. 4.4).

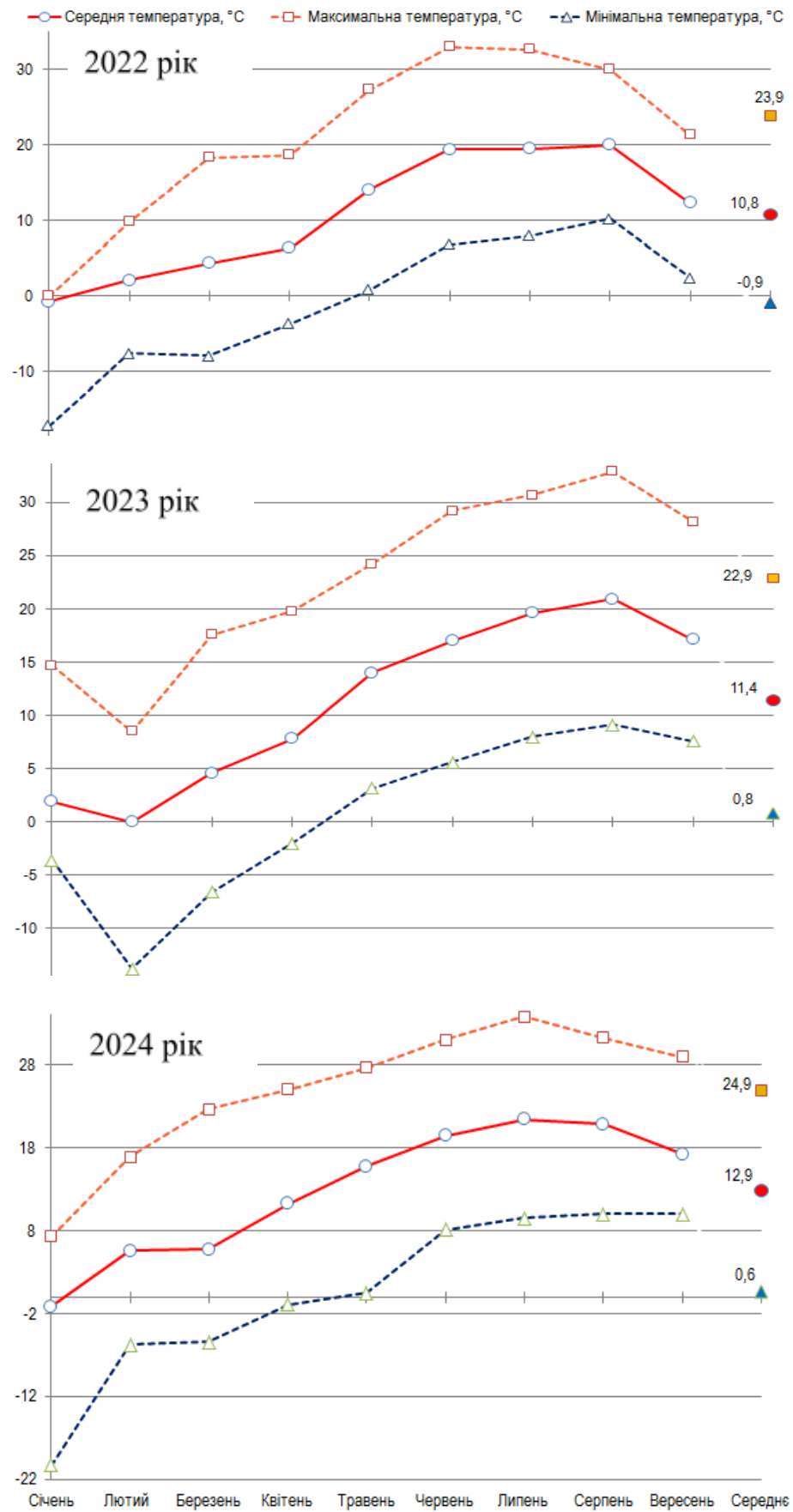


Рис. 4.3. Хід температур упродовж 2022-2024 рр., T°C. (метеопост Львів).

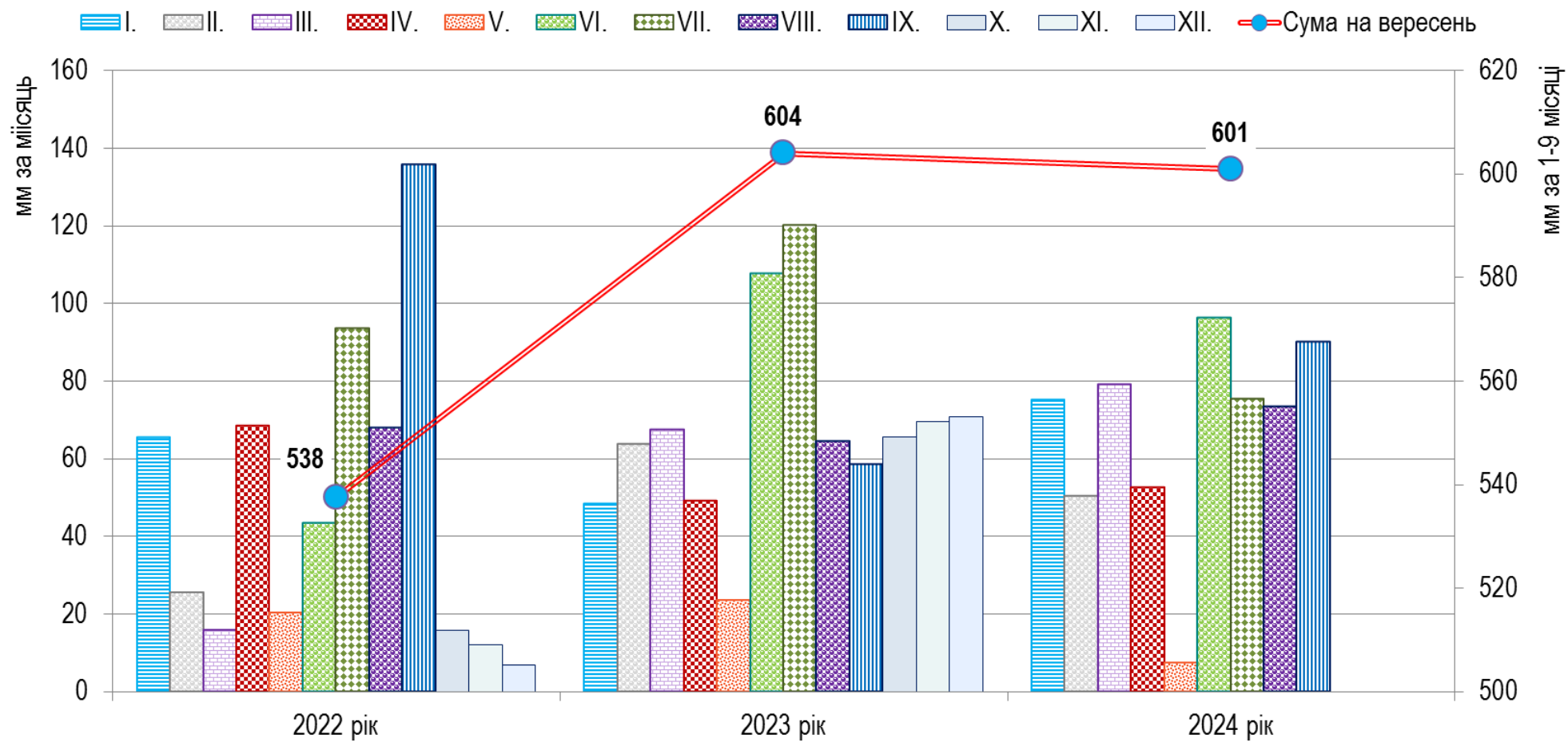


Рис. 4.4. Динаміка середньомісячних опадів упродовж 2022-2024 рр. (метеопост Львів).

2023 рік був теплішим та у серпні середньомісячна температура вже сягнула 20,9°C, перевищивши попередній рік. Хоч травень 2023 та 2024 року були посушливими, у червні випав надлишок опадів в обидва роки, що дуже посприяло формування врожаю сої. Липень в усі роки досліджень був вологим, проте лише 2023 рік відрізнявся істотним перевищенням середньобогаторічної норми на 19 мм (рис. 4.4). Загалом травень, червень і липень 2023 року були найвологішими за всі роки, достатньо теплими, тому цей рік забезпечив максимальну в досліді продуктивність сої.

Головним результатом взаємодії гідротермічних чинників та внесених добрив є врожай зерна сої [47; 48; 38; 159]. У наших експериментах без мінеральних добрив на дерновому глибокому глейовому піщанисто-легкосуглинковому ґрунті ми отримали в середньому за 2022-2024 роки 2,81 т/га зерна.

Найкращого 2023 року взаємодія природних чинників та технологічних прийомів дозволила зібрати 4,12 т/га зерна сої.

#### **4.2. Фенологічний розвиток сої**

Новітні сорти сої мають високу пластичність, але різну витривалість в умовах нових для культур природно-кліматичних зонах вирощування, зокрема до зволоження і температури. Погодні умови і технологічні прийоми виразно впливають на як тривалість вегетації, так і на плин окремих фаз росту і розвитку сої [39; 37; 13; 90; 89; 73; 74].

В умовах Малого Полісся на дерновому глибокому глейовому піщанисто-легкосуглинковому ґрунті норми азотного удобрення та фосфорно-калійний фон впливав на дату настання кожної фази і тривалість міжфазних періодів росту. Під впливом гідротермічних факторів, які щодобово представлені в додатках (дод. В., рис. В.6, 7 і 8) змінюється тривалість

вегетаційного періоду рослин сої. Погодні фактори впливають на довжину окремих фаз росту та розвитку сої.

Для розуміння біологічної природи врожаю, який формується на різних фонах мінерального, зокрема азотного живлення та дії інгібітора нітрифікації в ґрунті, важливо вести фіксацію фаз [177].

Як бачимо в табл. 4.1 тривалість періодів «сівба - повні сходи» та «повні сходи – бутонізація» упродовж трьох років досліджень за варіантами досліду відрізнялися мало. Проте, простежена виразна тенденція прискорення початку вегетації за використання інокулянтів насіння на фоні  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію) + ХайКот Супер Соя, або/і Райс Пі.

Фаза «бутонізація – квітування» була найтривалішою за сумісного використання двох інокулянтів на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Подібна тенденція встановлена на фоні  $P_{60}K_{60}$  з внесенням сульфату амонію  $N_{30}$  перед сівбою та з підживленням  $N_{30}$  у фазі бутонізації. Застосований нітрапірин на одну-дві доби скорочував цей перехід.

На фоні використання амонійної селітри в нормі  $N_{30}$ , а також з підживленням  $N_{30}$  інгібітор навпаки продовжував тривалість фази. Це свідчить про певне усунення антагонізму азофіксувального апарату сої та нітратів у зоні кореневої системи.

Період «квітування – стиглість» був найбільше розтягнутий за систем удобрень  $N_{30}P_{60}K_{60} +$  підживлення  $N_{30}$  у формі сульфату амонію у фазі бутонізації – 69-71 доба. Дія нітрапірину скорочувала цей період на 2-3 доби. Подовжена тривалість міжфазного періоду «квітування - стиглість» була також виявлена за використання інокулянтів на одинарній нормі азоту.

Загальна тривалість вегетації культури сильно коливалася упродовж трьох років і була пов'язана з погодними умовами, які впливали на дію добрив, нітрапірину та інокулянтів (дод. В., рис. В.6, 7 і 8). Подвійна норма азоту, а також одинарна із використанням азотних та фосфорних інокулянтів продовжувала вегетацію сої упродовж 2023 і 2024 років.

Таблиця 4.1. Вплив систем удобрення сої, нітрапірину та інокуляції на тривалість вегетаційних періодів.

Варіант системи удобрення	Норма внесен ня азоту, кг/га	Тривалість міжфазних періодів, діб												Тривалість вегетації, діб		
		Сівба – повні сходи			Сходи – бутонізація			Бутонізація – квітування			Квітування – стиглість					
		20	20	20	2	2	2	2	2	2	20	20	20	2	2	2
		22	23	24	0	0	0	0	0	0	22	23	24	0	0	0
		р.	р.	р.	2	2	2	2	2	2	р.	р.	р.	2	2	2
		Дата сівби			2	3	4	2	3	4	Дата збирання			2	3	4
29.04	24.04	25.04	р.	р.	р.	р.	р.	р.	10.10	05.10	01.10	р.	р.	р.		
Контроль – без удобрення	0	10	15	12	32	30	35	10	11	10	69	67	64	111	108	109
Фон – Р60К60 (*п.ор.)	0	10	13	11	30	28	33	10	9	9	67	64	63	107	101	105
Фон + N30 – *Nsa (*п.с.)	30	10	12	11	31	33	35	12	10	11	69	69	70	112	112	116
Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)	30	10	12	12	30	31	34	13	10	12	68	67	67	111	108	113
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	10	13	14	30	32	33	15	16	15	69	70	71	114	118	119
Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	10	12	13	29	30	30	14	15	14	67	69	68	110	114	112
Фон + N30 – *Naa	30	10	10	11	30	29	30	13	14	12	66	67	67	109	110	109
Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)	30	10	11	10	29	31	30	15	15	16	67	68	69	111	114	115
Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	60	10	11	10	30	32	31	15	16	15	66	67	66	111	115	112
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + ХайКот Супер Соя	30	9	9	9	28	29	29	13	15	14	68	70	68	109	114	111
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + Райс Пі	30	9	9	10	28	30	29	14	14	13	67	68	68	109	112	110
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + ХайКот Супер Соя + Райс Пі	30	9	9	9	29	28	30	15	16	16	69	70	69	113	114	115

Інгібітор нітрифікації у всіх випадках застосування із сульфатом амонію спричиняв пришвидшення завершення вегетації сої на 6-7 діб, з амонійною селітрою продовжував вегетацію на 4-5 діб (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

**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 2022-2024 років**

Фаза вегетації (сівба – збирання)	Дати настання фаз вегетації		
	2022 р.	2023 р.	2024 р.
<b>Сівба</b>	<b>29.04</b>	<b>24.04</b>	<b>25.04</b>
Сходи ВВСН 10-11	08.05	13.05	10.05
Перший трійчастий листочок ВВСН 12	27.05	31.05	30.05
Три трійчастих листочки ВВСН 14	08.06	17.06	10.06
Початок квітування ВВСН 61	21.06	25.06	22.06
Формування бобів ВВСН 75-77	02.07	09.07	07.07
Побуріння бобів ВВСН 85	28.09	18.09	24.09
Достигання бобів ВВСН 87-92	05.10	29.09	15.09
<b>Збирання</b>	<b>10.10</b>	<b>05.10</b>	<b>01.10</b>

О. Г. Міленко [64] повідомляє, що на Полтавщині найбільше на тривалість періоду вегетації та окремих фаз росту і розвитку рослин сої впливали погодні умови року і спостерігали значне скорочення вегетаційного періоду рослин сої в посушливих умовах.

Отже у наших дослідях переконуємося, що живленням сої азотом дати настання фаз і тривалість її вегетації можна регулювати застосуванням нітрапірину в комбінації з амонійною та нітратною формами добрив, а також використанням інокулянтів азотфіксаторів та фосформобілізаторів.

#### 4.3. Ріст сої і висота утворення нижніх бобів залежно від удобрення, стабілізації азоту та інокуляції насіння

Особливості росту й розвитку зернобобової культури сої передбачає певну залежність врожаю від кількості стебел. В пізньостиглих і середньостиглих сортів, як Ментор, ця властивість сильніша, що пов'язано з послідовною та тривалою диференціацією генеративних органів і, як наслідок – залежність даних процесів від умов вирощування та впливу погодних чинників (дод. В., рис. В.6, 7 і 8).

Мала висота рослин сої (73 см) виявлена на неудобреному контролі (рис. 4.4; дод. В, табл. В.2).

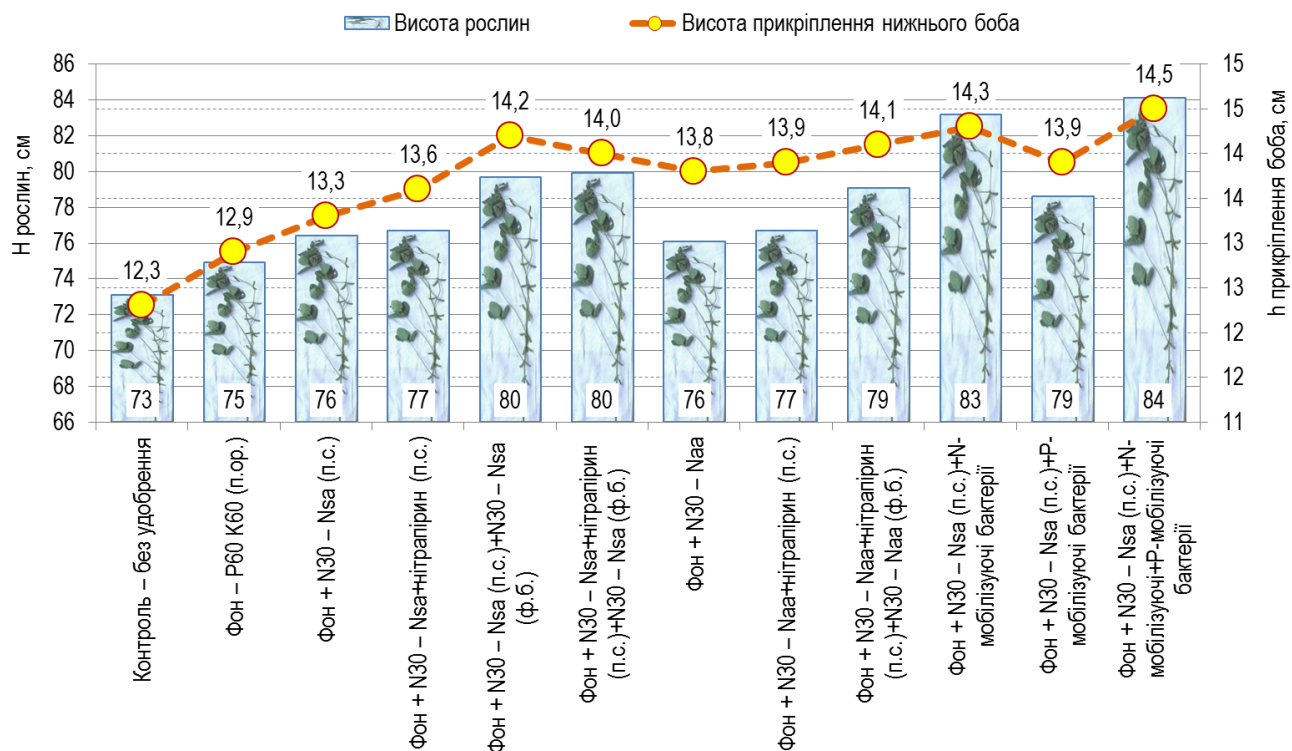


Рис. 4.4. Залежність висоти рослин сої та прикріплення нижнього боба від системи удобрення, застосування нітрапірину та інокулянтів (за даними спостережень 2023 року).

На фосфорно-калійному фоні, де соя живилася виключно бульбичковим фіксованим з повітря азотом, висота рослин становила 75 см. Мінеральний азот у формі сульфату амонію у нормі  $N_{30}$  сприяв збільшенню висоти росли на 3-4 см

відносно неудобреного контролю. Амонійна селітра забезпечувала такий самий ріст сої у висоту, а внесений в обох варіантах нітрапірін посилював ефект, але не на значну величину.

Подвоєння норми азоту додатковим підживленням за обох форм добрив додавав рослинам 3-4 см висоти. Проте амонійна селітра не сприяла більшому росту сої з використанням нітрапірину. Натомість на фоні сульфату амонію інгібітор мав позитивний вплив.

На мінімальному фоні азоту  $N_{30}$  і сульфату амонію використання інокулянта з азотомобілізуєчими бактеріями сприяло росту рослин до 83 см, а поєднання двох інокулянтів азотфіксувального та фосформобілізуєчого збільшило висоту рослин до найвищого в досліді показника 84 см.

Б. Фукс і Н. Баумгартнер [87] повідомляють, що стабілізовані інгібіторами нітрифікації процеси дають змогу вносити вищі дози азоту без ризику переходу його надлишків у нітрати. З'являється можливість рослинам отримувати необхідне забезпечення азотом відповідно до потреб триваліший на 10-15 діб період, оскільки дія інгібітора ензимів залежить від температури. Водночас рослини налаштовується і на амонійне живлення.

Удобрення сульфатом амонію у нашому дослід в дозі  $N_{30}$  та обробка посівного матеріалу N-мобілізуєчими та P-мобілізуєчими бактеріями сприяє високому закріпленню боба – 14,5 см від поверхні ґрунту (рис. 4.4; дод. В, табл. В.2). Приблизно подібну, але меншу висоту прикріплення, мали боби у рослин на фоні удобрення сульфатом амонію в дозі  $N_{30}$  з обробкою посівного матеріалу N-мобілізуєчим інокулянтом та з подвійним удобрення сульфатом амонію – 14,2-14,3 см. Застосування нітрапірину лише за подвійного удобрення азотом зменшувало висоту прикріплення боба. На малих нормах як сульфату амонію, так і амонійної селітри інгібітор сприяв збільшенню висоти розміщення боба над ґрунтом.

І. В. Федорук та ін. [85] повідомляють, що найкращий ріст і розвиток сої різних сортів був на варіантах, де практикували поєднання високоефективних

інокулянтів, у тому числі Хай Кот Супер, що сприяло збільшенню висоти рослин на 16,2 см, порівняно до контролю.

#### 4.4. Вегетаційна динаміка маси бульбочок сої залежно від систем удобрення та інокуляції

Удобрення сої фосфором і калієм без азотних мінеральних добрив сприяло формуванню більшої маси активних бульбочок на коренях – на 0,08 г у фазі бутонізації та на 0,05 г при квітуванні рослин. Внесення мінімальної ( $N_{30}$ ) норми азоту у вигляді сульфату амонію не змінило динаміку бульбочкоутворення у сої. Проте, поєднання його з нітрапірином 1,7 л/га активізувало утворення азотфіксувального апарату коренів від бутонізації до досягання бобів. У фазі квітування приріст маси бульбочок досяг 0,26 г (рис. 4.5; дод. В, табл. В.2).

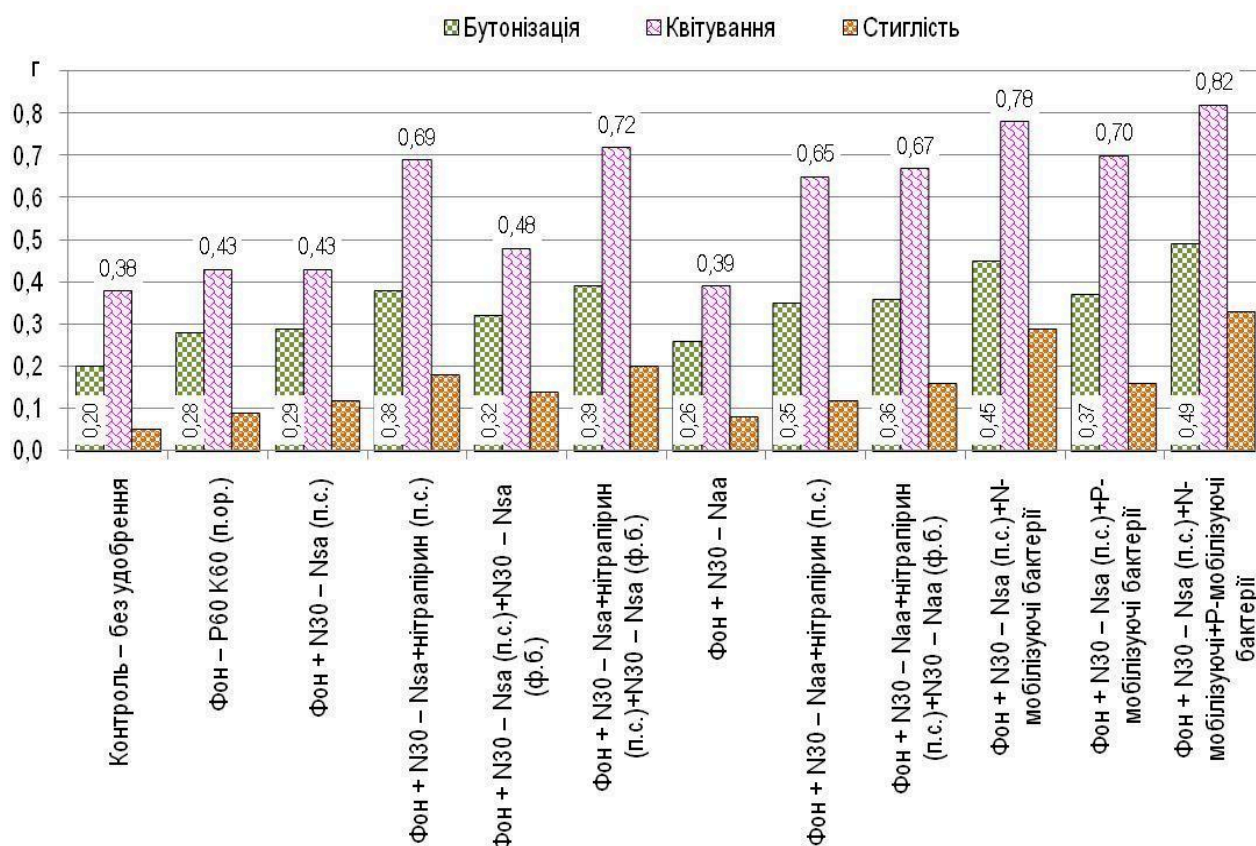


Рис. 4.5. Залежність маси бульбочок на коренях сої від системи удобрення, застосування нітрапірину та інокулянтів (за даними спостережень 2023 року).

Подібний результат встановлений за підживлення сої  $N_{30}$  – приріст маси бульбочок у фазі квітування досяг 0,29 г. Амонійна селітра як з нітрапірином, так і за подвійної норми внесення азоту не сприяла більшому бульбочкоутворенню.

Найдинамічніше процес бульбочкоутворення відбувався за оброблення насіння інокулянтами. Так, використаний препарат ХайКот Супер Соя, який містить азотмобілізаційні бактерії *B. japonicum*, забезпечив утворення бульбочок у фазі бутонізації масою 0,45 г, у фазі квітування – 0,78 та до фази стиглості 0,28 г. Інокулянт Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens*, не перевищував за ефективністю азотбактеріальний інокулянт, але підтримував нарощування маси бульбочок на рівні найбільших норм добрив та нітрапірину.

Поєднане застосування препаратів ХайКот Супер Соя, який містить азотмобілізаційні бактерії *B. japonicum*, та Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens*, забезпечило найвагоміший позитивний ефект щодо утворення симбіотичного апарату азотфіксації у сої на фоні невеликих норм добрив  $N_{30}P_{60}K_{60}$  без додаткового застосування стабілізатора азоту, який пригнічує утворення нітратів.

Отже, контроль концентрації нітратів у ґрунті, які затримують бульбочкоутворення симбіотичного апарату, за допомогою заміни амонійної селітри на сульфат амонію, з використанням інгібітора нітрифікації та обмеження норм внесення азоту не досягає такого вагомого результату, як сумісне застосування інокулянтів ХайКот Супер Соя, який містить азотмобілізаційні бактерії *B. japonicum*, та Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *Bacillus*. Маса бульбочок на рослині у бутонізацію становила найбільші величини – 0,49 г, і за квітування 0,82 г.

Н. Fujikake et al [147] в контрольованих умовах живильного середовища спостерігали за верхньою частиною бульбочкового кореня сої, культивованого на гідропонії, і вимірювали діаметр окремих бульбочок через 10–24 дні після

початку росту. Діаметр кореневої бульбочки, прикріпленої до первинного кореня, збільшився з 1 мм до 6 мм упродовж 2 тижнів в умовах без азоту. Збільшення діаметра бульбочок було майже повністю зупинено після першого дня подачі експериментальної дози нітрату, і це було пов'язано з припиненням розширення клітин бульбочок. Проте ріст бульбочок швидко повернувся до нормальної швидкості після видалення нітрату з розчину. Пригнічення росту бульбочок нітратом було подібне до обмеження постачання фотоасиміляту в темряві протягом двох днів з подальшим нормальним чергування освітлення і темряви. Крім того, інгібуючу дію нітрату було частково послаблено додаванням 3% (мас./об.) сахарози до середовища. Ці результати вказують на те, що зниження надходження фотоасиміляту до бульбочок може бути залучено до швидкого та оборотного інгібування нітратами росту бульбочок сої.

N. Yamashita et al [258] повідомляли, що додавання нітрату в живильний розчин швидко пригнічує ріст бульбочок і активність азотфіксації сої. У цьому дослідженні автори виявили, що коли рослини сої культивували з поживним розчином без азоту пригнічувальний ефект був відсутній. Видалення азоту з поживних розчинів після підживлення азотом призвело до відновлення росту бульбочок. Було виявлено, що обробка глутаміном з наступним культивуванням без азоту дала найвищу активність фіксації азоту – приблизно в два рази порівняно з контролем. Інгібувальний ефект сполук азоту, як виявилось, пов'язаний із зменшенням розподілу фотоасиміляту в бульбочках, а не з потраплянням доданого азоту у вузлики. Концентрація вільних амінокислот після обробки азотом була збільшена в бульбочках і листках нітратами, в коренях амонієм, в стеблах сечовиною, а в коренях, стеблах і листках – з обробкою глутаміном. Концентрації аспарагіну, аспартату та глутаміну були збільшені після додавання азоту. При тривалому забезпеченні азотом протягом 2-х тижнів селітра значно посилювала ріст бічних коренів і листя. Тривале надходження сечовини та глутаміну також сприяло розвитку бічних коренів і росту листя, але амоній пригнічував їх.

#### 4.5. Формування бобів та озерненість сої залежно від систем удобрення

Формування врожаю сої прямо пов'язане з кількістю бобів на рослині та озерненістю кожної рослини. Кількість бобів на рослині залежала від систем удобрення сої. На неудобреному фоні виявлено 13,2 боба на рослині, що становило найменший показник у досліді (рис. 4.6; дод. В, табл. В.2).

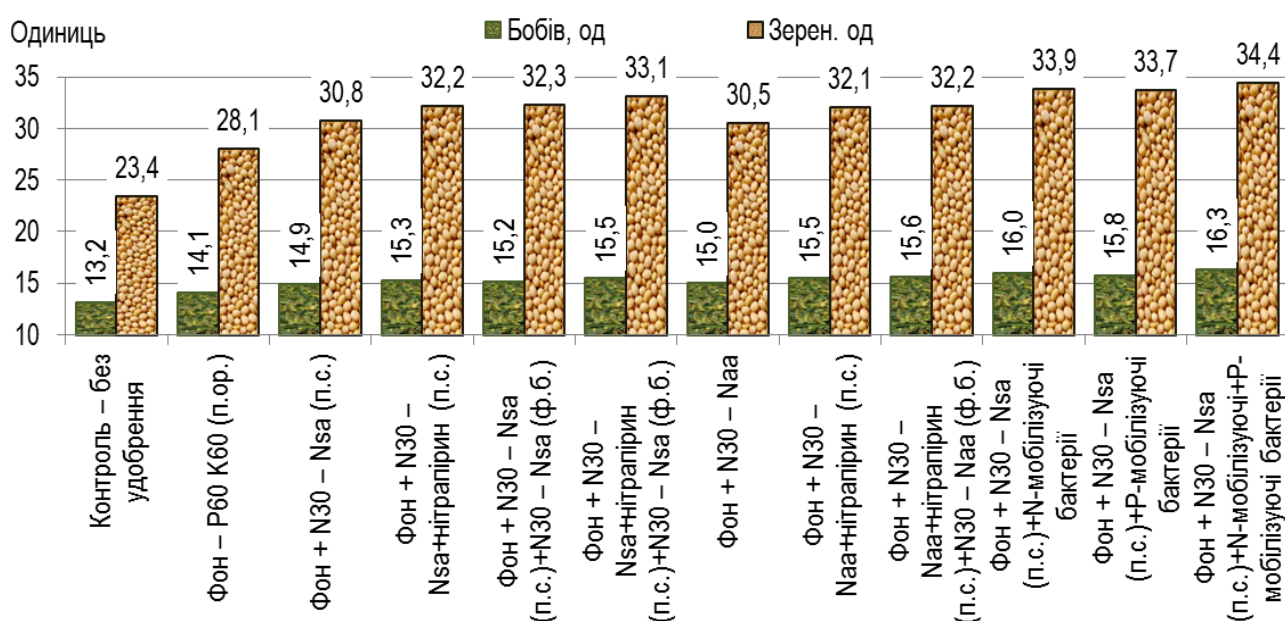


Рис. 4.6. Вплив систем удобрення сої на кількість бобів та зерен на рослині (за даними спостережень 2023 року).

Лише фосфорно-калійний фон (P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>) підвищував кількість бобів на 0,9 одиниці. Внесення на цьому фоні N<sub>30</sub> (як сульфату, так і нітрату амонію) сприяє збільшенню кількості бобів на 1,7-1,8 одиниці. На цих варіантах системи удобрення дія нітрапірину була тільки позитивною і підвищення кількості бобів становило 0,4-0,5 одиниці.

Найбільша кількість бобів (16,0-16,3 од.) утворювалася за внесення норми азоту N<sub>30</sub> на фоні P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> та при використанні інокулянта ХайКот Супер Соя, який містить азотмобілізаційні бактерії *B. japonicum*, а також поєднання його та

інокулянта Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens*.

Зернопродуктивність однієї рослини за використання інокулянта ХайКот Супер Соя, який містить азотмобілізаційні бактерії *B. japonicum*, а також поєднання його та інокулянта Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens*, при внесенні норми азоту  $N_{30}$  на фоні  $P_{60}K_{60}$  була максимальною в досліді і становила 33,9-34,4 зернини на рослину.

Добре виражена позитивна реакція сої за показником озерненості як на фосфорно-калійному фоні без азоту ( $P_{60}K_{60}$ ), так і на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  із застосуванням інокулянта Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens*. Фосфор для азотфіксувальної культури сої відіграє дуже важливу роль щодо генеративних функцій, тому озерненість рослини зросла від 23,4 одиниць на контролі без добрив до 28,1 одиниці на фоні фосфорно-калійних добрив навіть без додаткового удобрення азотом.

Системи удобрення, стабілізація азоту в ґрунті та інокуляція насіння вагомо впливали на вагові параметри зерна сої. Мінімальну масу 1000 зерен спричинило внесення амонійної селітри на фоні  $P_{60}K_{60}$ , що свідчить про негативних вплив нітратів на продуктивність сої (рис. 4.7; дод. В, табл. В.2). У цьому зв'язку виділяємо дуже виразну позитивну реакцію сої на внесення нітрапірину як за одинарної норми  $N_{30}$ , та і за подвійної  $N_{30-60}$ , як при внесенні сульфату амонію, так і нітрату.

Пороте, найбільша маса 1000 зерен отримана при застосуванні інокулянтів: як азотбактеріального, так і фосформобілізаційного. Окреме застосування препаратів – ХайКот Супер Соя, який містить азотмобілізаційні бактерії *B. japonicum*, а також поєднання його та інокулянта Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens*, а також їх поєднання забезпечило масу 1000 зерен в діапазоні 194,1-193,5-194,9 г.

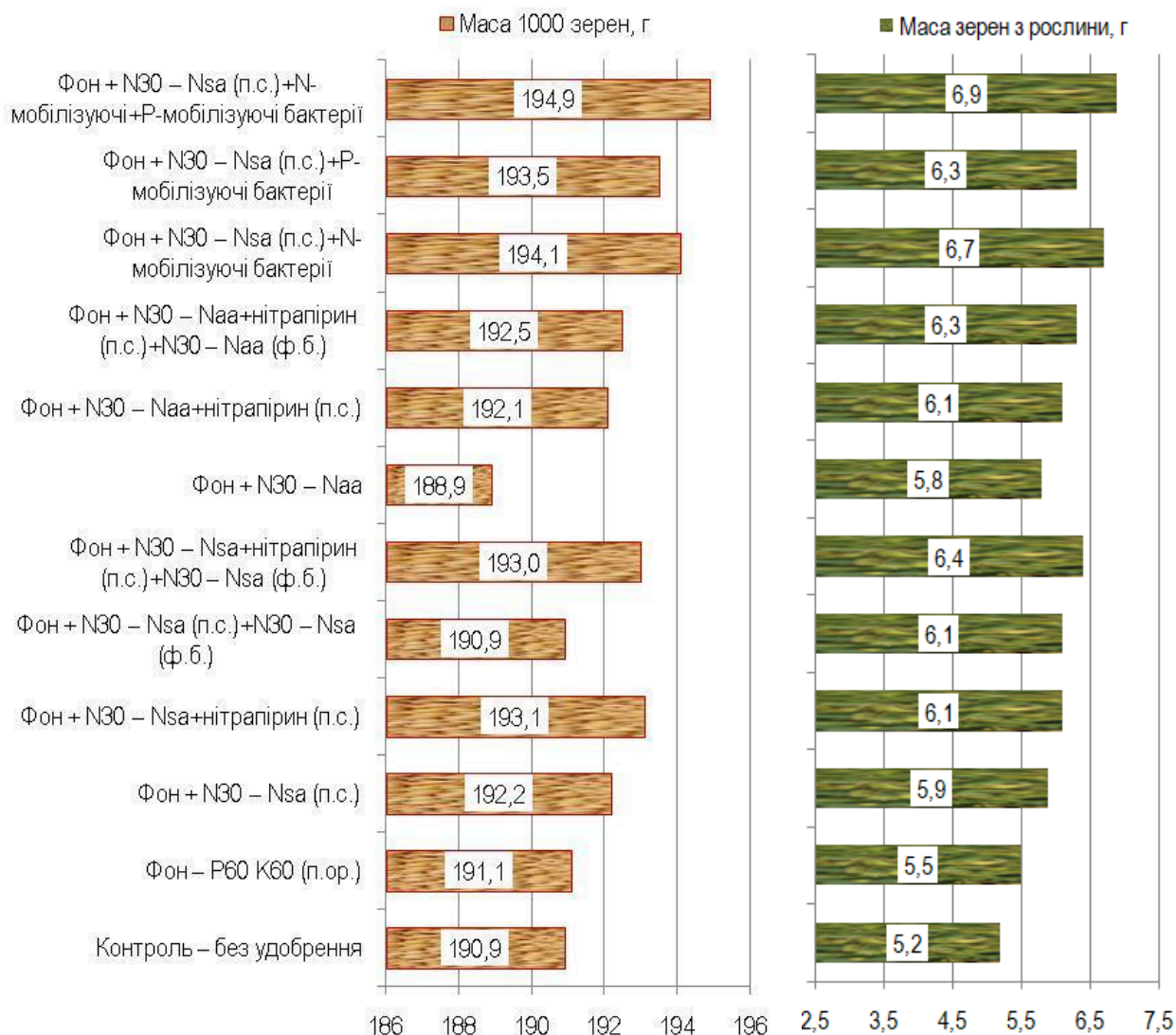


Рис. 4.7. Вплив систем удобрення сої на масу зерен з рослини і на масу 1000 зерен (за даними спостережень 2023 року).

На одній рослині виявлено від 5,2 до 6,9 г зерна, залежно від варіанту дослідження. Використання інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  спричинило утворення 6,3-6,9 г зерна на рослині. Це на 1,0 г більше, ніж на фоні традиційного удобрення сої  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Сульфат амонію демонстрував перевагу над амонійною селітрою, а подвоєння норми азоту до 60 кг/га мало позитивний вплив лише за внесення нітрапірину. Про виразний позитивний вплив на морфологічні ознаки сої від інокуляції повідомили також A. Faligowska & J. Szukała [139].

#### 4.6. Стан асиміляційного апарату сої та візуальна оцінка стану посівів

Портативний прилад Яра N-тестер (Yara N-Tester™), розроблений компанією Yara International ASA (Осло, Норвегія), дає змогу зібрати дані про активність асиміляційного апарату завдяки тестуванню листків у найбільш вагомій фазі розвитку сої. N-тестер відображає активність хлорофілу, яка пропорційна його концентрації в листках, та вказує на актуальний рівень забезпеченості асиміляційного апарату азотом. Про це повідомляли багато дослідників у спеціальних оглядах [169; 225; 151; 157].

Використання М. А. Ortuzar-Iragorri et al [204] N-тестера для тестування хлорофілу з метою з'ясування потреби третього внесення азоту під пшеницю в умовах вологого Середземномор'я показало тісну кореляцію ( $R^2 \geq 0,72$ ) між концентрацією азоту (%) у листовій пластинці з показниками N-тестера на ранній фазі вегетації – поява прапорцевого листка, цвітіння та наливу зерна, а також при наливі зерна. Крім того, був встановлений тісний зв'язок ( $R^2 = 0,87$ ) між урожаєм зерна і показниками N-тестера.

Для експрес-оцінки азотного живлення рослин В. Kulig et al [175] описали різні пристрої та програми, які дають приблизний показник насиченості листків хлорофілом шляхом демонстрації відносного вмісту хлорофілу або інтенсивності зеленості листя. У своєму дослідженні автори порівнювали вміст хлорофілу та зеленість листя, визначені трьома приладами [255]: SPAD-502 (технологія спектру Minolta SPAD), Hydro N-Tester і смартфон Samsung (програма RGB). Додатково лабораторне визначення вмісту хлорофілу порівнювали зі значеннями аналізу ґрунт-рослина (SPAD). Досліджуваними культурами були соя та інші культури. Результати показують тісний зв'язок між показниками приладів SPAD і RGB, що підтверджують інші автори [178].

Вимірювання N-тестером сильно залежать від різних культур і стадії росту. З цієї причини вимірювання приладу повинні бути відкалібровані з урахуванням об'єкта вимірювань [119].

N-тестер ми використали для вимірювання вмісту хлорофілу в листках, який пов'язаний з азотним станом рослини. Точка вимірювання завжди знаходилася в середині пластини повністю розвиненого листа на верхніх пагонах. Не менше 25 вимірювань із зигзаподібним рухом по обліковій ділянці дають середнє значення по повторності. Три повторності досліду дали нам середні значення, які ми представили в додатку В, рис. В.1.

Вимірювання на початку квітання сої показало, що оптична активність листків була максимальною за системи удобрення, де фон  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (перед сівбою) з обробкою насіння інокулянтами з N-фіксувальними та P-мобілізаційними бактеріями (дод. В, рис. В.9). Її показник коливався від 517 до 546 одиниць (середнє 538 умовних одиниць). Мінімальною оптична активність була на контролі без добрив (в середньому 449 ум. од.), що свідчить про мінімальні ресурси азоту в листках сої.

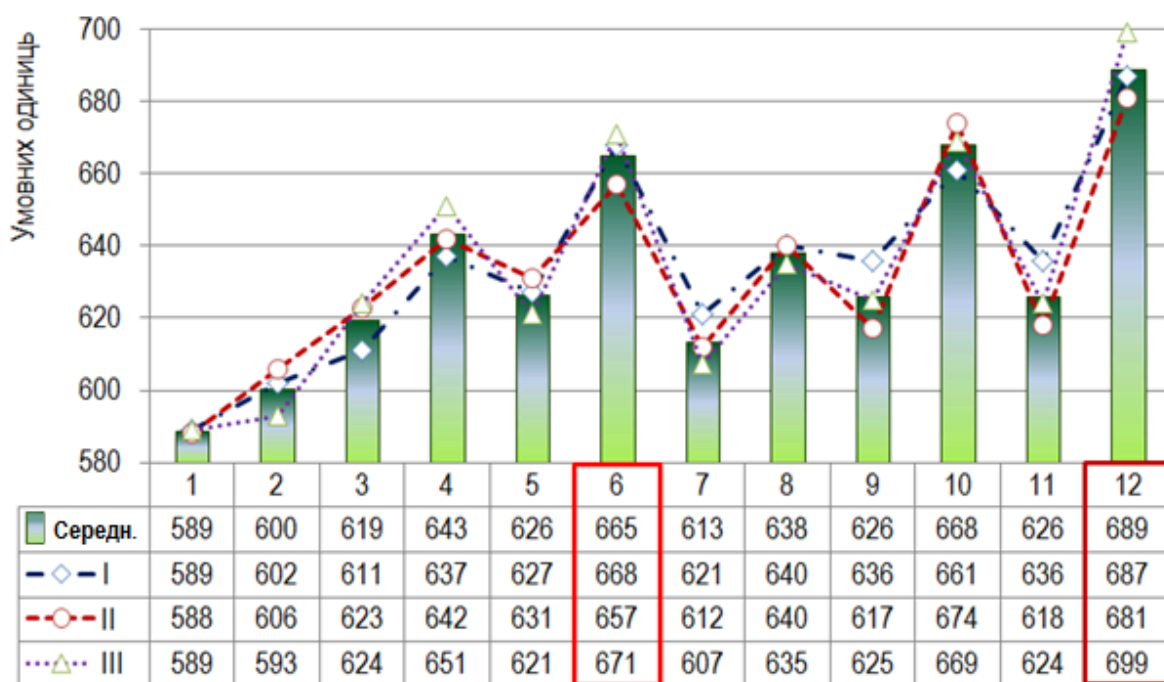
Внесення нітрапірину на початковому ( $N_{30}$ ) та підвищеному ( $N_{60}$ ) фоні азоту у формі сульфату амонію за  $P_{60}K_{60}$  під оранку істотно збільшувало показники оптичної активності, що свідчить про поліпшення азотного живлення сої. За використання амонійної селітри такого поліпшення не спостерігали. Система удобрення на варіанті 10 – фон +  $N_{30}$  (сульфат амонію перед сівбою з використанням інокулянта N-мобілізуючих бактерій, поступалася за рівнем азотного живлення листків варіанту 12 та варіанту 6, де система удобрення була фон +  $N_{30}$  (сульфат амонію з використанням нітрапірину перед сівбою) та підживлення  $N_{30}$  (сульфат амонію у фазі бутонізації).

На вищих рівнях фотооптичної активності листків у фазі формування бобів повторилася подібна закономірність дії систем удобрення на вміст азоту в асиміляційному апараті, тільки з виразнішою різницею між варіантами (дод. В,

рис. В.9). Мінімальна забезпеченість листків азотом у фазі формування бобів виявлена у п'ятому та дев'ятому варіантах, де застосували  $N_{30+30}$  сульфату амонію на фоні  $P_{60}K_{60}$ , або  $N_{30}$  амонійної селітри на фоні  $P_{60}K_{60}$ . За поєднання сульфату амонію та нітрапірину забезпеченість листків азотом виразно поліпшилася. У поєднанні нітрапірину з амонійною селітрою живлення азотом не покращилося.

За системи удобрення фон +  $N_{30}$  (сульфат амонію) і поєднання застосування інокулянтів N-мобілізаційних та P-мобілізаційних бактерії рівень забезпеченості листків азотом продовжував підвищуватися і показники оптичної активності за N-тестером збільшилися в діапазоні від 565 до 585 ум. од.

У фазі побуріння бобів (рис. 4.8) оптична активність найнижчою була на варіанті без удобрення – 589 ум. од., але була вищою від найкращих варіантів у фазі формування бобів.



1-12 – номери варіантів систем удобрення дивитися у табл. 2.1 розд 2.

Рис. 4.8. Результати вимірювання активності хлорофілу N-тестером 2023 року вегетації у фазі побуріння бобів, в умовних одиницях

( $\text{NIP}_{05}$  абсол. = 11 ум. од. – дод. В, табл. В.3)

Це свідчить, що до фази побуріння бобів соя володіла найвищими ресурсами асимільованого азоту і на жодному варіанті не було ознак голодування. Проте, у фазі побуріння бобів виразно виділилися відмінності і переваги найкращих варіантів систем удобрення сої. Це добре ілюструють світліни у додатку В, рис. В.10-15.

Можемо впевнено стверджувати, що при застосуванні нітрапірину на початковому ( $\text{N}_{30}$ ) та підвищеному ( $\text{N}_{60}$ ) фоні азоту у формі сульфату амонію за  $\text{P}_{60}\text{K}_{60}$  під оранку істотно поліпшується рівень забезпечення сої азотом. Без нітрапірину на початковому ( $\text{N}_{30}$ ) фоні азоту у формі сульфату амонію за  $\text{P}_{60}\text{K}_{60}$  під оранку застосування інокулянта Хай Кот Супер, який містить азотфіксувальні бактерії *B. japonicum* (варіант 10), а також за такої ж системи удобрення поєднання його з інокулянтом Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens* (варіант 12) забезпечення азотом листків сягнуло найвищих рівнів – відповідно 668 та 689 умовних одиниць. Застосування сумарної норми азоту 60 кг/га д.р. у формі сульфату амонію у поєднанні з нітрапірином за забезпечення сої азотом зайняло третю позицію – 665 ум. од. Амонійна селітра не мала подібної позитивної дії навіть за внесення інгібітора нітрифікації.

Усереднені показники фотоптичної активності хлорофілу, виміряні Yara N-Tester™ 2023 року, показані на рисунку 4.9. Усі варіанти системи удобрення сприяли стрімкому покращення забезпечення азотом сої, за виключення неудобрених ділянок. Дещо стабільнішим засвоєння азоту було на варіантах з нітрапірином, який навіть за внесення несприятливої для сої амонійної селітри підвищував асиміляцію азоту листками до фази побуріння бобів. У цю критичну фазу формування якісного, багатого білком зерна, застосування при сівбі інокулянтів – препаратів Хай Кот Супер (бактерії *B. japonicum*) Райс Пі (бактерії *B. amyloliquefaciens*) на фоні  $\text{P}_{60}\text{K}_{60} + \text{N}_{30}$  (сульфат амонію) листки сої містили найбільше азоту, судячи з фотоптичної активності хлорофілу.

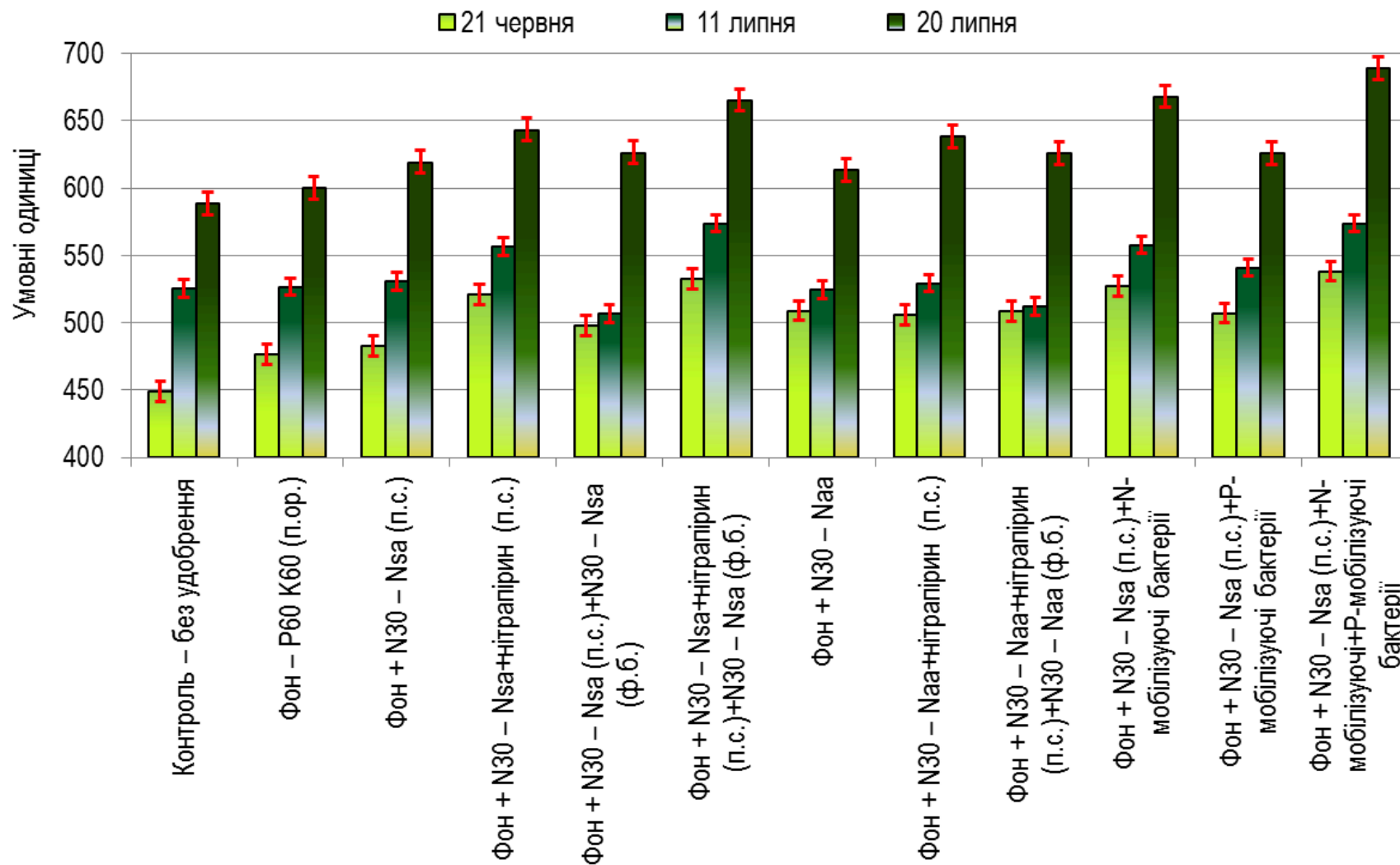


Рис. 4.9. Результати вимірювання N-тестером фотоптичної активності хлорофілу 2023 року вегетації на початку квітування (21.06), формування бобів (11.07) і побуріння бобів 20.07), умовних одиниць.

Досліджені нами закономірності зміни оптичних властивостей асиміляційного апарату сої, що отримує різне азотне живлення, дуже мало і фрагментарно висвітлені в науковій літературі. Експерименти Н. Bai & L. C. Purcell [101] з тестуванням листків сої показали, що раннє старіння асиміляційного апарату сої, яка піддавалася впливу посухи, спричинене втратою хлорофілу. Це дослідження кількісно оцінювало загальну зеленість стеблостою сої за допомогою цифрового аналізу зображень. Встановлено [169] також, що концентрація азоту в листках стабільно знижувалася упродовж наливу зерна для всіх сортів. Індекс щільності зеленого кольору зменшувався упродовж періоду наливу зерна. Автори [101; 223] стверджують, що неруйнівне тестування листків сої дає тісну кореляцію хлорофілу та азоту в рослині.

Аналіз V. Hoyos-Villegas et al [160] результатів тестування показав, що показник щільності зеленого кольору посівів, отриманий із зображень, зібраних за період від початку утворення боба до наповнення зерна, позитивно корелював з урожаєм зерна. Моделі, розроблені за допомогою множинного регресійного аналізу, показали сильний зв'язок між даними, отриманими за допомогою аналізу зображень і врожайністю зерна (індекс апроксимації або квадрат коефіцієнта кореляції  $R^2 = 0,74$ ), між швидкістю росту культур ( $R^2 = 0,69$ ) і фотосинтезом ( $R^2 = 0,80$ ).

Стан асиміляційного апарату, описаний за допомогою фотооптичного тестування вплинув на загальну оцінку посівів сої. Стан культури на варіантах систем удобрення упродовж весняно-літньої вегетації визначали по фазах вегетації [177] за п'ятибальною системою оцінювання [36; 54; 54].

У середньому за 2022-2024 роки експериментів варіанти систем удобрення за чотири фази із максимальних 20 балів набирали від 13 до 18,5 бала (табл. 4.3). Неудобрені посіви отримали 11,5 бала, причому у фазі BBCH 13-15 рослини оцінені 2,0 бала, але до формування бобів отримали 3,5 бала.

Таблиця 4.3. Підсумки візуальної оцінки загального стану посівів сої у середньому за 2022-2024 роки

Варіант досліджу	Фази розвитку				Сума балів (макс. 20 б.)	Середній бал за варіантом
	3 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	<b>2,9</b>
Фон – Р60К60 (*п.ор.)	2,5	3,5	3,5	3,5	13,0	<b>3,3</b>
<b>Фон + N30 – *Nsa (*п.с.)</b>	3,0	3,5	4,0	3,5	14,0	<b>3,5</b>
Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)	3,5	4,0	4,0	3,5	15,0	<b>3,8</b>
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	3,5	4,0	4,5	4,0	16,0	<b>4,0</b>
Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>	18,0	<b>4,5</b>
Фон + N30 – *Naa	3,0	4,0	4,0	3,5	14,5	<b>3,6</b>
Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)	3,5	4,0	4,5	4,0	16,0	<b>4,0</b>
Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	3,5	4,5	4,5	4,0	16,5	<b>4,1</b>
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + ХайКот Супер Соя	<b>4,0</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>	<b>4,5</b>	18,0	<b>4,5</b>
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + Райс Пі	3,5	4,0	4,5	4,5	16,5	<b>4,1</b>
Фон + N30 – Nsa (п.с.) + ХайКот Супер Соя + Райс Пі	<b>4,5</b>	<b>4,5</b>	<b>5,0</b>	<b>4,5</b>	18,5	<b>4,6</b>
Середній бал у фазі	<b>3,4</b>	<b>4,0</b>	<b>4,3</b>	<b>4,0</b>	-	-

Найвища бальна оцінка – від 4,0 до 5,0 балів, була зафіксована за системи удобрення фон  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію) + нітрапірін (перед сівбою) +  $N_{30}$  (підживлення у фазі бутонізації сульфатом амонію). Середній за вегетацію бал 4,5.

Проте на фоні  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію) використання інокулянтів ХайКот Супер Соя + Райс Пі, що фіксують азот і мобілізують фосфор, посіви сої оцінені на рівні 4,5-5,0 бала. Причому, від фази 3-5 трійчастих листочки (ВВСН 13-15 – 4,5 бала) до фази формування бобів (ВВСН 71-77 – 5,0 бала) рослини покращували свій габітус. Середній бал по цій системі удобрення становив 4,6 бала.

З-поміж чотирьох вибраних для оцінювання фаз вегетації найменший середній бал встановлено у фазі 3-5 трійчастих листочків (ВВСН 13-15) – 3,4 бала. Найпривабливіше рослини сої виглядали у фазі формування бобів (ВВСН 71-77) – 4,3 бала.

Отже, найвищий середній за вегетацію бал та найбільшу сумарну оцінку отримали посіви, де застосована система удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (азотне добриво у формі сульфату амонію) з використанням інокулянтів ХайКот Супер Соя + Райс Пі, що фіксують азот і мобілізують фосфор. Це означає, що рослини сої отримували добре мінеральне живлення для формування врожаю зерна.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Середньорічна температура повітря за 2010-2023 роки становила 9,0 проти 8,3°C у період 2010-2015 років. Середня максимальна температура сягнула 22,4°C, що вказує на тенденцію зростання теплових ресурсів Лісостепу Західного в районі Малеого Полісся. Із трьох років досліджень 2023 рік був найсприятливішим за тепловим ресурсом та зволоженням в період вегетації сої. Хоча травень 2023 та 2024 року були посушливими, проте у червні випав надлишок опадів в обидва роки, що посприяло формування врожаю сої. Липень

в усі роки досліджень був вологим, проте 2023 рік відрізнявся істотним перевищенням середньобагаторічної норми на 19 мм.

2. Тривалість вегетації сої була різною кожного року і вона пов'язана з погодними умовами, які впливали на дію добрив, нітрапірину та інокулянтів. Подвійна норма азоту, а також одинарна із використанням азотних та фосфорних інокулянтів продовжувала вегетацію сої у 2023 і 2024 роках. Інгібітор нітрифікації у всіх випадках застосування із сульфатом амонію спричиняв пришвидшення завершення вегетації сої на 6-7 діб, з амонійною селітрою продовжував вегетацію на 4-5 діб.

3. Контроль концентрації нітратів, які затримують бульбочкоутворення, за допомогою заміни амонійної селітри на сульфат амонію ( $N_{30}$ ) з одночасним використанням нітрапірину 1,7 л/га не досягає такого вагомego результату, як сумісне застосування інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі. Маса бульбочок на рослині у бутонізацію становила найбільші величини – 0,49 г, і за квітування 0,82 г.

4. На мінімальному фоні сульфату амонію ( $N_{30}$ ) і використання інокулянта з азотмобілізуєчими бактеріями сприяло росту рослин до 83,2 см, а поєднання двох інокулянтів азотфіксуючого та фосформобілізуєчого збільшило висоту рослин до найвищого в досліді показника 84,1 см, а також забезпечило високе закріплення бобів – в середньому 14,5 см від поверхні ґрунту.

5. Встановлена добре виражена позитивна реакція сої за показником озерненості на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  із застосуванням інокулянта Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens*. Фосфор для азотфіксуючої культури сої відіграє дуже важливу роль щодо генеративних функцій. Застосування на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  препаратів – ХайКот Супер Соя, а також поєднання його та інокулянта Райс Пі, забезпечило масу 1000 зерен в діапазоні 194,1-193,5-194,9 г, кількість зерен на одній рослині 33,9-33,7-34,4 од., маси зерен з рослини 6,7-6,3-6,9 г.

6. Експресдіагностика асиміляційного апарату польовим приладом N-Tester™ для оцінки стану живлення сої показала, що оптична активність листків була максимальною за системи удобрення, де фон  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (перед сівбою) з обробкою насіння інокулянтами з N-фіксувальними та P-мобілізаційними бактеріями. Внесення нітрапірину за початкової ( $N_{30}$ ) та підвищеної ( $N_{60}$ ) норми азоту у формі сульфату амонію на фоні  $P_{60}K_{60}$  під оранку істотно збільшувало показники оптичної активності, що свідчить про поліпшення азотного живлення сої. У фазі побуріння бобів оптична активність листків була найвищою, що свідчить про стабілізацію азотного живлення сої на критичному етапі остаточного формування зерна.

7. Візуальне оцінювання загального стану сівби сої показало, що найвищу середню за вегетацію оцінку на рівні 4,5-5.0 бала та найбільшу сумарну оцінку 4,6 бала отримали посіви, де застосована система удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (азотне добриво у формі сульфату амонію) з використанням інокулянтів ХайКот Супер Соя + Райс Пі, що фіксують азот і мобілізують фосфор. Це означає, що рослини сої отримували добре мінеральне живлення для формування врожаю зерна.

Результати досліджень за розділом 4 викладено у публікаціях [49; 47; 45: 48; 171].

## Розділ 5

### **ФОРМУВАННЯ ВРОЖАЮ ЗЕРНА СОЇ НА ДЕРНОВОМУ ГЛИБОКОМУ ГЛЕЙОВОМУ ҐРУНТІ МАЛОГО ПОЛІССЯ**

Дія погодних умов і технологічних прийомів є тим головним функціональним чинником, що дає основний результат роботи продукційної польової агроєкосистеми у вигляді вирощеного врожаю зерна. Важливо пояснити з чим пов'язане підвищення чи зниження збору зерна та корисних речовин при застосуванні тих, чи інших прийомів у рослинництві. Без внесення добрив соя здатна самозабезпечуватися азотом, потребує фосфору і калію, сприятливості реакції ґрунту. Дослідження закономірностей формування продуктивності сої залежно від її біотичних особливостей та оптимізації елементів технології вирощування вже провели у Лісостепу Західному В. В. Лихочвор, В. М. Щербачук, Р. М. Панасюк, О. В. Панасюк [54], М. І. Бахмат та О. М. Бахмат [7], О. М. Бахмат, О. С. Чинчик [9], В. Г. Димитров [26], у Правобережному П. С. Вишнівський, О. В. Фурман [10], у Лівобережному М. Я. Шевніков, І. І. Лотиш, О. П. Галич [92] та ін.

У п'ятому розділі ми з'ясуємо, які саме чинники системи удобрення мали істотний вплив на обсяг врожаю та збір сирого протеїну і сирого жиру. Ключовим завданням нашого експерименту є встановлення оптимальних форм і норм застосування азотних добрив, доцільності внесення нітрапірину та використання азофіксувальних та фосформобілізаційних інокулянтів.

#### **5.1. Вплив систем удобрення, стабілізатора азоту та інокулянтів на врожай зерна**

Такі досліджені нами технологічні прийоми, як норми внесення добрив, основне удобрення та підживлення, а також стабілізація нітратів інгібітором та оброблення насіння мікробними препаратами змінювали концентрації поживних речовин у ґрунті, визначали умови росту й розвитку сої, що і

визначило врожайність зерна. Без мінеральних добрив у Малому Поліссі на дерновому глибокому глейовому ґрунті можна збирати від 2,66 т/га (табл. 5.1) до 2,83 т/га (табл. 5.2). На неудобреному азотом фоні внесення  $P_{60}K_{60}$  під оранку ми отримували від 3,03 т/га 2022 до 3,05 т/га 2023 року та середній врожай 3,02 т/га 2024 року (табл. 5.3). Приріст врожаю був істотним у всі три роки досліджень (дод. Г – табл. Г.1, Г.2 і Г.3). Це свідчить, що важливість фосфорно-калійного удобрення для покращення продукційної функції сої.

Застосування традиційної системи удобрення культури –  $N_{30}P_{60}K_{60}$  із внесенням фосфорно-калійних добрив під оранку та азотних у формі сульфату амонію під культивуацію забезпечило середню за три роки врожайність 3,55 т/га (рис. 5.1). Це було на 0,74 т/га більше від контролю без добрив та на 0,52 т/га більше від фосфорно-калійного фону.

Внесення нітрапірину перед сівбою у 2022 році 29.04, у 2023 – 24.04 та у 2024 році 25.04, як інгібітора ензимів нітратоутворення, мало різну ефективність по роках дослідження. Перший рік досліджень відрізнявся прохолодною помірно вологою погодою, другий – сприятливими теплими весняними умовами, третій рік мав сухий травень. Тому, стабілізація азоту не мала виразного результату у 2022 та 2024 роки, які відрізнялися відсутністю приросту врожаю від стримування нітратоутворення, оскільки активність мікробіоти в таких умовах знижена.

Натомість найсприятливіший 2023 рік показав високу ефективність обмеження нітратоутворення нітрапірином за нейтралізації негативної дії нітратного азоту на ініціацію бульбочкоутворення на коренях сої. Приріст врожаю зерна за сприятливого впливу нітрапірину становив 0,33 т/га, порівняно зі звичайною системою удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ .

Внесення перед сівбою  $N_{30}P_{60}K_{60}$  та підживлення сої  $N_{30}$  у фазі формування бобів не дало очікуваного ефекту упродовж 2022 та 2023 років і врожайність її практично не зросла. Проте, 2024 року ми отримали достовірну надвишку врожаю зерна – 0,22 т/га ( $NIIP_{05} = 0,15$  т/га). Це пояснюємо

прохолодною і сухою до початку червня погодою, за якої бульбочкоутворення та азотфіксація дещо сповільнені. Тому підживлення сульфатом амонію в таких умовах мало позитивний ефект.

Таблиця 5.1

**Урожай сої залежно від систем удобрення у 2022 році та відхилення відносно контролю ( $НІР_{05} = 0,13$  т/га – дод. Г, табл. Г.4).**

№ №	Варіант дослідів	N, кг/га	Врожай, т/га	Відхилення, ± т/га
1.	Контроль – без удобрення	0	2,66	-0,81
2.	Фон – Р60К60 (п.ор.)	0	3,03	-0,44
<b>3.</b>	<b>Фон + N30 – Nsa (п.с.)</b>	<b>30</b>	<b>3,47</b>	<b>0</b>
4.	Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)	30	3,41	-0,06
5.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	3,53	0,06
6.	Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	3,77	0,30
7.	Фон + N30 – Naa	30	3,30	-0,17
8.	Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)	30	3,51	0,04
9.	Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	60	3,70	0,23
10.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуєчі бактерії	30	3,72	0,25
11.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+P-мобілізуєчі бактерії	30	3,62	0,15
12.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуєчі+P-мобілізуєчі бактерії	30	3,81	0,34
	$НІР_{05}$ абсолютна	-	0,13	-

Підживлення  $N_{30}$  у фазі бутонізації на тлі попереднього внесення нітрапірину мало ще більшу позитивну дію упродовж усіх трьох років.

Таблиця 5.2

**Урожай сої залежно від систем удобрення у 2023 році та відхилення  
відносно контролю ( $НІР_{05} = 0,16$  т/га – дод. Г, табл. Г.5).**

№ №	Варіант досліджу	N, кг/га	Врожа й, т/га	Відхи лення, ± т/га
1.	Контроль – без удобрення	0	2,93	-0,76
2.	Фон – Р60К60 (п.ор.)	0	3,05	-0,64
<b>3.</b>	<b>Фон + N30 – Nsa (п.с.)</b>	<b>30</b>	<b>3,69</b>	<b>0</b>
4.	Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)	30	4,02	0,33
5.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	3,78	0,09
6.	Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	4,01	0,32
7.	Фон + N30 – Naa	30	3,51	-0,18
8.	Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)	30	3,71	0,02
9.	Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	60	3,90	0,21
10.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуєчі бактерії	30	4,12	0,43
11.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+P-мобілізуєчі бактерії	30	3,95	0,26
12.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуєчі+P-мобілізуєчі бактерії	30	4,05	0,36
	$НІР_{05}$ абсолютна	-	0,16	-

Надвшка у цьому варіанті системи удобрення становила в середньому 0,35 т/га, а 2024 року була найбільшою – 0,43 т/га ( $НІР_{05} = 0,15$  т/га). Це свідчить, що за сприятливих умов погоди призупинення нітратоутворення на

кілька тижнів, а згодом підживлення сої не чинить негативного впливу на бульбочкоутворення та азотфіксацію сої для своїх фізіологічних потреб.

Таблиця 5.3

**Урожай сої залежно від систем удобрення у 2024 році та відхилення відносно контролю ( $НІР_{05} = 0,15$  т/га – дод. Г, табл. Г.6)**

№ №	Варіант досліджу	N, кг/га	Врожа й, т/га	Відхи лення, ± т/га
1.	Контроль – без удобрення	0	2,83	-0,65
2.	Фон – Р60К60 (п.ор.)	0	3,02	-0,46
<b>3.</b>	<b>Фон + N30 – Nsa (п.с.)</b>	<b>30</b>	<b>3,48</b>	<b>0</b>
4.	Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)	30	3,55	0,07
5.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	3,70	0,22
6.	Фон + N30 – Nsa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	60	3,91	0,43
7.	Фон + N30 – Naa	30	3,41	-0,07
8.	Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)	30	3,55	0,07
9.	Фон + N30 – Naa+нітрапірин (п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	60	3,77	0,29
10.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуєчі бактерії	30	3,87	0,39
11.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+P-мобілізуєчі бактерії	30	3,67	0,19
12.	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуєчі+P-мобілізуєчі бактерії	30	3,98	0,50
	$НІР_{05}$ абсолютна	-	0,15	-

Маса бульбочок за внесення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  перед сівбою та нітрапірину і підживлення  $N_{30}$  у фазі бутонізації становила 0,72 г, проти 0,49 г на варіанті без нітрапірину.

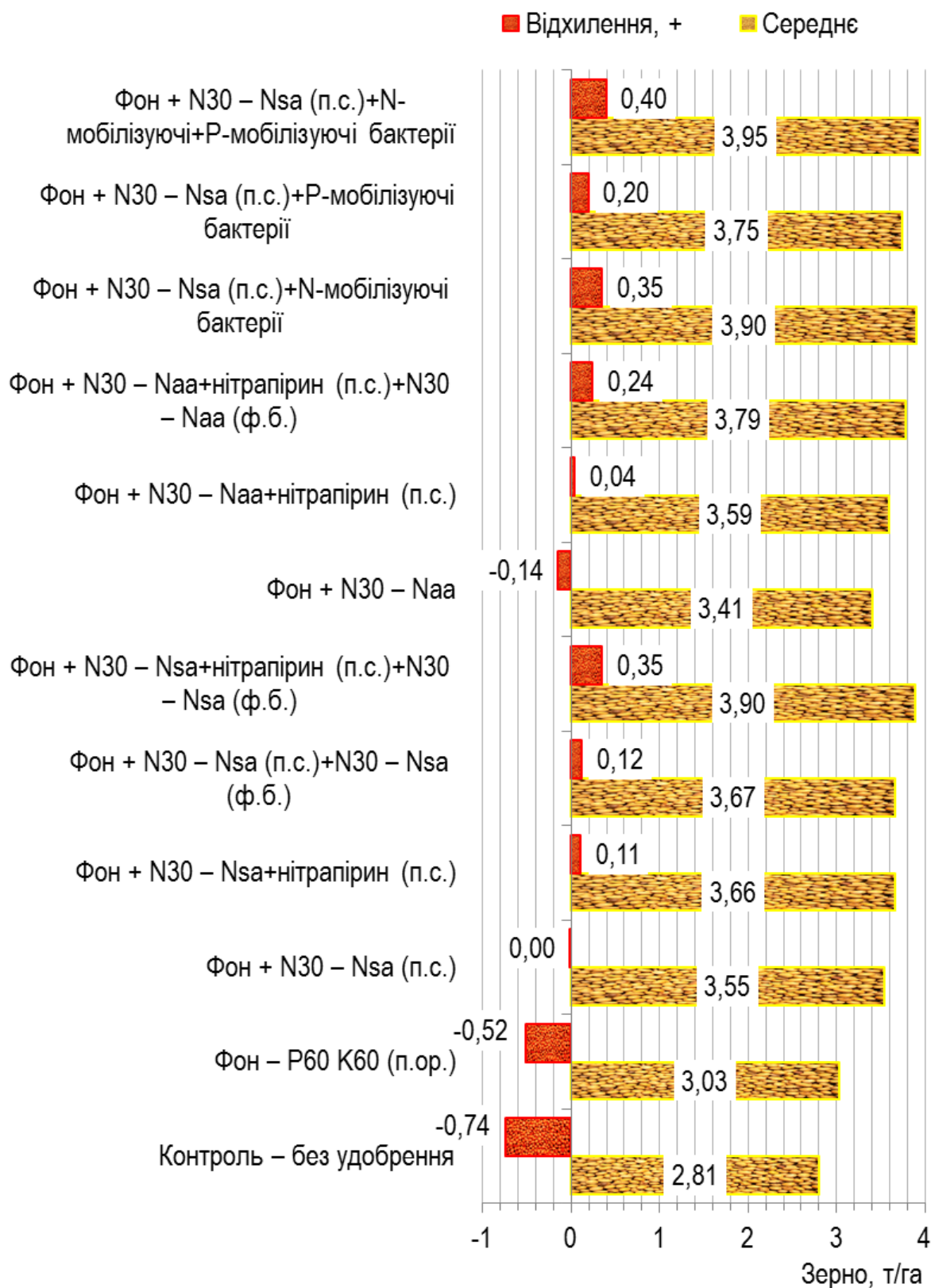


Рис. 5.1. Середня врожайність зерна сої та відхилення від контролю залежно від системи удобрення та застосування нітрапірину упродовж 2022-2024 рр.

( $p < 0,05$ ).

На відміну від дії сульфату амонію амонійна селітра в аналогічних нормах діючої речовини азоту як без нітрапірину, так і за його застосування, не забезпечила перевищення врожайності на фонах сульфату амонію. Лише за внесення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  у поєднанні з нітрапірином та підживленням амонійною селітрою  $N_{30}$  у фазі бутонізації урожай зерна сої підвищився до рівня систем удобрення з сульфатом амонію (вар. 4, 5 і 6 ) і сягнув 3,79 т/га в середньому за три роки (табл. 5.4). Цей рівень був істотно вищим, ніж на умовному контролі із сульфатом амонію –  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (0,24 т/га).

Оброблення насіння азотфіксувальними та фосформобілізаційними інокулянтами сприяє одночасно активізації мікробіологічних процесів [63], які покращують живлення сої фіксованим з атмосфери азотом [84; 16] та звільненого з недоступних сполук ґрунтового фосфору [83; 98; 162; 263].

Використання у нашому досліді [49] препарата ХайКот Супер Соя, який містить азотмобілізаційні бактерії *B. japonicum*, за внесення сульфату амонію  $N_{30}$  на фоні  $P_{60}K_{60}$  2023 року (табл. 5.2) забезпечило найвищий урожай 4,12 т/га. Це на 0,43 т/га більше, ніж без інокулянта ( $НІР_{05} = 0,15$  т/га). В орному шарі ґрунту цього варіанту (див. розділ 3 рис. 3.2) містилося 5,3 мг/кг нітратів, 127,8 мг/кг легкогідролізного азоту, 134,9 мг/кг фосфатів та 115,9 мг/кг калію (див. розділ 3 рис. 3.1).

У середньому за 2022-2024 роки надвишка врожаю становила 0,35 т/га і була рівною надвишці від застосування нітрапірину та додаткового підживлення у фазі бутонізації  $N_{30}$  на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$ .

Використання в експерименті препарата Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens* на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  мало дещо менший вплив і дало надвишку 0,20 т/га зерна сої в середньому за три роки, порівняно з умовним контролем  $N_{30}P_{60}K_{60}$  без інокуляції. Покращення

доступності фосфору для живлення на 4,1 мг/кг ґрунту у фазі бутонізації (див. розділ 3 рис. 3.2) мало істотний позитивний ефект ( $\text{NIP}_{05} = 0,13-0,15 \text{ т/га}$ ).

**Таблиця 5.4. Врожайність зерна сої залежно від системи удобрення та нітрапірину  
(середнє за 2022-2024 рр. ( $p < 0,05$ ))**

№	Варіант досліджу	Роки дослідження			Середнє за 2022-2024 рр.	Відхилення від вар. 3, $\pm$
		2022	2023	2024		
1.	Контроль – без удобрення	2,66	2,93	2,83	2,81	-0,74
2.	Фон – P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> (під оранку)	3,03	3,05	3,02	3,03	-0,52
3.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (перед сівбою)	3,47	3,69	3,48	3,55	0,00
4.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію + N-Lock™ (перед сівбою)	3,41	4,02	3,55	3,66	0,11
5.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (перед сівбою) + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (в фазі бутонізації)	3,53	3,78	3,7	3,67	0,12
6.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію + N-Lock™ (перед сівбою) + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (в фазі бутонізації)	3,77	4,01	3,91	3,90	0,35
7.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра	3,30	3,51	3,41	3,41	-0,14
8.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра + N-Lock™ (перед сівбою)	3,51	3,71	3,55	3,59	0,04
9.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра + N-Lock™ (перед сівбою) + N <sub>30</sub> – амонійна селітра (в фазі бутонізації)	3,70	3,90	3,77	3,79	0,24
10.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + Хай Кот Супер Соя	3,72	4,12	3,87	3,90	0,35
11.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + Райс Пі	3,62	3,95	3,67	3,75	0,20
12.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + Хай Кот Супер Соя + Райс Пі	3,81	4,05	3,98	3,95	0,40

НІР <sub>05</sub> абсолютна	0,13	0,16	0,15	-	-
-----------------------------	------	------	------	---	---

Комплексна інокуляція насіння препаратами ХайКот Супер Соя, який містить азотомобілізаційні бактерії *B. japonicum* та Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens* у середньому за 2022-2024 роки мала потужний синергічний вплив і забезпечила надвишку врожаю 0,40 т/га. Це більше, ніж на інших ефективних варіантах. Сприятливого для ґрунтової мікробіоти 2024 року надвишка врожаю зерна сягнула максимуму і становила 0,50 т/га.

Отже, на фосфорно-калійному фоні  $P_{60}K_{60}$  сульфат амонію у малій дозі  $N_{30}$ , нітрапирин перед сівбою в нормі 1,7 л/га та інокуляція насіння азофіксувальними та форформобілізаційними бактеріями є дієвими важелями підвищення врожаю зерна сої у Малому Поліссі. Збільшена в системі удобрення культури норма азоту до  $N_{60}$  ( $N_{30}$  в основне внесення та  $N_{30}$  у підживлення у фазі бутонізації) та використання амонійної селітри не забезпечили кращих показників врожайності упродовж 2022-2024 років експериментів. Застосування нітрапірину позитивно вплинуло на врожайність культури, обмежило накопичення нітратів по всьому профілю ґрунту.

## **5.2. Зв'язки дози азоту, вмісту доступних форм азоту та кислотності ґрунту у впливі на продуктивність сої**

Урожай сої формувався за різних форм азотних добрив, на різних фонах вмісту азоту, фосфору і калію в ґрунті, які створювалися за різних систем мінерального удобрення, використання стабілізатора азоту та інокулянтів – стимуляторів мікробіологічної активності ґрунту. На рисунку 5.3 бачимо, що рівень врожаю 2023 року тісніше корелював з азотними фонами живлення – ресурсами нітратів та легкогідролізного азоту в орному пласті ґрунту у фазі бутонізації –  $r = 0,76-0,79$  (див. дод. Б, табл. Б.1). До збирання був втрачений зв'язок вмісту нітратів з рівнем врожаю, проте посилилася позитивна кореляція його з ресурсами легкогідролізного азоту.

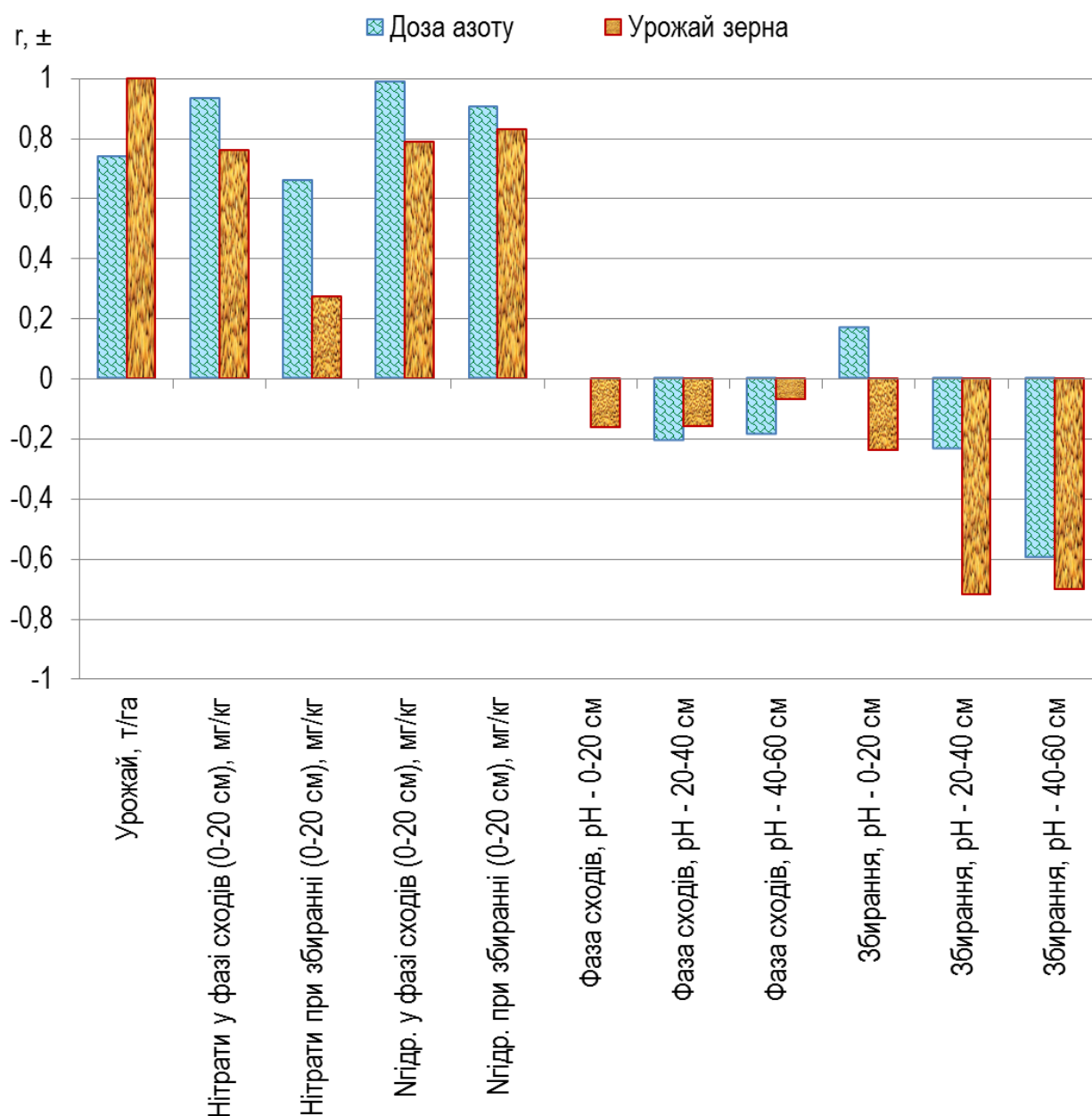


Рис. 5.3. Коефіцієнти кореляції між агрохімічними показниками ґрунті під впливом норм азоту та врожаєм сої,  $r \pm$

Врожай зерна сої не був у тісній залежності від рівня кислотності у фазі бутонізації, але тенденція простежувалася. Рівень фонового  $pH_{\text{сол.}}$  дернового глейового ґрунту такий, що не перевищує допустимий для нормального росту і розвитку сої, тому особливого впливу на врожай зерна не мав.

До збирання врожаю лише у глибині 20-60 см профілю спостерігали обернену кореляцію врожайності з кислотністю ґрунту.

Синергія норм внесення азоту та концентрації нітратів у орному пласті ґрунту виразно позначилася на зростанні врожаю сої (рис. 5.4).

За наших систем удобрення культури, де нітрати були стабілізовані нітрапірином навіть на високих фонах азотного удобрення, площина регресії демонструє ефективність запропонованих прийомів і нейтралізацію негативних впливів нітратів на азотне живлення сої.

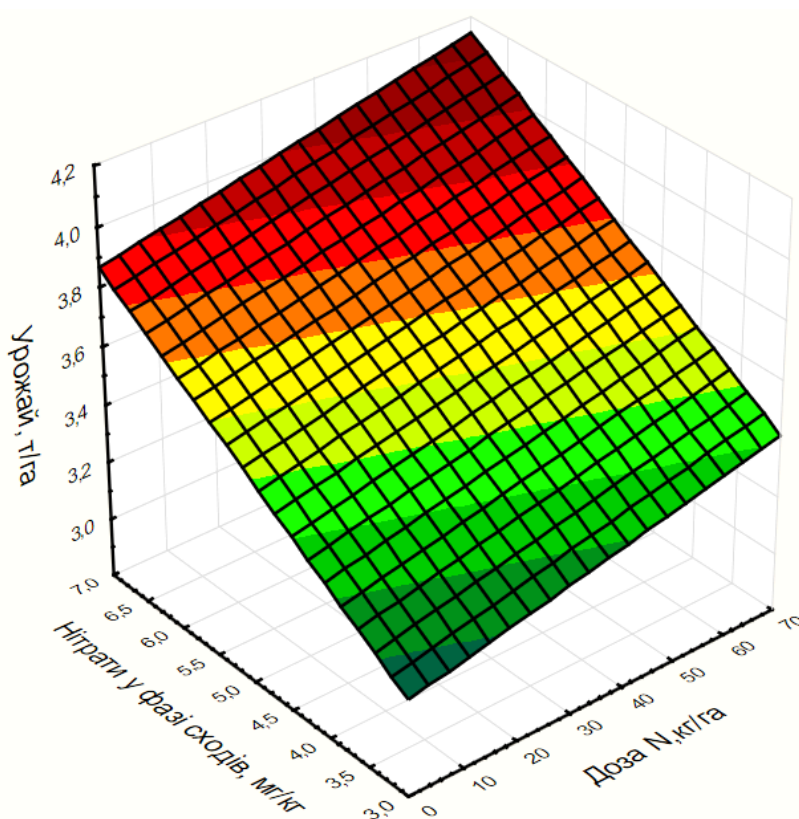


Рис. 5.4. Просторова 3Д-модель регресії показника врожайності зерна сої у зв'язку зі змінами вмісту нітратів в орному (0-20 см) пласті дернового глейового ґрунту та нормою азотного удобрення.

Рівняння регресії (5.1):

$$\text{Урожай (т/га)} = 2,5836 + 0,004 \times N_{\text{норма (кг/га)}} + 0,1833 \times N_{\text{нітр. (мг/кг)}} \quad (5.1)$$

переконливо підтверджує наше припущення.

Запропоновані нами норми азоту та стабілізація нітратоутворення інгібітором нітрапірином мала позитивних вплив на врожайність сої упродовж усієї її вегетації. Тому розрахункова площина регресії (рис. 5.5), побудована на наших дослідних даних, показує, що збільшення норми азоту від нуля до 60 кг/га діючої речовини і зменшення вмісту нітратів у зоні кореневої системи до збирання зумовлюють найвищий рівень врожаю. Це підтверджено лінійним регресійним рівнянням (5.2):

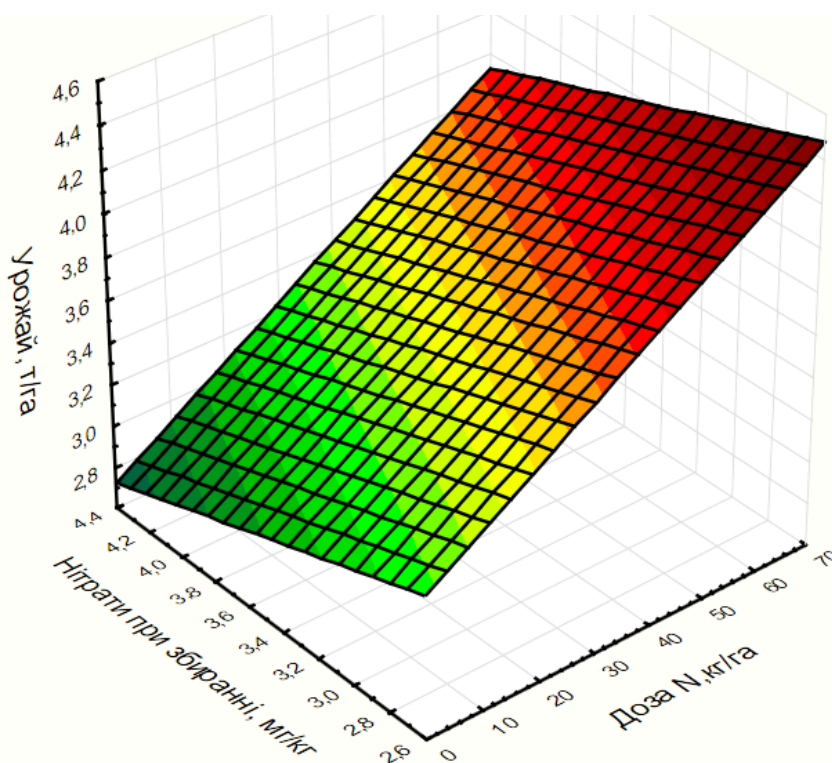


Рис. 5.5. Просторова 3Д-модель регресії показника врожаю зерна у зв'язку зі змінами вмісту нітратів в орному (0-20 см) пласті дернового глейового ґрунту при збиранні сої та нормою азотного удобрення.

$$\text{Урожай (т/га)} = 4,0648 + 0,0172 \times N_{\text{норма (кг/га)}} + 0,3043 \times N_{\text{нітр. (мг/кг)}}, \quad (5.2)$$

де коефіцієнти навіть більші, ніж у рівнянні регресії нітратів і норми азоту у фазі бутонізації.

Ще важливішою є синергія дії динаміки нітратів на врожай зерна. Так досліджені нами норми азоту, дія інгібітора нітрапірину і концентрації нітратів від бутонізації до збирання мали позитивних вплив на врожай сої, подібний на попередню модель. Площина регресії показує (рис. 5.6), що високий вміст нітратного азоту в орному шарі у фазі бутонізації та мінімальний в час збирання забезпечує найвищий врожай сої.

Формула регресії (5.3):

$$\text{Урожай (т/га)} = 3,3587 + 0,4642 \times N_{\text{нітр. (мг/кг) (сходи)}} + 0,6428 \times N_{\text{нітр. (мг/кг) (збирання)}} \quad (5.3)$$

із доволі високими коефіцієнтами підтверджує описану закономірність.

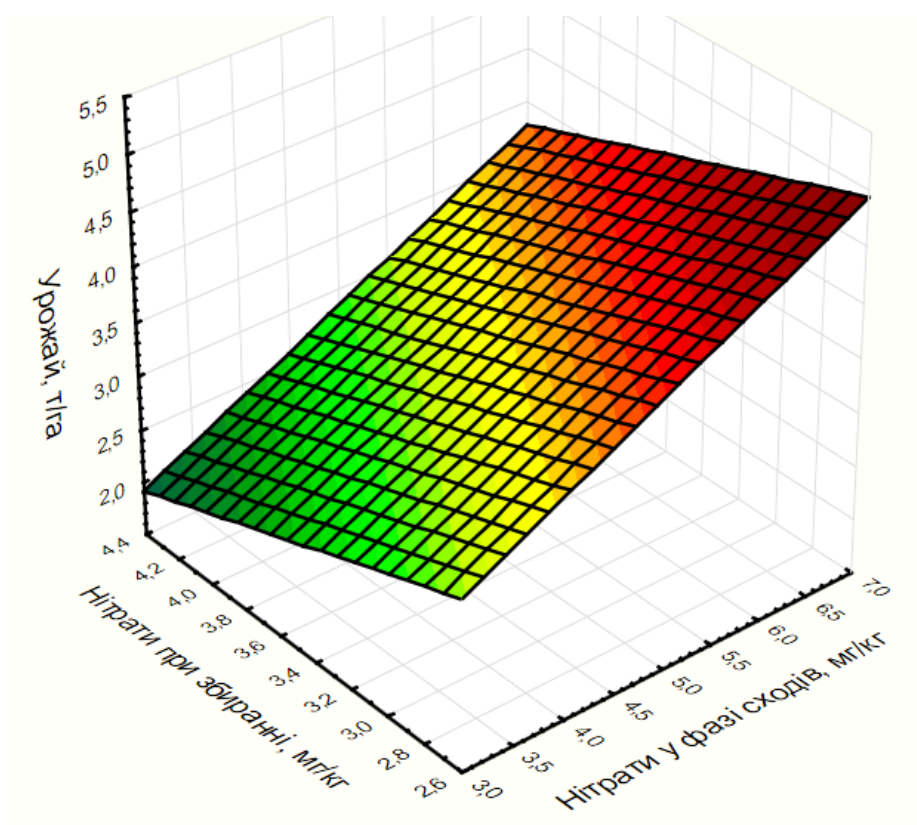


Рис. 5.6. Просторова 3Д-модель регресії показника врожаю зерна у зв'язку зі змінами вмісту нітратів в орному (0-20 см) пласті дернового глейового ґрунту у фазі бутонізації та при збиранні сої

Нітрапірин не лише стабілізує нітрати, які пригнічують бульбочкоутворення сої, а й частково алкалізують ґрунтове середовище, яке ці нітрати у підвищеній кількості підкислюють. Запропоновані нами норми азоту сприяють накопиченню нітратів до фази бутонізації і початку бульбочкоутворення на коренях. Проте, нітрапірин обмежує активність мікроорганізмів, стабілізує нітрати на оптимальному рівні, чим обмежує підкислення ґрунтового середовища. Оцінюючи синергію цих альтернативних факторів при збиранні сої за їх дією на врожай на площині регресії (рис. 5.7) бачимо, що у представленому діапазоні немає протиріччя у позитивному впливі підлучення ґрунту та прийнятного рівня концентрації нітратів у ньому.

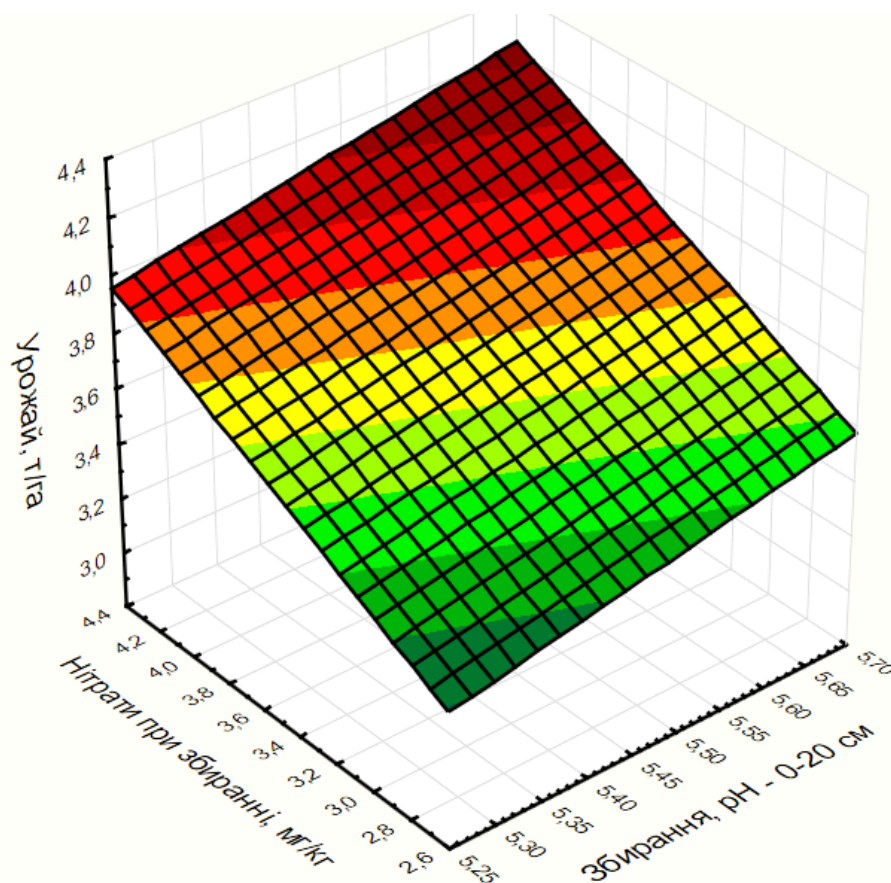


Рис. 5.7. Просторова 3Д-модель регресії показника врожаю зерна у зв'язку зі змінами реакції дернового глейового ґрунту та вмісту нітратів в орному (0-20 см) пласті при збиранні сої

Формула регресії (5.4):

$$\text{Урожай (т/га)} = 0,9738 + 0,6285 \times \text{pH}_{\text{сол. (збирання)}} + 0,3707 \times \text{N}_{\text{нітр. (мг/кг)(збирання)}} \quad (5.4)$$

з високими коефіцієнтами показує, що як алкалізація ґрунту, так і збагачення його нітратами, зафіксованими при збиранні, паралельно сприяють високій врожайності культури.

Отже, статистичне і графічне моделювання взаємодії різних факторів врожайності сої підтвердило нашу гіпотезу про важливість для культури азотного удобрення з одночасним пригніченням нітратоутворення нітрапірином, яке могло гальмувати утворення азотфіксувального бульбочкового апарату у разі надмірної концентрації нітратів у зоні росту коренів. Про це є дані дослідження японських авторів [259]. Істотним виявився побічний ефект інгібування мікроорганізмів, які утворюють нітрати, а саме зменшення кислотності ґрунту [47; 48]. Як відомо, надмірна кислотність теж гальмує бульбочкоутворення у сої [209; 218; 181].

Позитивний вплив оптимальних систем удобрення сої супроводжували сприятливі зміни у фотооптичних властивостях хлорофілу, темпах бульбочкоутворення, що позначилося на структурі і обсягу врожаю. Так позитивна кореляція врожаю зерна з активністю хлорофілу підтверджена тісним додатнім коефіцієнтом  $r = 0,89$  (табл. 5.5).

Показник активності хлорофілу у фазі квітування тісно позитивно корелює також із кількістю зерен та їх білковістю (відповідно  $r = 0,90$  та  $0,91$ ). Маса утворених бульбочок у фазі квітування тісно позитивно впливає на врожай зерна ( $r = 0,89$ ), оскільки також позитивно попередньо вплинула утворення зерна на одній рослині ( $r = 0,78$ ) і на масу 1000 зерен ( $r = 0,89$ ). Усі чинники

формування та структури врожаю дуже позитивно впливали на вміст сирого протеїну в зерні.

Отже, встановлено що практично усі чинники формування врожаю сої мали вагомий вплив на продукційний процес у запропонованих варіантах систем удобрення.

Таблиця 5.5

**Кореляція урожаю зерна сої з фотооптичною активністю хлорофілу та показниками продукційного процесу (за даними 2023 року),  $r \pm$**

	Врожай 2023 р.	Маса бульбочок при квітуванні	Хлорофілу квітування	К-сть зерен на рослині	Маса 1000 зерен
Маса бульбочок при квітуванні	0,83	X			
Хлорофіл у квітування	0,89	0,83	X		
К-сть зерен на рослині	0,94	0,78	0,90	X	
Маса 1000 зерен	0,70	0,89	0,59	0,62	X
Вміст протеїнів	0,96	0,84	0,91	0,97	0,69

### Висновки до розділу 5

1. За внесення  $N_{30}$  (сульфат амонію),  $P_{60}K_{60}$  у поєднанні з нітрапірином та підживленням  $N_{30}$  у фазі бутонізації урожай зерна сої досягнув рівня 3,90 т/га в середньому за три роки. Проте, за внесення сульфату амонію  $N_{30}$  на фосфорно-калійному фоні  $P_{60}K_{60}$  застосування азотного інокулянта ХайКот

Супер Соя забезпечило такий же середній врожай без застосування інгібітора нітрифікації та додаткового підживлення  $N_{30}$  у фазі бутонізації.

2. Вищий рівень врожаю 3,95 т/га, хоч і статистично не верифікований, забезпечило поєднання азотфіксувального та фосформобілізаційного інокулянтів ХайКот Супер Соя і Райс Пі на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  із використанням сульфату амонію перед сівбою.

3. Стабілізація азоту нітрапірином не мала виразного результату у 2022 та 2024 роках, оскільки активність мікробіоти в прохолодних і посушливих умовах знижена. Натомість найсприятливіший 2023 рік показав високу ефективність препарату у нейтралізації негативної дії нітратів на бульбочкоутворення в коренях сої. Приріст врожаю зерна за сприятливого впливу нітрапірину становив 0,33 т/га, порівняно зі звичайною системою удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ .

4. Підживлення сої  $N_{30}$  у фазі бутонізації на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію) та внесення нітрапірину перед сівбою мало більшу позитивну дію упродовж усіх трьох років. Надвишка у цьому варіанті системи удобрення становила в середньому 0,35 т/га, а 2024 року була найбільшою – 0,43 т/га ( $НІР_{05} = 0,15$  т/га).

5. На відміну від дії сульфатного добрива амонійна селітра в аналогічних нормах діючої речовини азоту як без нітрапірину, так і за його застосування, не забезпечила перевищення врожайності зерна на фонах сульфату амонію.

6. На прикладі розрахунків 2023 року рівень врожаю тісніше корелював з азотними фонами живлення – ресурсами нітратів та лекогідролізного азоту в орному пласті ґрунту у фазі бутонізації –  $r = 0,76-0,79$ . Врожай зерна сої не був у тісній залежності від показника кислотності у фазі бутонізації, але тенденція була. Рівень фонового  $pH_{\text{сол.}}$  5,62-5,63 дернового глейового ґрунту такий, що не перевищує допустимий для нормального росту і розвитку сої, особливого впливу на врожай зерна не мав.

7. Статистично доведена і графічно відображена синергія норм внесення азоту та нагромадження ресурсів його доступних форм у впливі на врожай

зерна сої. Наші дослідні дані, показують, що збільшення норми азоту від нуля до 60 кг/га д. р. і зменшення вмісту нітратів у зоні кореневої системи до збирання зумовлюють найвищий рівень врожаю зерна. Норми азоту, дія інгібітора нітратоутворення і концентрації нітратів у ґрунті від бутонізації до збирання мали позитивних вплив на врожай сої. Підвищений вміст нітратного азоту в орному шарі у фазі бутонізації та мінімізований в час збирання забезпечує найвищий врожай сої.

Результати досліджень за розділом 5 викладено у публікаціях [45; 46; 47; 48; 49].

## Розділ 6

### **БІОХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЗЕРНА СОЇ ЗАЛЕЖНО ВІД МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ, ВНЕСЕННЯ НІТРАПІРИНУ ТА ВИКОРИСТАННЯ ІНОКУЛЯНТІВ**

Суха маса зерна сої включає різні речовини: білки, вуглеводи, ліпіди, вітаміни, ензими, амінокислоти і мінеральні (зольні) речовини тощо. Велика увага сьогодні приділяється технологіям, що забезпечують найповнішу реалізацію потенціалу інтенсивних сортів сої щодо якісних показників вирощеного зерна – вмісту білкових речовини та жирів. Основні групи речовин, з яких складається суха речовина зерна сої при збиранні врожаю, коливаються в різних природних зонах України в таких межах: «сирий» протеїн (сукупна частка різних видів білків, амінокислот, компонентів білків і мінеральних сполук азоту) – 30-40%; «сирий» жир (олія – сукупна частка ефіроекстрактивних жирів і жироподібних сполук) – 15-25%; «сира» клітковина (целюлоза, геміцелюлоза, оболонка) – 3-9%; волога (частка води) – 8-12%; всі інші речовини (цукри, прості й складні вуглеводи, крохмаль, безазотисті мінеральні солі – без азотисті екстрактивні речовини – БЕР) – до 35%.

Наше завдання у шостому розділі – з'ясувати вплив систем мінерального удобрення сої на якість зерна, а також значення нітрапірину та інокулянтів для ефективного азотного живлення сої. Нами проведені лабораторні аналітичні дослідження на вміст у зерні сирих протеїну, жирів, клітковини і вологи та розрахунок частки решти компонентів у зерні. Підкреслюємо, що показник вмісту сирого протеїну вказує на всю сукупність різних видів білків, амінокислот, усіх азотумісних сполук і мінерального азоту й амідів.

Є відомості, що вплив азотних добрив на фізіологію сої, компоненти врожайності, урожайність зерна та вміст білків в зерні можуть сильно відрізнятися і залежать від генетики, умов вирощування та технології культури [5; 9; 70].

### 6.1. Вміст сирого протеїну у зерні сої

Зерно сої є важливим джерелом білків для людей і тварин, тому попит на багату білком соєву продукцію неухильно зростає, повідомляє Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (FAOSTAT) [140; 142]. Упродовж десятиліть селекції, орієнтованої на врожайність зерна, середня концентрація білків в зерні демонструє тенденцію до зниження [221; 5; 8; 91]. Щоб підвищити цінність соєвого зерна для кінцевих споживачів, необхідна висока концентрація білків 46-47%. Альтернативою білкам у зерні є клітковина та інші компоненти.

Жири і білки переважно позитивно взаємокорелюють. Виробництво рослинної олії із сої досягло найвищого рівня серед рослинних олій (30%) [141].

В. В. Любич та ін. [57] резюмують, що біохімічні складники зерна (вміст протеїну та вміст жиру) сої, урожайність та вихід жиру й протеїну вагомо залежить від погодних умов і сорту. А. Г. Козючко та В. М. Гавій [43] довели, передпосівна обробка насіння сої метаболічно активними речовинами сприяє активнішому, порівняно із необробленим варіантом, накопиченню білків та «сирої» клітковини у зерні сої. Таким чином, виробникам сої потрібні технологічні стратегії для підтримки або підвищення концентрації білків у зерні сої [244].

Наші дослідження системи удобрення сої без мінеральних добрив або без фосфорно-калійного фону показали, що у цих випадках ми можемо очікувати мінімальний вміст сирого протеїну у зерні на рівні 33-34% (рис. 6.1; дод. Д, табл. Д.1). Внесення мінімальної норми азоту у формі сульфату амонію на фосфорно-калійному фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  сприяє зростанню вмісту сирого протеїну до 35,8-36,5%. Стабілізація нітратів у ґрунті нітрапірином забезпечує покращення азотного живлення сої і спричинює підвищення вмісту сирого протеїну на 0,7%. Це підвищення прирівнюється до додаткового внесення у підживлення 30 кг/га д.р. азоту у фазі бутонізації. За умови застосування

нітрапірину на цій системі удобрення ми отримали ще 0,7% приросту концентрації білкових речовин у зерні.

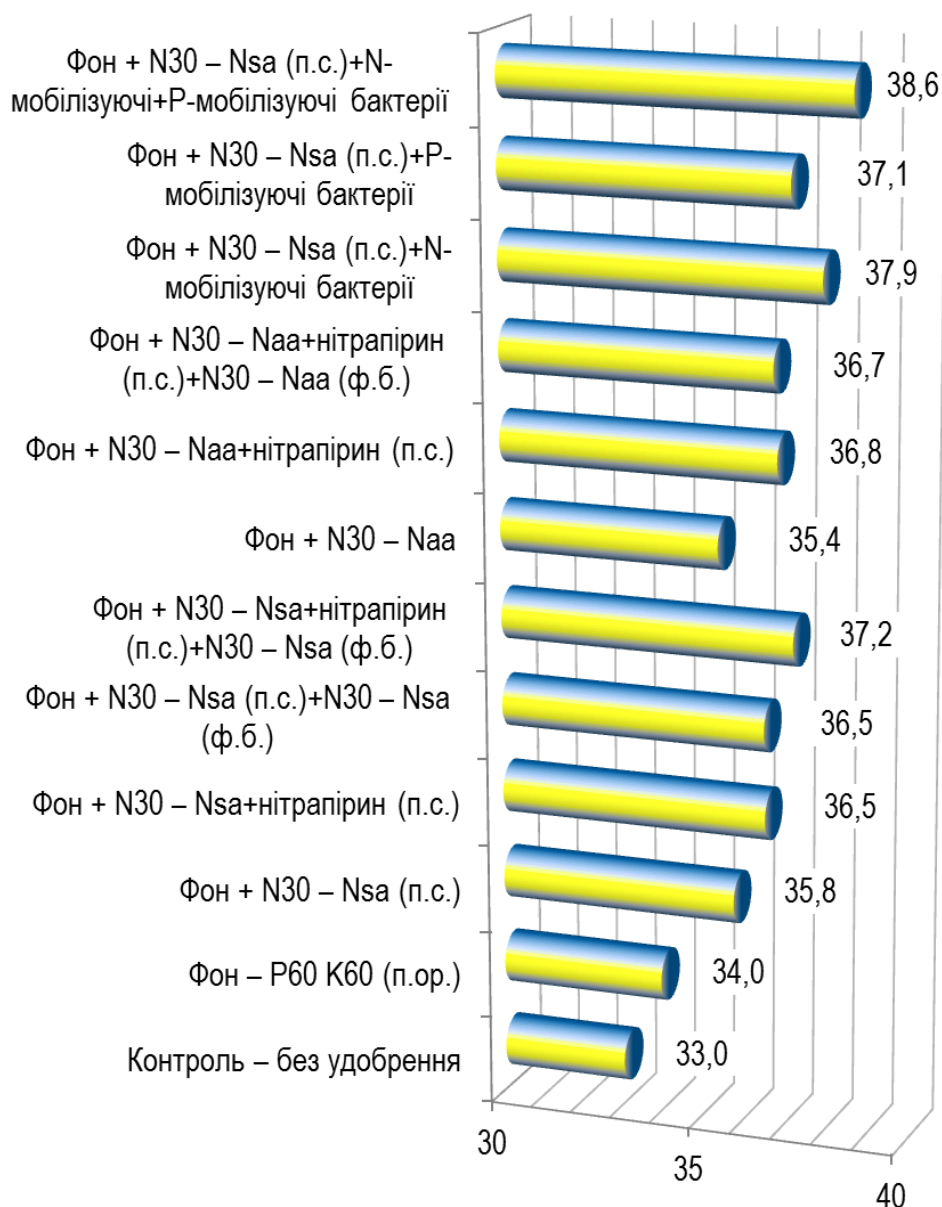


Рис. 6.1. Вміст сирого протеїну у зерні сої залежно від норм азотного удобрення, дії нітрапірину та інокулянтів, % (середнє за 2022-2024 рр.)

( $НІР_{05}$  абс. = 0,87%;  $НІР_{05}$  відн. = 2,40%;

кореляція між роками  $r = 0,95$  – дод. Д, табл. Д.2).

Більші рівні вмісту сирого протеїну у зерні сої ми встановили лише у двох системах удобрення: за внесення мінімальної норми азоту у формі сульфату амонію на фосфорно-калійному фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  у поєднанні із застосуванням інокулянтів – азотмобілізуєчих бактерії *B. japonicum* (фірми ХайКот Супер Соя) та фосформобілізуєчих бактерії *B. amyloliquefaciens* Райс Пі – 37,9-38,6%. Найвищого показника білковості зерна досягнуто за поєднання азотмобілізуєчих та фосформобілізуєчих бактерій – 38,6%. Це на 2,8% більше за системи удобрення азотом у формі сульфату амонію на фосфорно-калійному фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  та з її використанням разом з азотмобілізуєчих бактерії *B. japonicum* (фірми ХайКот Супер Соя) – на 0,7%.

Зауважимо, що нітрапірін мав більший позитивний ефект на подвійному фоні сульфату амонію ( $N_{30+30}$ ), ніж на такому ж фоні амонійної селітри. Як форма азотного добрива, амонійна селітра погіршувала накопичення сирого протеїну в зерні, порівняно з сульфатом амонію. Додамо, що A. Sharma & S. Sharma [227], M. Burkitbayev, N. Bachilova & M. Kurmanbayeva [116] довели позитивний вплив збалансованого живлення азотом та сіркою на параметри врожайності та білковість зерна сої, K. N. Devi & L. N. K Singh [128] – сіркою та бором.

Інтенсивність впливу живлення азотом на концентрацію білків відрізнявся в різних погодних умовах. Збільшуючи концентрації білків спостерігали за сприятливої погоди та зниження – за прохолодних дощових умов. Цей ефект спостерігали однаковим у різних сортів. Інтенсивність фотосинтезу, активність фіксації азоту та внесення мінерального азоту часто мало пов'язані з реакцією концентрації білків в зерні. Ці залежності добре проілюстровані в узагальненнях американських дослідників, зокрема, у кліматичних та едафічних умовах на Південному Сході США, які відрізняються від Середнього Заходу США [100]. Соя, вирощена на півдні США, як правило, має вищу концентрацію протеїнів в зерні, ніж соя, вирощена на Середньому Заході [219].

У Лісостепу Західному застосування азотних добрив у нормі  $N_{30}P_{30}K_{30}$  та  $N_{60}P_{60}K_{60}$  (N – амонійна селітра) сприяло підвищенню вмісту білка до 34,6 і 36,5%. Автори [54] пояснюють це тим, що азот є структурним компонентом амінокислот, білків, нуклеїнових кислот та їх складових. Внесення азотних добрив у нормі  $N_{30}P_{30}K_{30}$  та  $N_{60}P_{60}K_{60}$  (N – карбамід) сприяло підвищенню вмісту білка в зерні сої до 35,7 і 36,8%.

## 6.2. Вміст сирого жиру, клітковини та інших речовин

Іншим важливим складником сухої речовини зерна сої є жир і жироподібні сполуки. Найменше сирого жиру зерно накопичило за внесення мінімальної норми азоту у формі амонійної селітри на фосфорно-калійному фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  із використанням нітрапірину, який сприяв зменшенню вмісту сирого жиру до 20,0% (рис. 6.2; дод. Д, табл. Д.1).

Внесення мінімальної норми азоту у формі сульфату амонію на фосфорно-калійному фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  з використанням азотмобілізуючих бактерії *B. japonicum* (фірми ХайКот Супер Соя) забезпечило такий же низький рівень олійності зерна – 20,0%.

Високий рівень накопичення вмісту жирів забезпечило застосування фосформобілізаційного інокулянта з бактеріями *B. amyloliquefaciens*. Можна припустити, що покращення фосфорного живлення сої сприяє утворення високоенергетичних жирних сполук у зерні.

З результатів аналізу бачимо, що оптимізація азотного удобрення сої зменшує олійність зерна. Нітрапірин, покращуючи азотне живлення сої, виразно зменшує нагромадження сирого жиру в зерні.

Зауважимо, що якщо між варіантами системи удобрення сої вміст сирого протеїну був істотно відмінним ( $HP_{05} \text{ абс.} = 0,87\%$ ), то за вмістом сирого жиру достовірної різниці не виявлено ( $F_{\text{факт.}} 1,71 < F_{05} 3,01$ ).

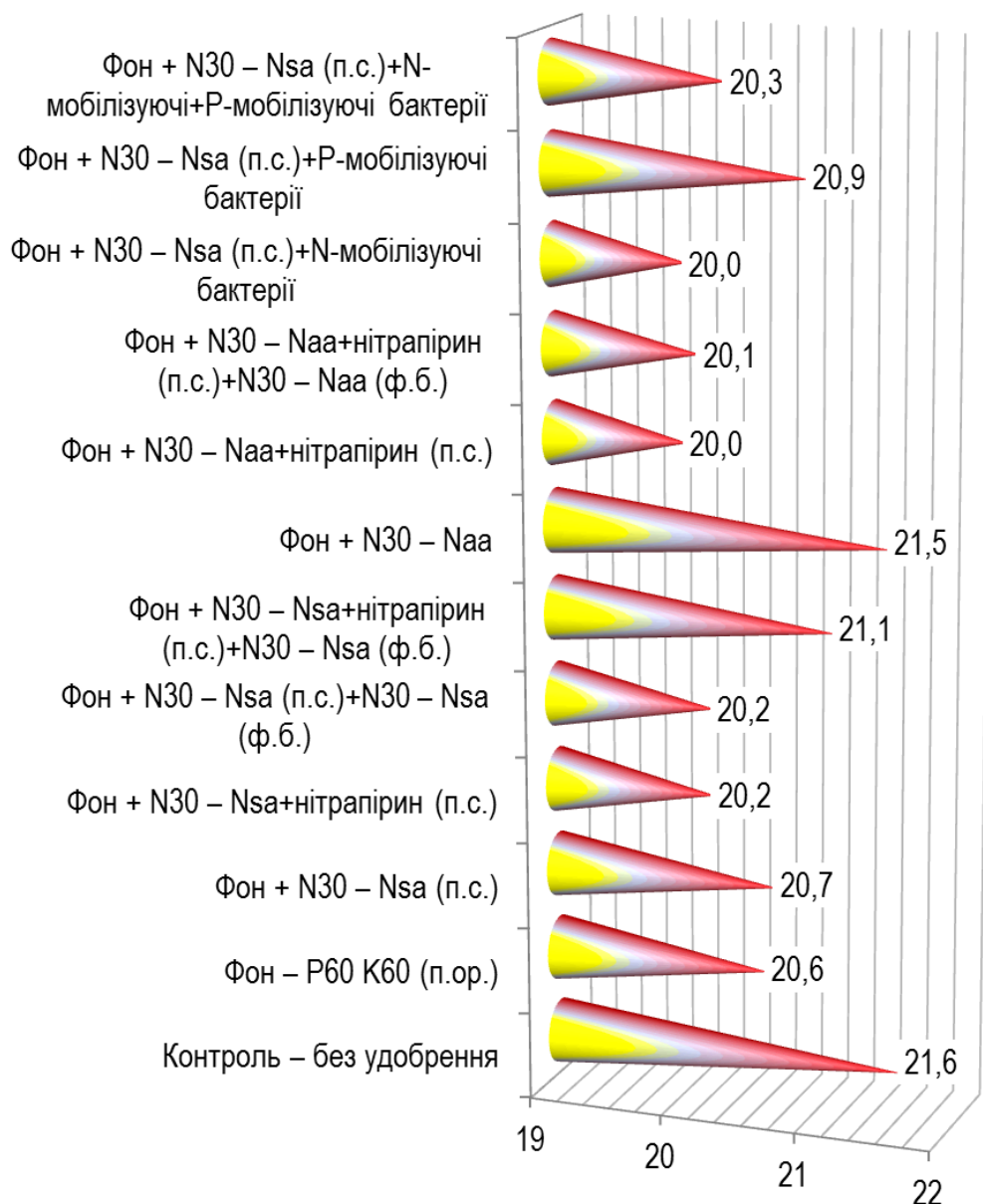


Рис. 6.2. Вміст сирого жиру у зерні сої залежно від норм азотного удобрення, дії нітрапірину та інокулянтів, % (середнє за 2022-2024 рр.) ( $F_{\text{факт.}} 1,71 < F_{05} 3,01$ ; кореляція між роками  $r = 0,95$  – дод. Д, табл. Д.3).

Як бачимо на рисунку 6.3, спектри складу сухої речовини зерна дуже відрізняються за різних систем удобрення та показують, що у зерні неудобреної сої міститься найбільше різноманітних речовин, які не перетворилися ні в білки, ні в жири, але утворилося більше сирогої клітковини. Очевидно це пов'язано з недостатком поживних елементів за відсутності добрив.

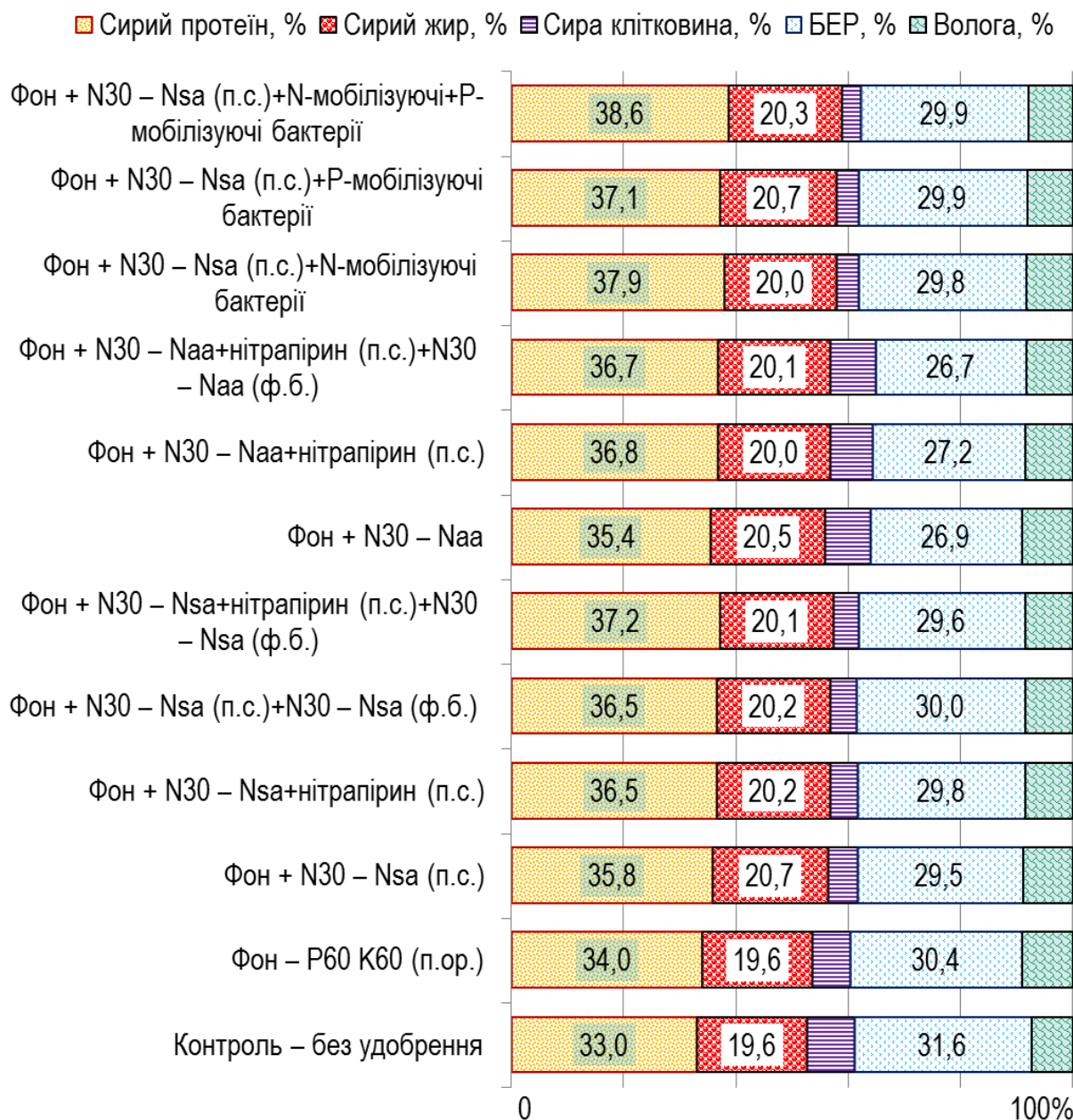


Рис. 6.3. Співвідношення вологи і сухих складників у зерні сої залежно від норм азотного удобрення, виливу нітрапірину та інокулянтів (середнє за 2022-2024 роки, % у сухій речовині).

Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) [16] достовірності даних вмісту сирої клітковини в зерні показали, що системи удобрення мали вагомий вплив на коливання показника нагромадження клітковини, як альтернативи білкам і жирам у зерні ( $F_{\text{факт.}} 115,83 > F_{05} 3,01$ ;  $\text{HIP}_{05} \text{ абс.} = 0,50\%$ ) (дод. Д, табл. Д.4)

В. В. Ляшенко [58] довели, що максимальний вміст білка в зерні сої (38,2%) можливий за внесення по фону  $P_{60}K_{60}$  азотних добрив у дозі 90 кг/га д. р. Авторами визначено, що найбільший вміст жиру в зерні є у варіанті без добрив і становив 22,0%. В. В. Любич та ін. [57] представили результати досліджень свідчать, де вміст протеїну в зерні сої сучасних сортів може змінюватися від 36,1 до 44,4%. У середньому за два роки за їхніми дослідженнями вміст жиру змінювався від 18,9 до 21,7% залежно від сортів.

А. Г. Козючко, В. М. Гавій, О. Б. Кучменко [43] довели, що передпосівна на обробка насіння сої комбінаціями метаболічно активних речовин впливає на вміст білку в зерні. Так, вміст сирого протеїну у зерні сої у контрольному варіанті дослідів становив 18 мг/г. Передпосівна на обробка насіння сої метаболічно активними речовинами сприяє збільшенню концентрації протеїну на 23-35%, порівняно із контрольним варіантом.

### **6.3. Статистичний аналіз, графічне моделювання зв'язків між вмістом у зерні, збір корисних речовин з урожаєм**

Як свідчать розрахунки кореляції Пірсона між середніми за 2022-2024 роки показниками складу повітряносухого зерна сої після збирання врожаю, вміст сирого протеїну конкурує із рештою складників (табл. 6.1).

*Таблиця 6.1*

#### **Кореляція Пірсона між показниками складу зерна сої після збирання врожаю**

Показник, %	Кореляція, r (±)
Сирий протеїн і жир	-0,59
Сирий протеїн і клітковина	-0,83
Сирий протеїн і БЕР	-0,37
Сирий протеїн і волога	-0,02
Сирий жир і БЕР	0,28

Чим більше збагачене зерно білковими сполуками, тим менше у ньому жирів та, особливо, клітковини, і навпаки. Вміст сирого жиру позитивно, але слабо корелює із загальним вмістом решти складників зерна – БЕР –  $r = 0,28$ . Досліджений нами навіть неширокий діапазон внесення азоту ( $N_{0-60}$ ) впливає на залежність між співвідношенням сирих протеїну та жирів у зерні сої (рис. 6.4). Залежність між вмістом сирого протеїну та жиру описана (6.1) лінійним рівнянням регресії ( $r \pm = -0,59$ ):

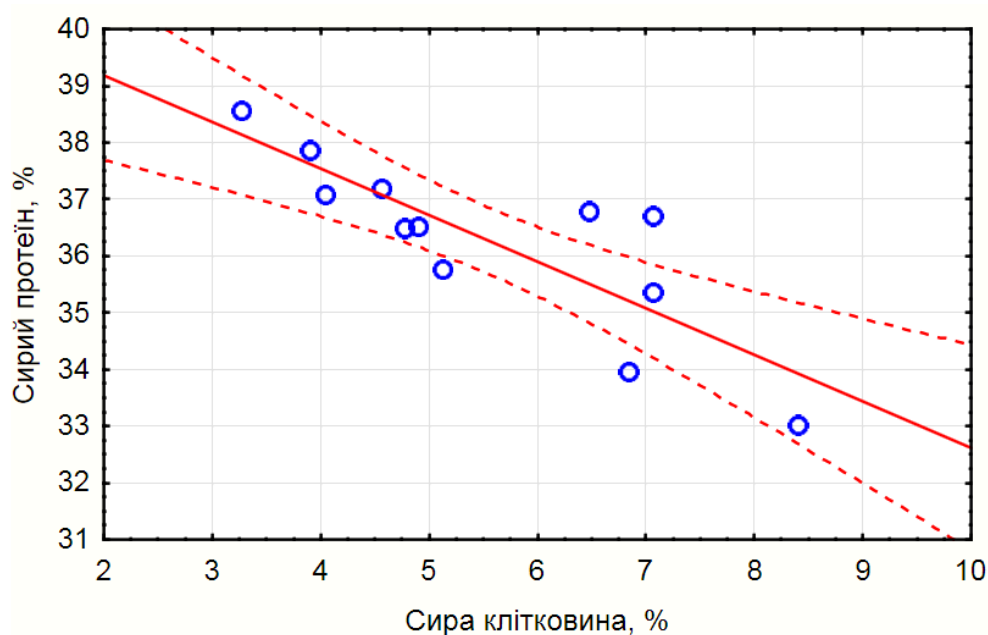
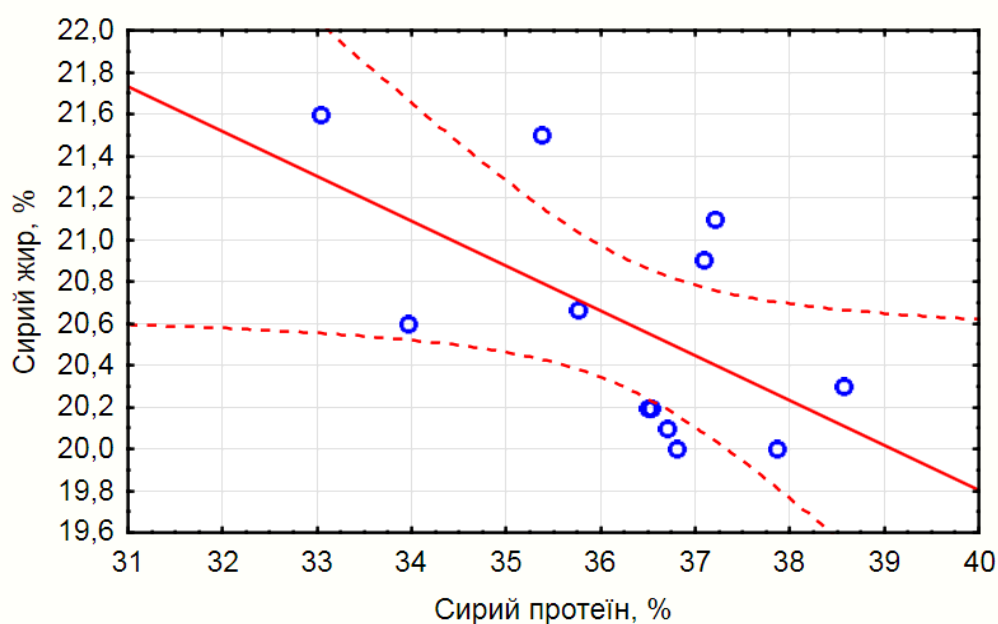


Рис. 6.4. Кореляція Пірсона між показниками якості зерна сої – вмістом сирогої клітковини, жирів та протеїну після збирання врожаю

$$\text{Сирий жир (\%)} = 28,372 - 0,2143 \times \text{сирий протеїн (\%)} \quad (6.1)$$

Залежність між вмістом сирогої клітковини та сирого протеїну та жиру описана (6.2) лінійним рівнянням регресії ( $r \pm = -0,83$ ):

$$\text{Сирий протеїн (\%)} = 40,812 - 0,8184 \times \text{сира клітковина (\%)} \quad (6.2)$$

Статистичне моделювання і графічні моделі вказують на альтернативні залежності між вмістом протеїнів, жирів і, особливо клітковини, із середнім і тісним коефіцієнтами кореляції.

Загалом, чим менше у зерні небілкових, не жироподібних сполук (БЕР) і сирогої клітковини, тим воно має кращі споживчі якості. Графічна модель (рис. 6.5) показує, що площина регресії вмісту сирого протеїну стрімко схиляється у напрямку зростання вмісту сирогої клітковини. За більших рівнів вмісту БЕР ця тенденція сповільнюється. Найвищий вміст сирого протеїну встановлено за мінімальних концентрацій сирогої клітковини та БЕР у зерні.

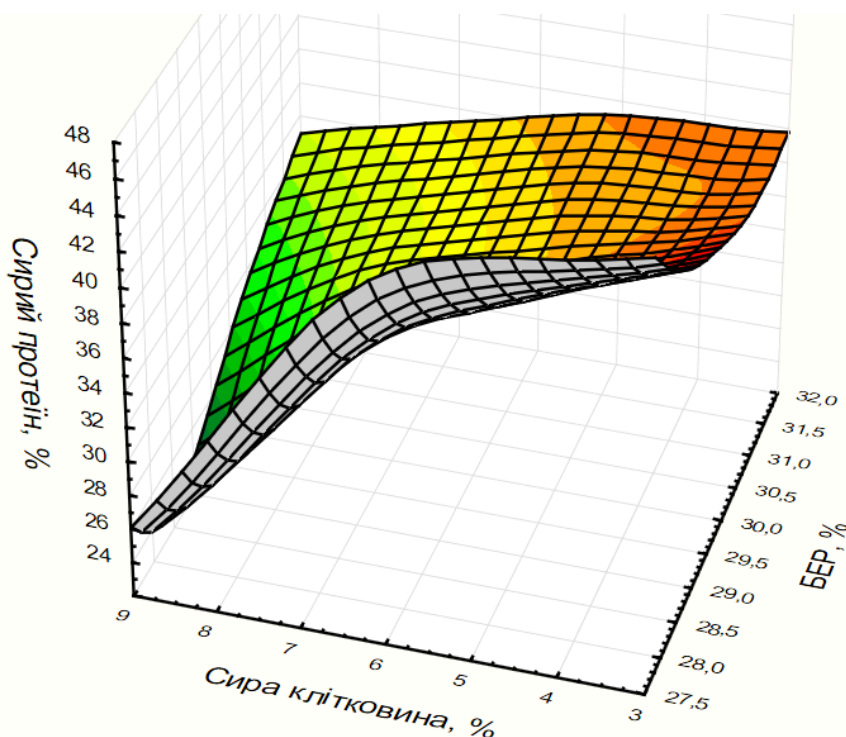


Рис. 6.5. 3Д-модель потрібних зв'язків вмісту сирової клітковини, безазотистих екстрактивних речовин (БЕР) р кількістю сирого протеїну у зерні сої.

Олійність сої теж важлива. Тому, коли сою вирощують для виробництва олії важливо знати, що жири в зерні нагромаджуються у максимальній кількості за мінімального рівня БЕР (рис. 6.6). Площина регресії демонструє, що за великої частки різних простих безазотистих і не жироподібних речовин (БЕР) та сирової клітковини, сирого жиру в зерні найменше.

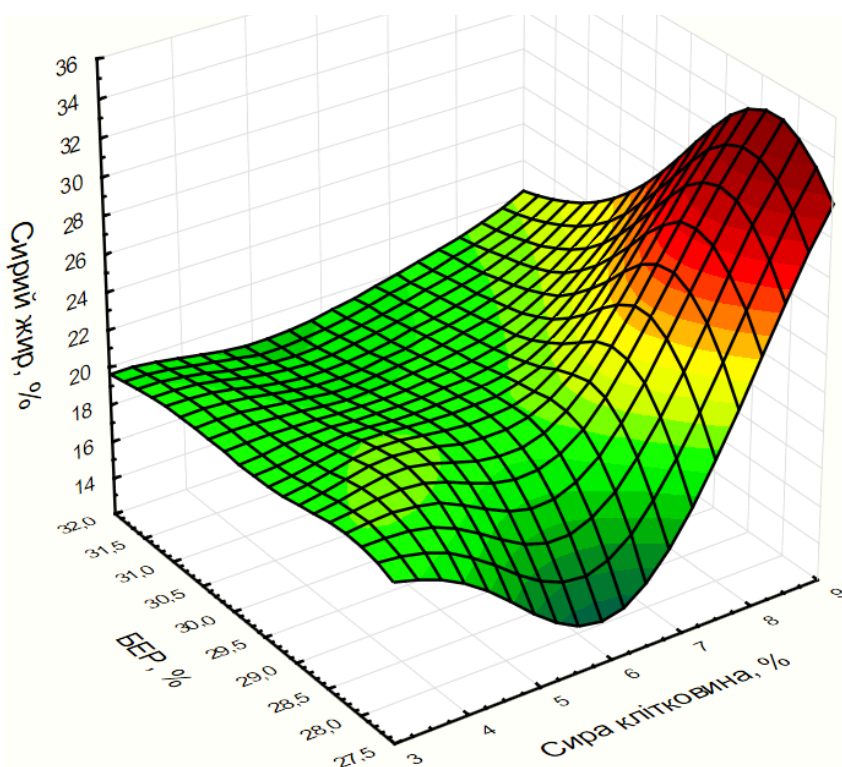


Рис. 6.6. 3Д-модель потрібних зв'язків вмісту сирової клітковини, безазотистих екстрактивних речовин (БЕР) з кількістю сирого жиру у зерні сої.

Так, 3Д-модель теоретичного розподілу на площині цих показників (рис. 6.7), побудована на фактичних результатах аналізу, свідчить, що збільшення норми внесення азоту від 0 до 60 кг/га д.р. практично пропорційно підвищує вміст сирого протеїну до 37-38% за середнього вмісту жирів 20,5-20,6%. Це зумовлено покращенням живлення сої азотом завдяки

позитивному впливу мінеральних добрив, а також дії інокулянта з азотфіксувальними бактеріями, які посприяли цьому навіть за мінімальної норми внесення азоту  $N_{30}$  у варіантах 10 та 12.

Систему удобрення сої слід розглядати не лише як прийом підвищення їх урожаю, а й як вагомий важіль підвищення якості зерна. Якість сої – це інтегральний показник, який включає вміст різних органічних сполук, зокрема білків, вуглеводів, жирів і клітковини, характеризуючи її товарну цінність. Головна роль у формуванні зерна з достатнім вмістом сирого протеїну належить азоту. Соя, споживаючи азот з ґрунту і повітря, може змінювати вміст білка в зерні на 20–50%.

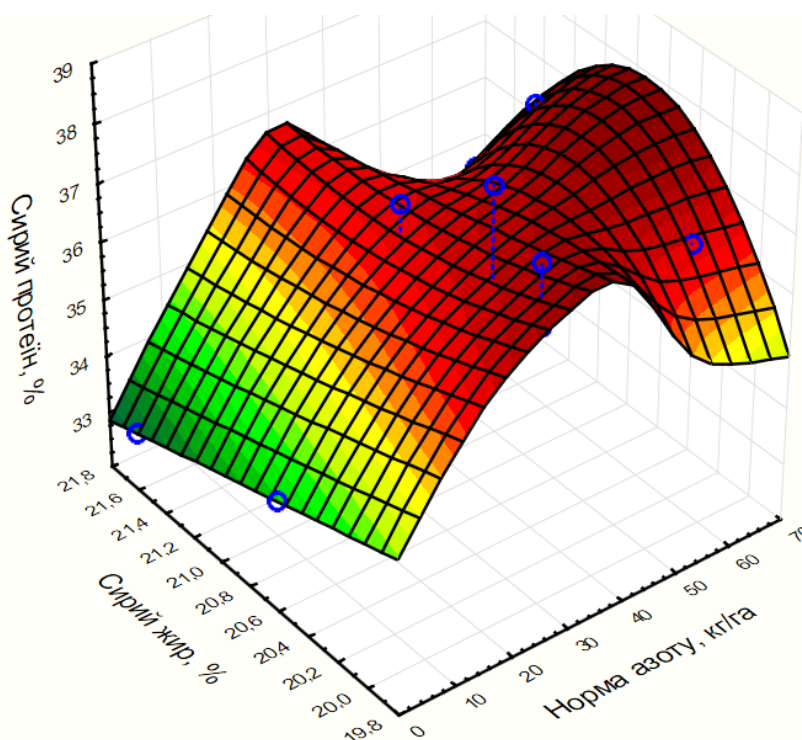


Рис. 6.7. 3Д-модель синергічної залежності вмісту сирого протеїну від норми внесеного азоту та кількості сирого жиру у зерні сої

В. Г. Дідора та ін. [27] встановили, що на ясно-сірих слобокислих ґрунтах Центрального (Житомирського) Полісся на тлі внесення  $N_{60}P_{60}K_{60}$ , сівба інокульованим насінням та позакореневе підживлення комплексними

добривами забезпечувало отримання урожаю зерна 3,14 т/га у скоростиглих сортів сої, збір сирого протеїну 1,10 т/га та жиру біля 0,60 т/га. А. Kahraman [166] наводить висновки, що листкове підживлення фосфором і сіркою, а також мікроелементами дуже позитивно вплинуло на продуктивність сої у Туреччині.

Результати наших досліджень врожаю та якості зерна сої свідчать, що за трирічного середнього врожаю в діапазоні 2,81-3,95 т/га в умовах Малого Полісся заходу України на більше родючому і слабокислому дерновому глейовому ґрунті можна досягти значно вищого збору найцінніших харчових і кормових компонентів зерна – білків та олії (рис. 6.8).

У середньому за 2022-2024 роки без застосування добрив ми отримували 0,93 т/га протеїну з урожаєм.

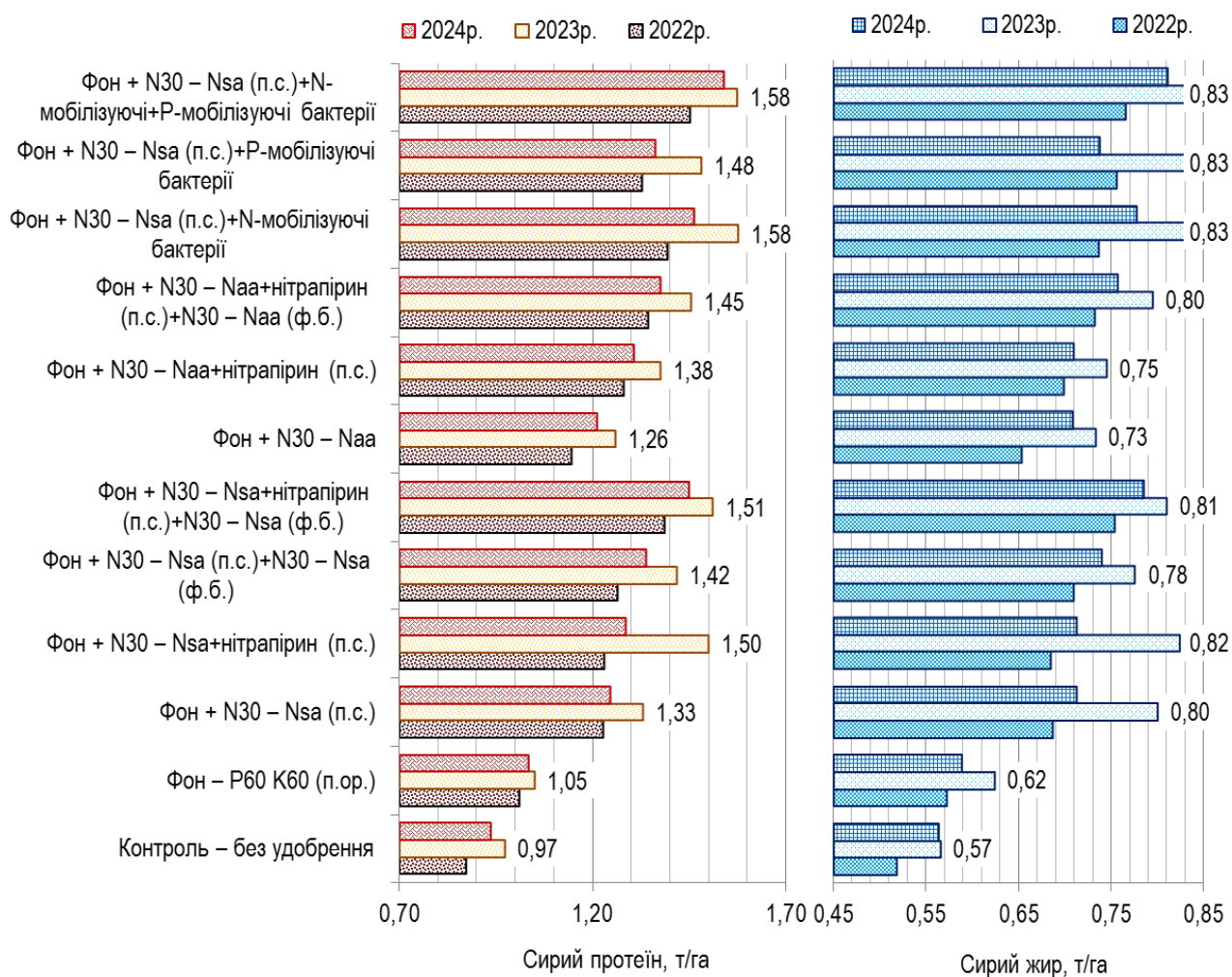


Рис. 6.8. Збір сирого протеїну та сирого жиру залежно від норм внесеного азоту, дії нітрапірину та інокулянтів упродовж 2022-2024 років

Лише фосфорно-калійний фон  $P_{60}K_{60}$ , рекомендований для зони Малого Полісся і дернового глейового ґрунту сприяв збільшенню збору протеїну на 0,10 тонни. Вже на цьому фоні внесення  $N_{30}$  у формі сульфату амонію, внесеного перед сівбою, збільшило збір протеїну на 0,36 т/га. Паралельне внесення нітрапірину для стабілізації утворення нітратів вагомо, а 2023 року стрімко підвищувало збір протеїну (на 0,17 т/га порівняно попереднім варіантом без інгібітора). Проте максимального збору сирого протеїну вдалося досягти за використання інокуюваного насіння для сівби як з азотним, так і в поєднанні його з фосфорним інокулянтом – 1,58 т/га (вар. 10 і 12). Амонійна селітра у порівнянні з сульфатом амонію була менше ефективним добривом, навіть із використанням інгібітора мікробної активності нітрифікаторів.

Підвищення збору сирого жиру (рис. 6.8) забезпечили різні системи удобрення, але інокуляція насіння була найвагомим чинником надвишки (2023 року 0,83 т/га у вар. 10, 11 і 12). Нітрапірин не мав такого вагомого впливу на олійність зерна, як на вміст білків.

Як за збором сирого протеїну, так і сирого жиру 2022 рік був найгіршим для сої. Натомість цього року в зерні було найбільше сирогої клітковини (мінімум 3,5 на кращому варіанті 12 і максимум 9,1% на контролі без добрив), тоді як найсприятливішого 2023 року цей діапазон коливання становив від 3,1 до 7,9%.

Графічне моделювання лінійної регресії середнього за 2022-2024 роки збору сирого протеїну з урожаєм зерна наочно показує повну їх залежність (рис. 6.9).

Рівняння лінійної регресії (6.3) сирого протеїну ( $r \pm = 0,99$ ):

$$\text{Сирий протеїн (т/га)} = -0,4968 + 0,5028 \times \text{Урожай (т/га)} \quad (6.3).$$

Рівняння лінійної регресії (6.4) сирого жиру ( $r \pm = 0,99$ ):

$$\text{Сирий жир (т/га)} = -0,0593 + 0,2184 \times \text{Урожай (т/га)} \quad (6.4).$$

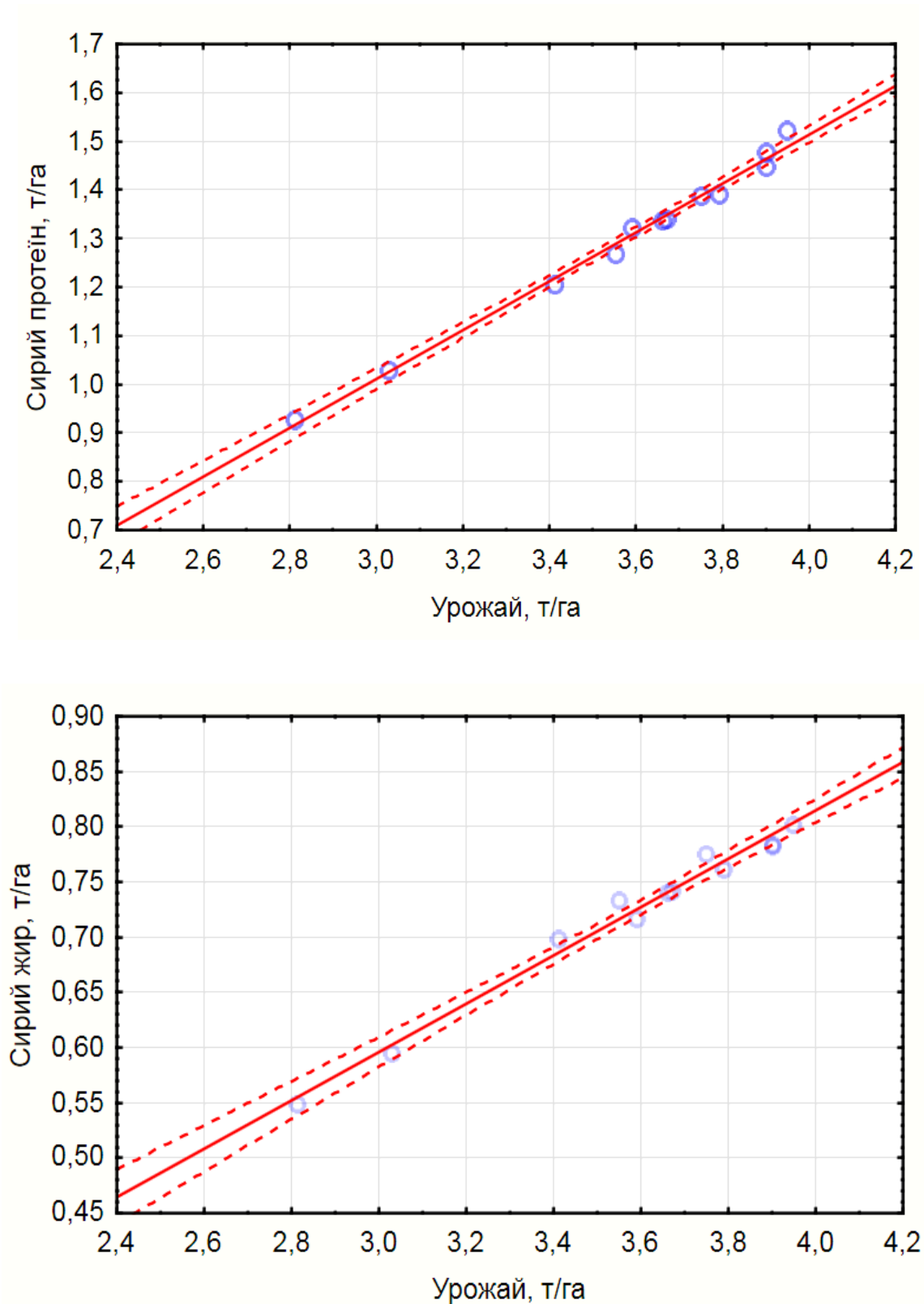


Рис. 6.9. Кореляції збору сирого протеїну ( $r \pm = 0,99$ ) та сирого жиру ( $r \pm = 0,99$ ) залежно від урожаю зерна сої (за середнім 2022-2024 років)

Обидва рівняння показують, що системи удобрення, які забезпечують найвищу врожайність зерна, також гарантують найвищий збір найкорисніших харчових компонентів сої.

Дослідниками J. Rappesousque et al [207] теж було вивчено вплив інокуляції та внесення азотних добрив на врожайність, вміст протеїну та економіку сої в Бельгії. Досліди з удобренням азотом та інокуляцією сої проводили з нормами ( $N_0$ ,  $N_{35}$ ,  $N_{70}$ ,  $N_{140}$ ), внесеними під час сівби та/або у фазі від бутонізації до квітування.

Найвищі врожаї та вміст білка були отримані за інокуляції, що підтверджує ефективність інокуляції, як найбільш прийняттого прийому для підвищення врожайності та рівня білка сої в Бельгії. Інокуляція також збільшила масу 1000 зерен.

Як і в наших експериментах у Малому Поліссі України, покращила біофізичну реакцію асиміляційного апарату за параметрами вимірювань флуоресценції хлорофілу. Бельгійські дослідники [207] встановили, що інокуляція та внесення азоту підвищили вміст хлорофілу в листках сої, а також вміст асимільованого надземною біомасою азоту. Автори зафіксували, що застосування високих доз азоту пригнічувало утворення бульбочок інокульованої сої. Проте, вони не застосовували нітрапірин для інгібування нітратоутворення, який показав себе ефективним у захисті процесу наростання бульбочок у сої в наших дослідках.

## **Висновки до розділу 6**

1. Найбільше сирого протеїну у зерні сої утворилося за двох систем удобрення: за внесення мінімальної норми азоту  $N_{30}$  у формі сульфату амонію на фосфорно-калійному фоні  $P_{60}K_{60}$  у поєднанні із застосуванням інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі – 37,9-38,6%. Але максимального показника білковості зерна досягнуто за поєднання азотфіксувальних та

фосформобілізаційних бактерій – 38,6%, що на 2,8% більше за системи удобрення азотом  $N_{30}$  (сульфат амонію) на фосфорно-калійному фоні  $P_{60}K_{60}$  без інокулянтів та за використання тільки азотфіксувальних бактерії *B. japonicum* (ХайКот Супер Соя – на 0,7%).

2. Високий рівень накопичення вмісту жирів у зерні сої забезпечило застосування фосформобілізаційного інокулянта Райс Пі з бактеріями *B. amyloliquefaciens*. Отже, покращення фосфорного живлення сої за допомогою мобілізаторів фосфатів сприяє утворенню високоенергетичних жирних сполук у зерні. Оптимізація азотного удобрення сої зменшує олійність зерна, а нітрапирин, покращуючи азотне живлення сої, виразно зменшує нагромадження в зерні сирого жиру.

3. Аналіз розрахованих кореляцій між біохімічними показниками складу зерна показав чітку альтернативність усіх інших компонентів стосовно вмісту сирого протеїну. За результатами дисперсійного аналізу вміст сирової клітковини в зерні достовірно найбільший там, де системи удобрення сої є найменше сприятливими для росту і розвитку культури, формування врожаю та накопичення протеїнів.

4. За трирічного середнього врожаю зерна в діапазоні 2,81-3,95 т/га в умовах Малого Полісся можна збирати від 0,87 до 1,58 т/га сирого протеїну та від 0,52 до 0,83 т/га сирого жиру, залежно від сприятливості умов вегетації. Збір 1,58 т/га сирого протеїну забезпечила система удобрення фон  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$  (сульфат амонію перед сівбою) + азотмобілізуючі + фосфатмобілізуючі інокулянти, або те саме, тільки без Р-мобілізатора, у найсприятливішому 2023 році.

5. Найбільшого збору сирих жирів вдалося досягти за систем удобрення, які передбачають як поєднане, так і роздільне застосування мікробних інокулянтів найсприятливішого 2023 року – 0,83 т/га. В середньому за три роки найвищого збору сирих жирів досягнуто за поєднання інокулянтів ХайКот

Супер Соя (*B. japonicum*) та Райс Пі (*B. amyloboliquefaciens*), що сприяють асиміляції азоту та фосфору – 0,80 т/га.

Результати досліджень за розділом 6 викладено у публікаціях: [45; 46; 47; 48; 49].

## Розділ 7

### **ЕКОНОМІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНИХ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ СОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНГІБІТОРА НІТРИФІКАЦІЇ ТА ІНОКУЛЯНТІВ**

За жорсткої міжнародної конкуренції, коли ринок визначає мотивацію тих, чи інших затрат на вирощування сої, на перший план виходить окупність і прибутковість різних нововведень і капіталовкладень. Азотні й фосфорно-калійні добрива дорогі, інгібітори й інокулянти ще не перевірені в конкретних умовах вирощування, тому виробникам сої важко вибрати прогресивні елементи технології. Нашими завданнями в останньому розділі дослідження є потреба розрахувати витрати і прибутки від вирощування сої у 2022-2024 роках на умовах 2023/24 маркетингового року. За принципами сталого розвитку, виробники зобов'язані орієнтуватися на мінімальну енергозатратність і найвищу енергоефективність зерновиробництва. Тому ми обчислили енергоємність та енергоефективність систем удобрення сої в умовах Малого Полісся.

#### **7.1. Економічні чинники вирощування сої в Малому Поліссі заходу України**

Опубліковано прогноз [253], що виробництво сої – четвертої провідної культури в світі, сягне рекордного показника в 2023/24 маркетинговому році. Соеве зерно та його похідні – соєвий шрот і олія разом – є найбільше продаваним аграрним товаром, на який припадає майже 9% загальної реалізованої вартості світової агропродукції. Попит на зерно сої останніми роками залишається стабільним. У середньому з початку 2024 року ціна сої стала меншою на 4500–5300 грн/т і коливається в межах 9000–10000 грн (із ПДВ чи без нього) [77].

На виробничу ціну зерна безпосередньо впливають вартість знарядь і техніки, паливно-мастильних матеріалів амортизації, посівного матеріалу тощо [5; 6; 22]. Ці параметри обов'язково слід брати до уваги для обчислення максимально точної та вигідної для аграрного підприємства закупівельної ціни на сою.

Сою можна вирощувати із мінімальними затратами. Так, інколи виробники покладаються на те, що соя завдяки інокульованому посівному матеріалу здатна забезпечити себе азотом самотійно, а решта макро- та мікроелементів можуть бути використані з тих ресурсів, що частково залишилися у ґрунті після удобрення попередника. Такий підхід не гарантує найвищої врожайності та максимальної ефективності виробництва. Зовсім без додаткового удобрення цього досягти не вдається, тому зазвичай при сівбі обов'язково вносять 40-60 кг сульфату амонію або діамофосу, забезпечуючи сходи стартовим ресурсом азоту на той час, доки соя почне фіксацію азоту з повітря чи засвоєння фосфатів, мобілізованих симбіонтами з ґрунту.

Низка авторів: Г. М. Господаренко і Н. Б. Єщенко [22], Г. Л. Гадзовський, Н. В. Новицька, О. Мартинов [12], В. Г. Дідора та ін. [27], S. Mourtzinis, G. Kaur, J. M. Orłowski et al [193], I. M. Didur et al [131] обґрунтовують економічну й енергетичну ефективність хоча б одного листового підживлення, особливо мікроелементами (бором [129], молібденом [201] тощо).

Важливо обрати ефективний інокулянт і не порушувати процедуру інокуляції насіння сої [18; 20]. Інокулянт може не спрацювати за відсутності вологи у ґрунті, тому за сівби у сухий ґрунт його застосовувати недоцільно.

Також треба врахувати вплив протруйників, які можуть пригнічувати азотфіксувальні бактерії в інокулянті. Тому важливе застосування якісного інокулянта та нетоксичного протруйника для поєднаного застосування.

Для рентабельного вирощування сої Мале Полісся заходу України має достатній, інколи надлишковий ресурс вологи, проте можуть складатися ситуативні погодні умови з обмеженими тепловими ресурсами: прохолодна

весна або рідше пришвидшене настання осінніх холодів. Особливо ситуація для сої несприятлива, коли у фазі дозрівання бобів бракує підвищених температур на фоні надлишкової вологості. Весняні холоди або поспішні строки сівби можуть знижувати ефективність мікробіотичних препаратів-інокулянтів, а також нівелювати дію інгібітора нітрифікації, яка сама по собі сповільнюється у холодному перезволоженому ґрунті.

У нашому експерименті найбільшу суму затрат у порядку зменшення становили добрива: сульфат амонію, фосфорно-калійні добрива, амонійна селітра (дод. Е, табл. Е.1). Інгібітор нітрапірин (N-Lock™) разом з внесенням додавав затрат 1470 грн/га. Найменші затрати були здійснені на препарати-інокулянти ХайКот Супер Соя і Райс Пі: відповідно 440 та 170 грн/га.

Найбільші затрати на закупівлю і внесення добрив і препаратів у сумі в економічних умовах заходу України були на варіанті системи удобрення: фон  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію) + нітрапірин (перед сівбою) +  $N_{30}$  (сульфат амонію, підживлення у фазі бутонізації) – 9956 грн/га.

## **7.2. Економічний показники ефективності добрив, нітрапірину та інокулянтів**

Економічна оцінка вирощування сої упродовж трьох років свідчить, що найбільша вартість зерна з гектара – 70310 грн, була за системи удобрення фон  $P_{60}K_{60}$ (під оранку)+ $N_{30}$ (сульфат амонію перед сівбою), доповненої інокуляцією насіння N+P-бактеріями (дод. Е, табл. Е.2). Проте, сукупні затрати на вирощування врожаю були найвищими – 19856 грн/га, за іншої системи удобрення: фон  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$  (амонійна селітра + нітрапірин перед сівбою) +  $N_{30}$  (амонійна селітра у підживлення у фазі бутонізації). До максимальної наближалася вартість продукції (69420 грн/га) за внесення  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$  (сульфат амонію перед сівбою), поєднаного з інокуляцією насіння препаратом ХайКот Супер Соя (азотмобілізуючі бактерії *B. japonicum*).

Така ж вартість продукції була за системи удобрення  $P_{60}K_{60}$ (під оранку)+ $N_{30}$ (сульфат амонію перед сівбою), тільки поєднаної із застосуванням інгібітора нітрифікації (N-Lock™).

Чистий прибуток є головною мотивацією зерновиробника. Отримавши однакову вартість валової продукції на варіантах однакової системи удобрення  $P_{60}K_{60}$ (під оранку)+ $N_{30}$ (сульфат амонію перед сівбою), тільки за використання інгібітора або інокулянта, ми розраховували більший чистий прибуток за оброблення насіння препаратами ХайКот Супер Соя (бактерії *B. japonicum*) і Райс Пі (бактерії *B. amyloliquefaciens*) (рис. 7.1) – 52474 грн/га проти 48264 грн/га.

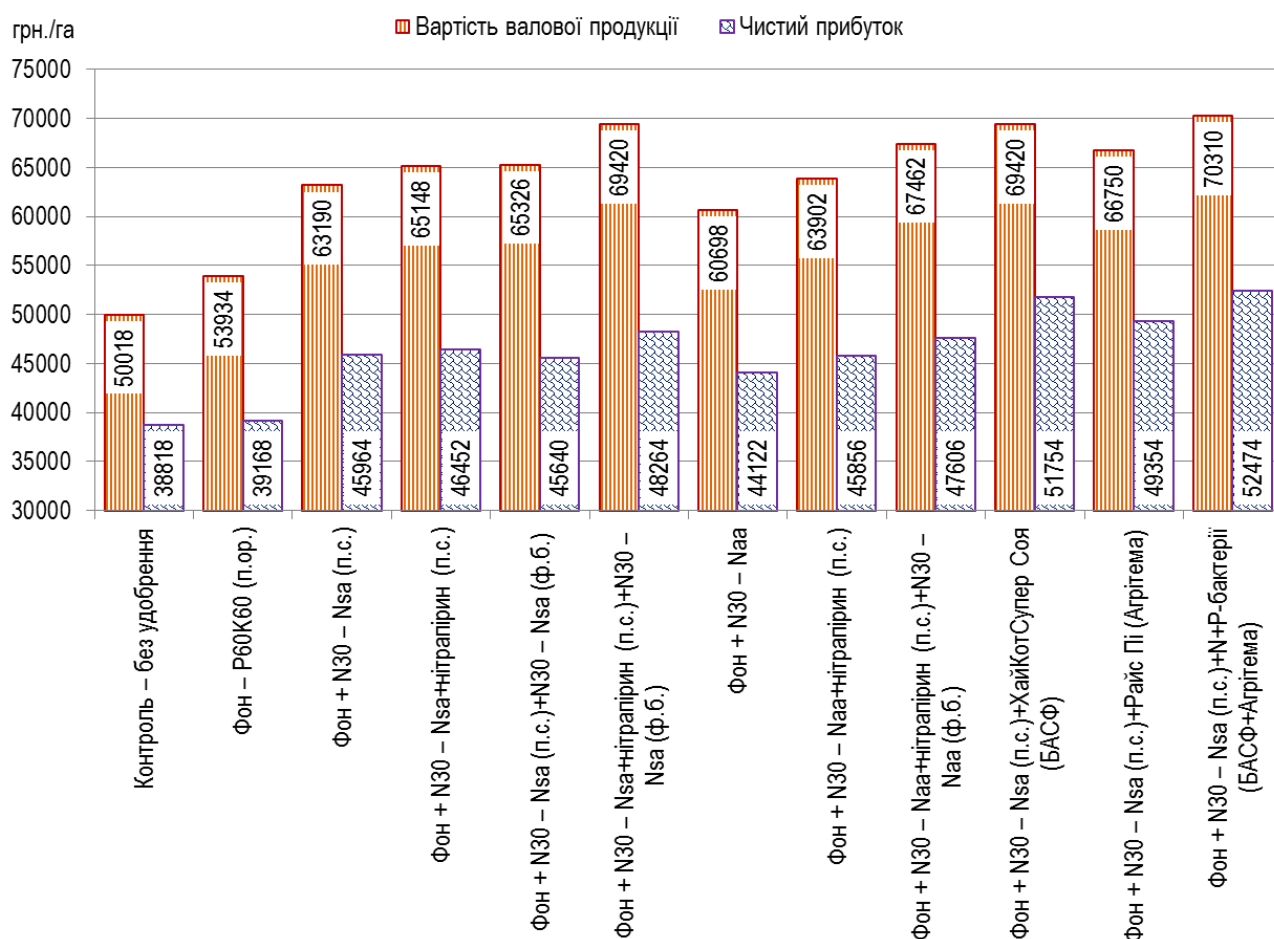


Рис. 7.1. Вартість продукції і чистий прибуток від застосування добрив N-Lock™ та інокулянтів (середнє за 2022-2024 рр.).

Перевагу інокуляції пояснюємо меншою вартістю препарата ХайКот Супер Соя – 460 грн/га, проти вартості 1470 грн/га інгібітора N-Lock™ разом з внесенням (дод. Е, табл. Е.1). Лише на 750 грн/га меншим чистий прибуток був за поєднаного застосування двох інокулянтів ХайКот Супер Соя і Райс Пі на мінімальному фоні мінерального удобрення  $P_{60}K_{60}$ (під оранку)+ $N_{30}$ (сульфат амонію перед сівбою).

Проте, чинна методика економічної оцінки системи удобрення не враховує вагомої позитивної дії фосформобілізаційних препаратів на фосфатний режим ґрунтів. У наших дослідженнях застосування інокулянта Райс Пі, який містить фосформобілізаційні бактерії *B. amyloliquefaciens* на фоні  $P_{60}$  сприяло підвищенню вмісту рухомих фосфатів ще додатково на 3,9 мг/кг ґрунту. У фазі сходів ресурс доступних фосфатів становив 139,1 мг/кг, а до збирання зберігся найвищим у серед усіх систем удобрення і становив 132,2 мг/кг (див. розд. 3, рис 3.1). Тобто, інокуляція насіння сої забезпечила вищий вміст рухомих фосфатів в орному шарі до самого збирання врожаю, що підтверджує позитивну роль бактеріяльних препаратів у мобілізації недоступних фосфатних ресурсів дернового глейового ґрунту Малого Полісся.

Застосування амонійної селітри ( $N_{30}$ ) як без інгібітора утворення нітратів, так з нітрапірином забезпечувало найменший чистий прибуток серед усіх систем удобрення – 44122 грн/га (рис. 7.1). Зауважимо, що на контролі без добрив соя забезпечила 38818, а на фосфорно-калійному фоні ( $P_{60}K_{60}$ ) 39168 грн/га.

Вартість додаткового врожаю (рис. 7.2) була найбільшою за внесення  $P_{60}K_{60}$ (під оранку)+ $N_{30}$ (сульфат амонію перед сівбою), поєднаного інокуляцією насіння двома препаратами ХайКот Супер Соя і Райс Пі – 20 292 грн/га. Лише на 890 грн меншою була вартість надвишки за системи удобрення: фон  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$ (сульфат амонію + нітрапірин перед сівбою) +  $N_{30}$ (сульфат амонію у підживлення у фазі бутонізації), а також за системи: фон  $P_{60}K_{60}$  (під

оранку) + N<sub>30</sub> (сульфат амонію перед сівбою) з інокуляцією насіння тільки азофіксуючими бактеріями.

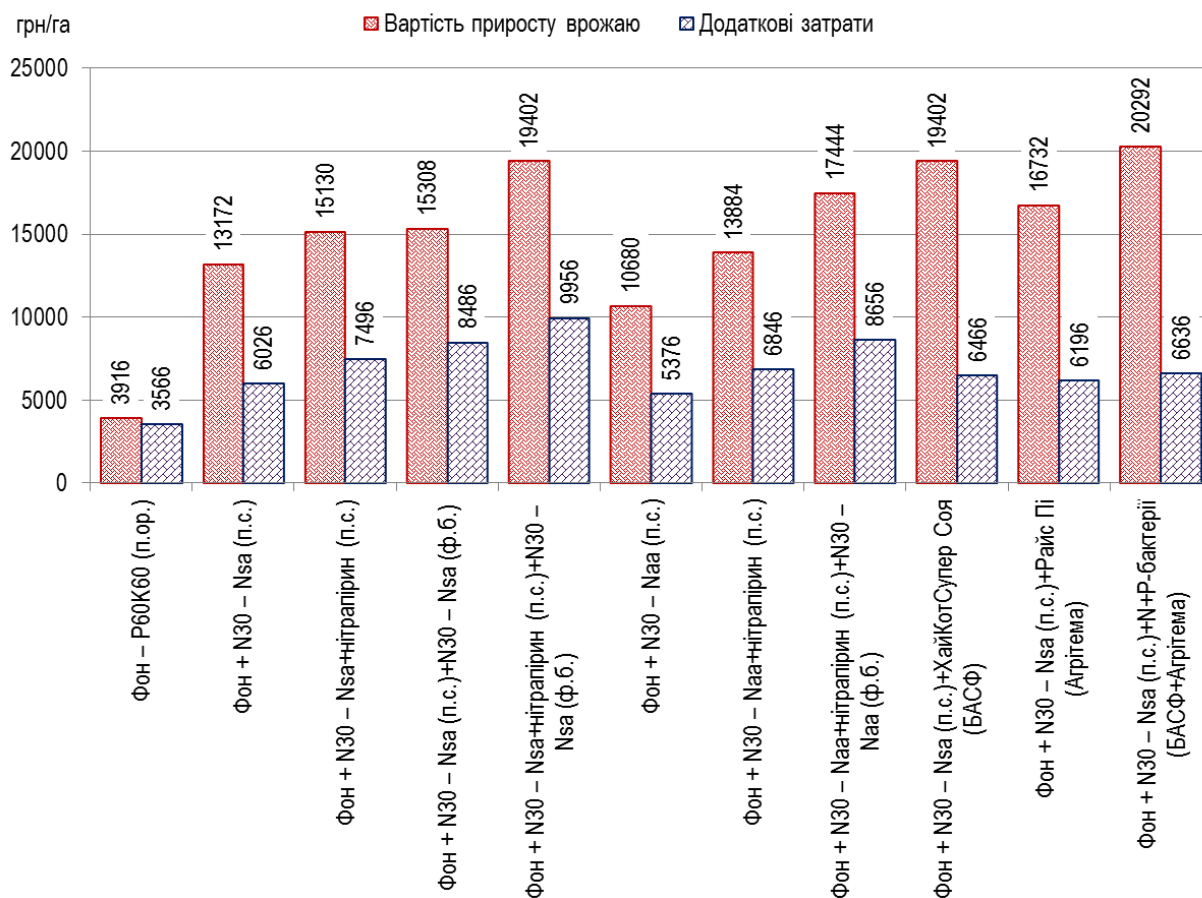


Рис. 7.2. Вартість приросту врожаю та додаткові затрати на застосування добрив, N-Lock™ та інокулянтів (середнє за 2022-2024 рр.).

Проте дворазове внесення сульфату амонію (N<sub>30+30</sub>) та застосування нітрапірину збільшувало додаткові затрати від 6436 грн/га на варіанті з інокуляцією препаратами ХайКот Супер Соя та Рас Пі до 9956 грн/га.

На чистий прибуток у наших дослідженнях найсильніше впливає урожайність зерна сої – позитивна кореляція описується коефіцієнтом  $r = 0,90$ . Чистий прибуток також тісно прямо зв'язаний з додатковими затратами – коефіцієнт кореляції  $r = 0,75$ .

Через меншу вартість внесення концентрованішої за діючою речовиною амонійної селітри ми отримали найвищу окупність затрат в системі удобрення

$P_{60}K_{60}$ (під оранку)+ $N_{30}$ (амонійна селітра перед сівбою) – 8,21 грн (рис. 7.3). Це на 0,58 грн вигідніше, ніж за аналогічних норм внесення добрив, тільки азотних у формі дорожчого в операції внесення і менше концентрованого за діючою речовиною сульфату амонію. На 0,21 грн менша була окупність на цьому варіанті удобрення, тільки з використанням інокулянта ХайКот Супер Соя і на 0,22 грн – з додаванням та Рас Пі.

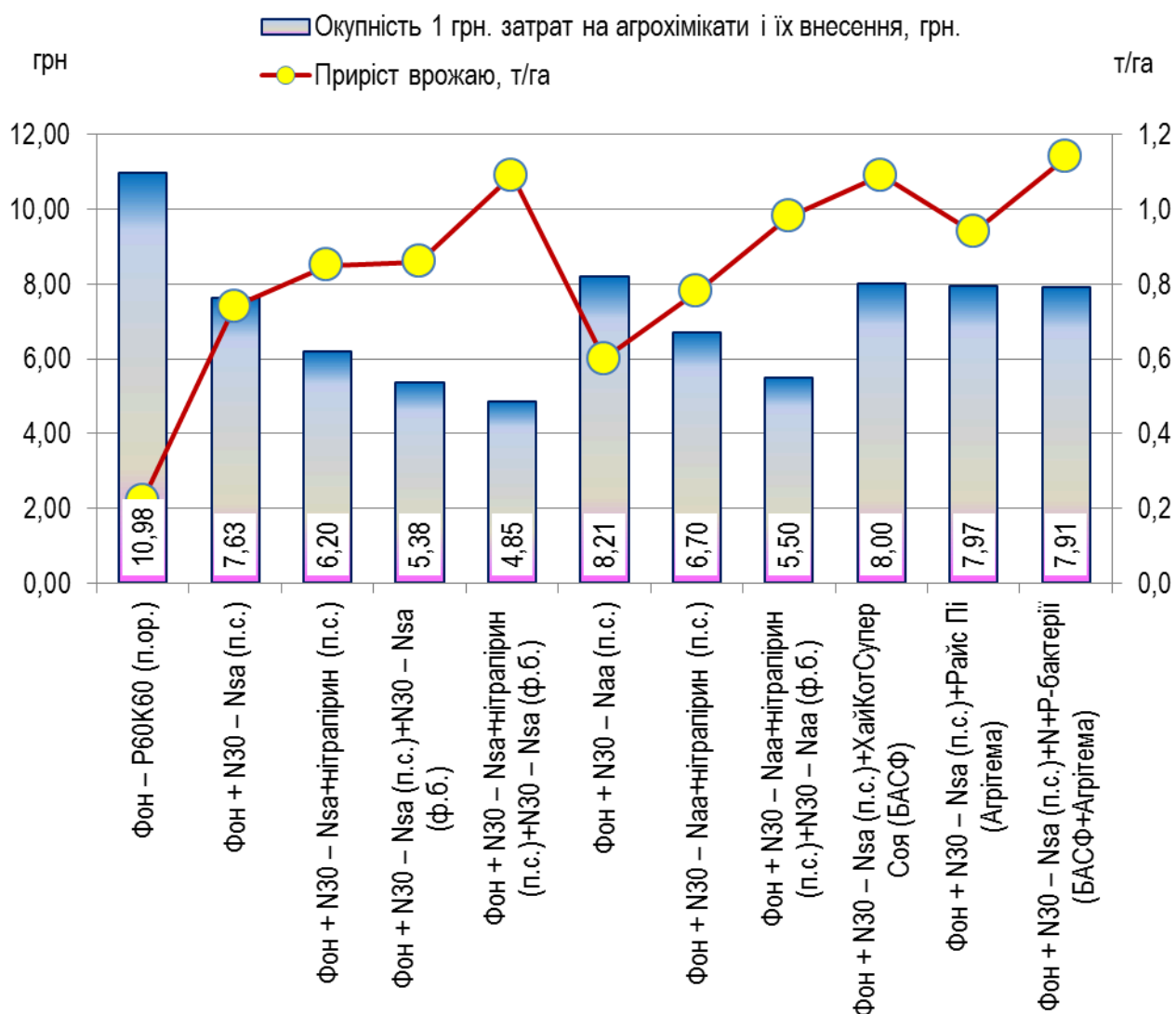


Рис. 7.3. Приріст врожаю та окупність застосування добрив, N-Lock™ та інокулянтів при вирощуванні сої (середнє за 2022-2024 рр.).

З окупністю затрат тісно позитивно зв'язана рентабельність технологій. У наших дослідженнях кореляція окупності з рентабельності є сильною –  $r = 0,69$ .

За критерієм рентабельності виробництва показник у нашому досліді коливається в діапазоні від 228% до 294% (рис. 7.4). 347% становить рентабельність варіанту без внесення мінеральних добрив та без використання інших додаткових засобів.

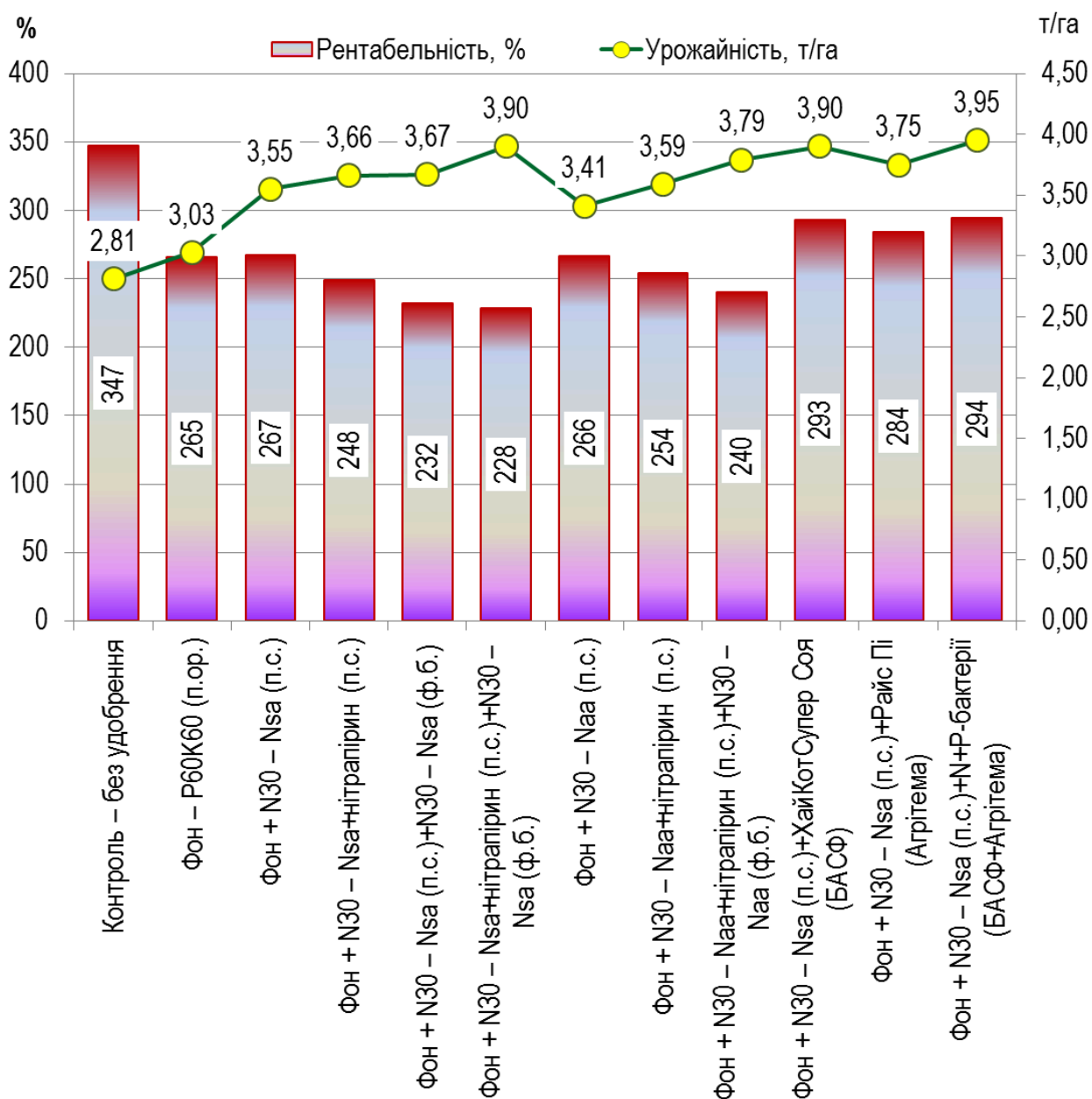


Рис. 7.4. Рентабельність застосування добрив, N-Lock™ та інокулянтів для підвищення врожайності сої.

Система удобрення  $P_{60}K_{60}$ (під оранку) +  $N_{30}$ (сульфат амонію перед сівбою), поєднана з інокуляцією насіння препаратами ХайКот Супер Соя та Рас Пі, забезпечила найвищу рентабельність серед усіх інших систем удобрення – 294%. Високий рівень рентабельності отриманий за мінімальних норм удобрення сої  $N_{30}P_{60}K_{60}$ , тільки з різницею 1% за використання сульфату амонію проти амонійної селітри, яка хоч і дешевша у внесенні, та забезпечила меншу надвишку врожаю. Загалом, рентабельність дуже тісно негативно корелювала з додатковими затратами у дослідіах ( $r = -0,89$ ).

Графічне відображення площини регресії обсягу чистого прибутку залежно від врожайності та суми додаткових витрат коштів на застосовані засоби підвищення врожаю (рис. 7.5) демонструє вагому позитивну роль рівня врожаю сої навіть за певного негативного впливу підвищення додаткових затрат.

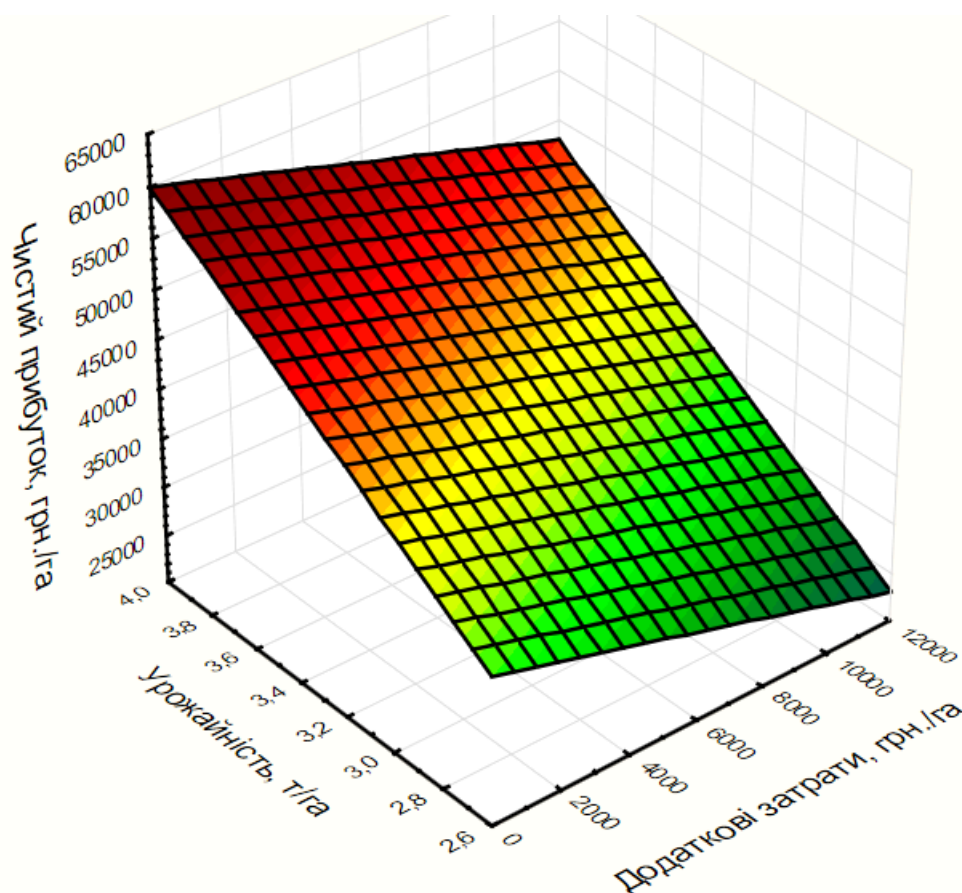


Рис. 7.5. Площина регресії обсягу чистого прибутку залежно від врожайності та додаткових витрат коштів на агрохімічні засоби та інокулянти

Площини регресії обсягу чистого прибутку залежно від вартості продукції та сукупних додаткових витрат на добрива, нітрапірин та інокулянти (рис. 7.6) ще більше підтверджує ефективність цих засобів у технології вирощування сої, сприяють надвищці врожаю.

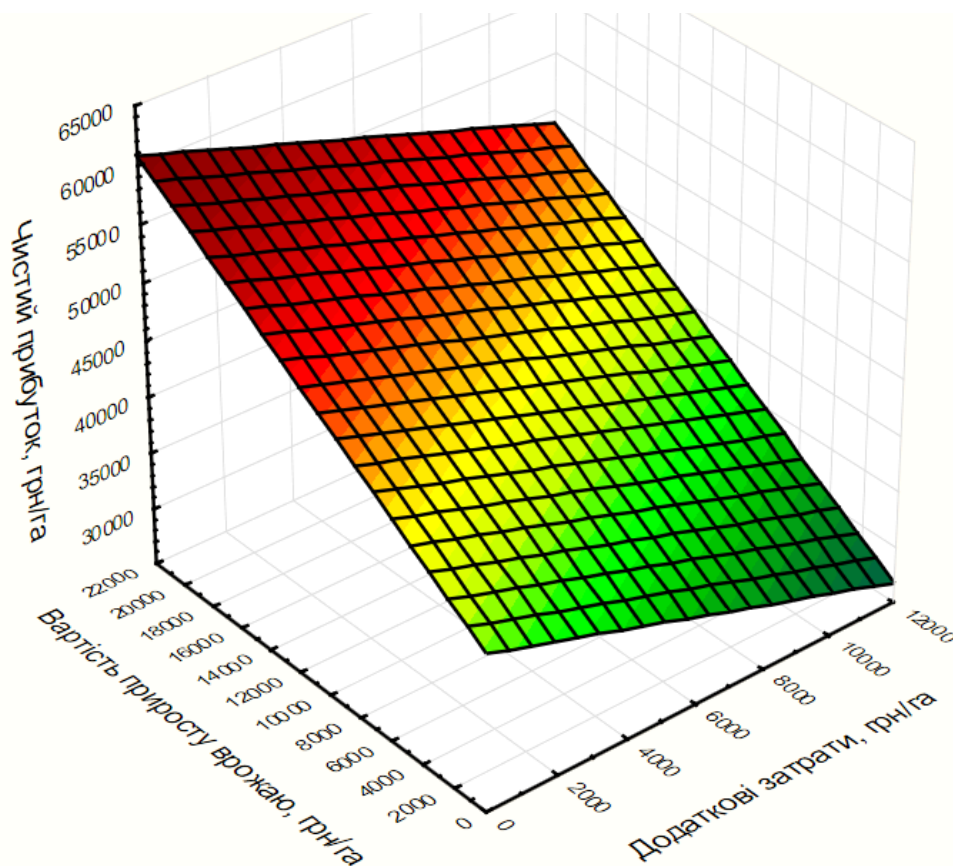


Рис. 7.5. Графічна 3Д-модель регресії обсягу чистого прибутку залежно від вартості продукції та додаткових витрат коштів на мінеральні добрива, інгібітор та інокулянти

### 7.3. Енергетичні переваги використання добрив, інгібітора та інокулянтів у технології сої

Енергомісткість зерна визначається обсягом врожаю, тому прагнення досягти максимальної продуктивності культури гарантує покриття енерговитрат на застосовані додаткові матеріали. В нашому досліді додаткові

енергозатрати були нерівномірними і досягали найвищих величин за подвійних норм внесення азоту на фосфорно-калій норму фоні. За системи удобрення  $N_{30+30}$  (сульфат амонію) з інгібітором нітрифікації на фоні  $P_{60}K_{60}$  спостерігали максимальну компенсацію енергозатрат великою енергоємністю врожаю зерна (рис. 7.6, дод. Е, табл. Е.2).

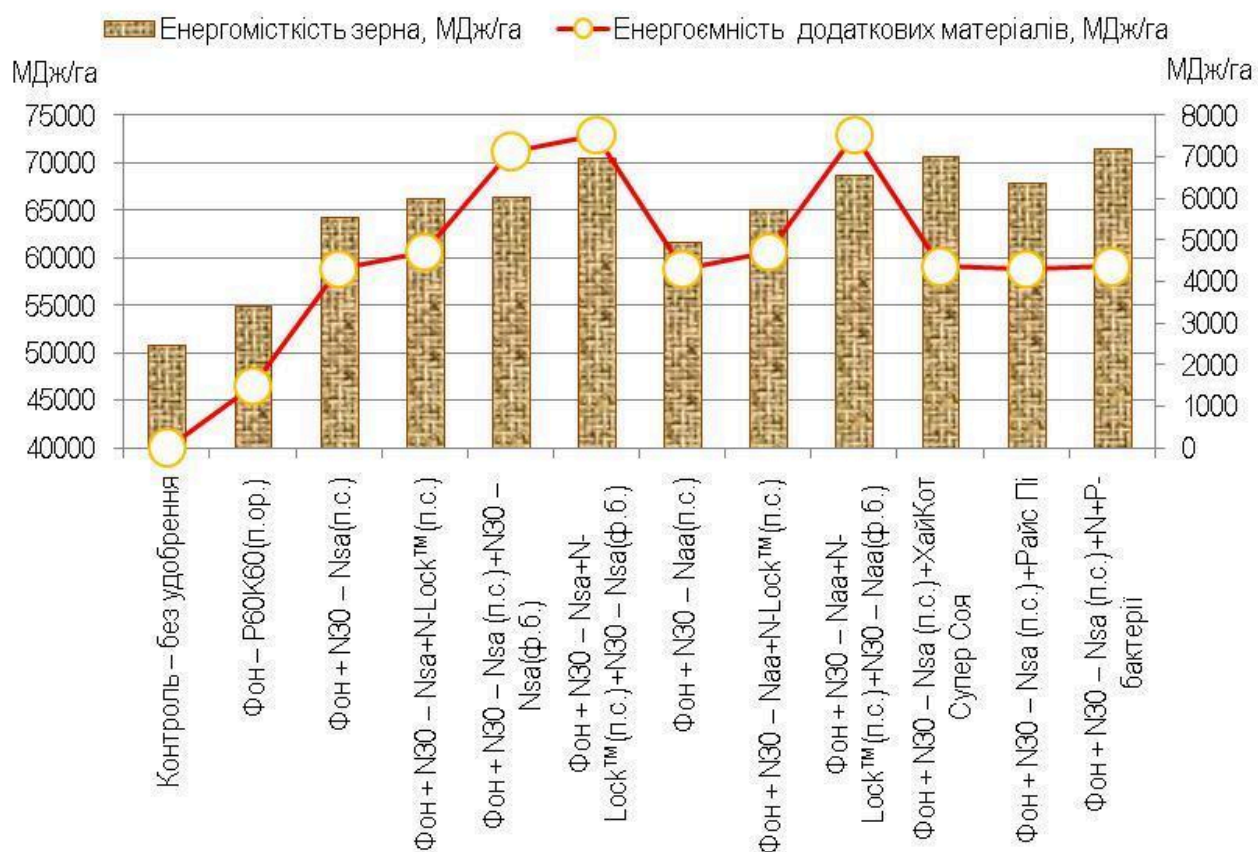


Рис. 7.7. Енергоємність зерна та додаткових матеріалів для вирощування сої.

Проте, ще більша компенсація встановлена за мінімальної норми внесення азоту 30 кг/га д. р. (сульфат амонію) з використання інокулянтів. Такий баланс наближався до варіанту внесення такої ж норми добрив, але за використання стабілізатора нітратів у ґрунті.

Енергозатрати на вирощування та енергоефективність виробництва зерна сої – важливий показник доцільності впровадження сучасних приймів агротехнології у рільництві. Енергоємність матеріальних витрат визначається

обсягом їх використання при вирощуванні. В нашому дослідженні вона була вищою там, де було внесено фосфорно-калійні добрива та подвійні норми азотних добрив та нітрапірин (рис. 7.7; дод. Е, табл. Е.2). Нітрапірин та інокулянти дуже мало збільшували енерговитрати, при тому, врожайність сої зростала до максимальної. Найбільше зростання енерговитрат спостерігали за внесення  $N_{30+30}$  на фоні  $P_{60}K_{60}$  із застосуванням нітрапірину (24090 МДж/га як за використання сульфату, так і нітрату амонію). Збалансована система удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію) та застосування інокулянтів мали вагомо менші енерговитрати, але високий врожай зерна сої.

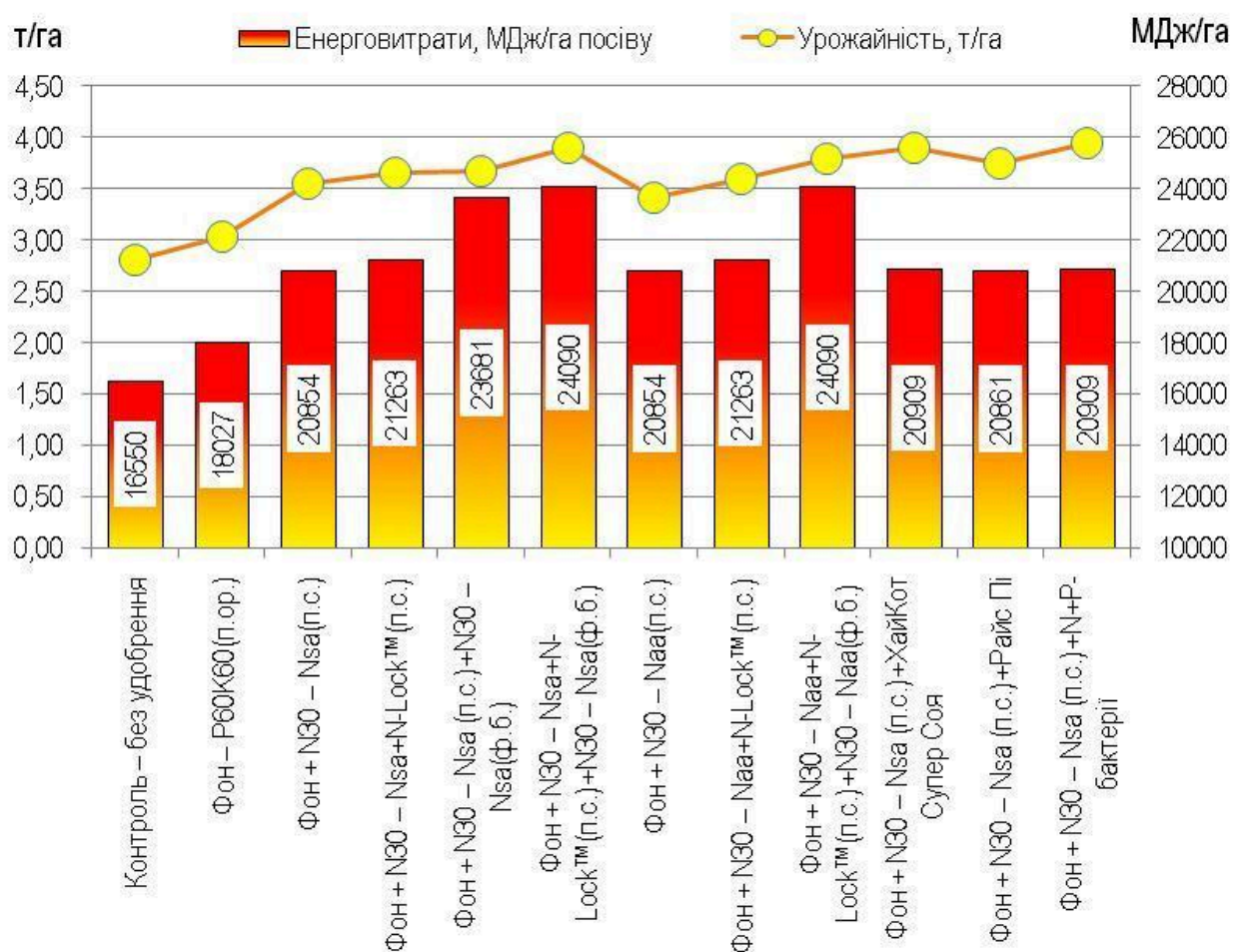


Рис. 7.7. Енергозатратність застосування добрив та N-Lock™ для вирощування сої.

Співвідношення енергомосткості зібраного зерна сої з одного гектара та витрачених на один гектар енергоємних ресурсів відображає коефіцієнт енергетичної ефективності ( $K_{ee}$ ) виробництва. Внесені добрива у менших, чи більших нормах вагомо підвищують збір сухої енергомосткої речовини у зерні сої (рис. 7.8; дод. Е, табл. Е.3).

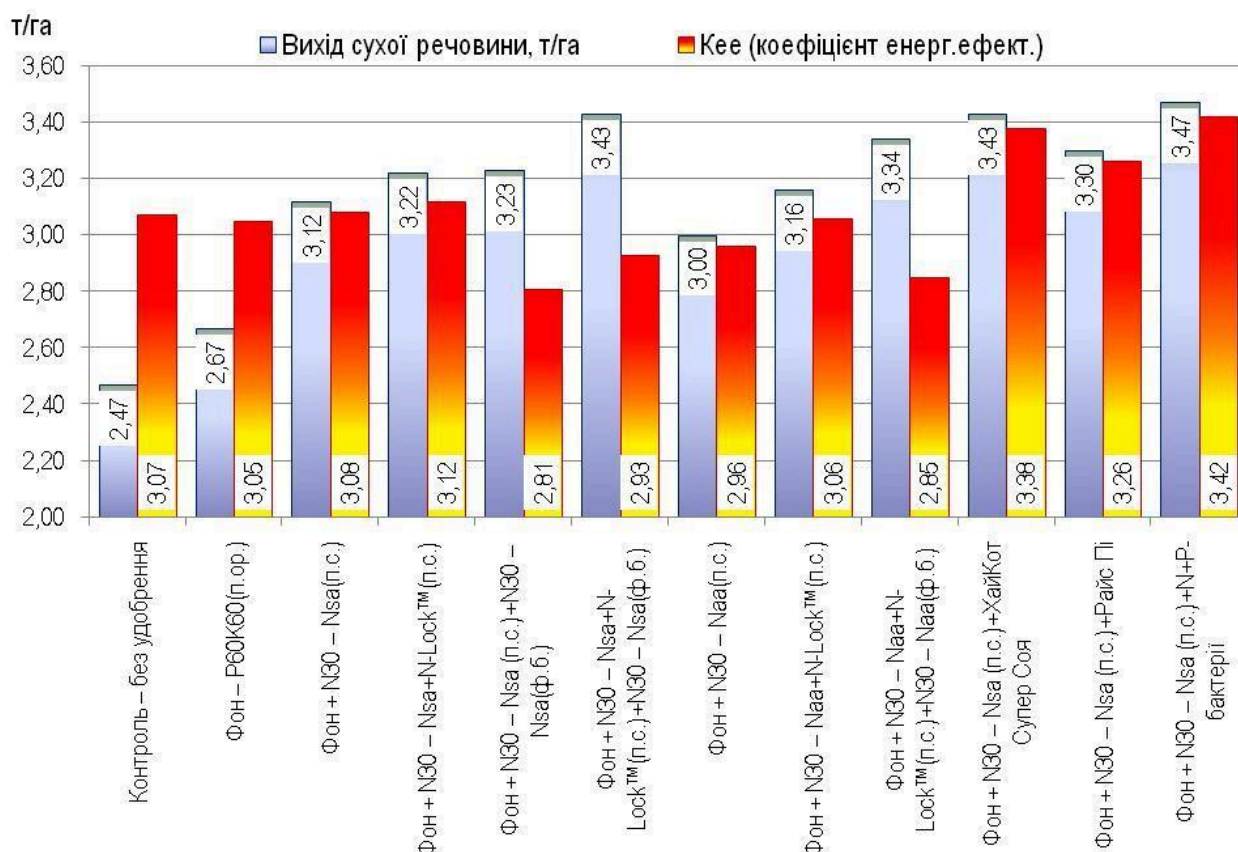


Рис. 7.8. Коефіцієнт енергетичної ефективності та вихід сухої речовини при застосуванні різних систем удобрення у поєднанні з N-Lock™ та інокулянтами за вирощування сої.

Максимальний врожай у середньому за 2022-2024 роки, а значить і збір сухих речовин, ми отримали за системи удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію) та застосування двох інокулянтів: ХайКот Супер Соя і Райс Пі – 3,47 т/га. Близький показник 3,43 т/га, мали дві системи удобрення:  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію) з використання тільки азотфіксувального інокулянта;  $N_{30}P_{60}K_{60}$  + інгібітор +  $N_{30}$  у підживлення (сульфат амонію).

Проте, на варіанті системи удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  + інгібітор +  $N_{30}$  у підживлення (сульфат амонію) коефіцієнт енергетичної ефективності був істотно меншим (рис. 7.8), ніж за меншої норми азотного удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію) з використання тільки азотфіксувального інокулянта, Підвищення К<sub>е</sub> до 3,38 спостерігали за внесення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  у поєднанні з азотбактеріальною інокуляцією насіння. Але він не був максимальним за цієї системи удобрення. Найбільший рівень К<sub>е</sub> 3,42 було досягнуто за застосування двох інокулянтів: азотного та фосфорного на фоні норм удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію). Найбільше занижують К<sub>е</sub> подвійні норми азоту як у формі сульфату, так і нітрату амонію.

### Висновки до розділу 7

1. За не найвищого врожаю (3,90 т/га) та за помірних додаткових витрат на добрива система мінерального удобрення  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$  (у формі сульфату амонію перед сівбою) із застосуванням азотфіксувального інокулянта насіння ХайКот Супер Соя забезпечила максимальний чистий прибуток від реалізації зерна сої – 51754 грн/га. Лише на 750 грн/га менший і другий у дослідках прибуток забезпечила така ж система удобрення, але з додатковою інокуляцією насіння фосфор мобілізаційним препаратом Райс Пі (Агрітема), застосування якого вагомо збільшувало доступність фосфатних ґрунтових ресурсів та підвищувало до максимуму (38,6%) білковість зерна, але ці переваги економічно не оцінюються.

2. Стосовно використання нітрапірину, як стабілізатора азоту, слід сказати, що він підвищував чистий прибуток у всіх варіантах його застосування, якщо порівнювати з аналогічними варіантами систем удобрення, але ні на помірних, ні на подвійних варіантах норм азоту не забезпечував більшого прибутку, ніж інокуляція насіння на помірному фоні удобрення.

3. Рентабельність виробництва сої була високою і коливалася в діапазоні від 228% до 293%. Застосування азотних добрив у формі сульфату амонію,

збільшення норми азоту вдвічі і внесення нітрапірину зменшувало показник рентабельності на 18-39% відносно традиційної системи удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Проте на такому фоні удобрення використання інокулянта ХайКот Супер Соя забезпечило збільшення рентабельності на 26% до максимуму з-поміж удобрених варіантів – 293%. На цьому ж фоні удобрення окупність додаткових затрат була найбільшою – 8,00 грн/грн і перевищувала традиційний варіант удобрення на 0,37 грн/грн. Найбільш конкурентним за рентабельністю та окупністю був традиційний варіант системи удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію) з використанням ХайКот Супер Соя.

4. З міркувань енергоефективності виробництва зерна сої найбільшу компенсацію енергозатрат забезпечили невеликі норми добрив  $N_{30}P_{60}K_{60}$  у поєднанні з використанням двох інокулянтів: азотфіксувального та фосформобілізаційного препаратів. У такому разі коефіцієнт енергетичної ефективності становить найвищий рівень. Наближаються до нього варіанти, де на мінімальній системі удобрення використано лише один із двох інокулянтів.

Результати досліджень за розділом 7 викладено у публікаціях [45; 47; 49; 159].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропонована апробована система удобрення сої з використанням стабілізатора нітрифікації та інокулянтів, яка оптимізує мінеральне живлення сої азотом, фосфором і калієм з різних джерел та забезпечує отримання високого врожаю зерна з економічно обґрунтованими затратами в умовах району Малого Полісся на дерновому глибокому глейовому піщанисто-легкосуглинковому ґрунті.

1. Питання азотного і фосфатного живлення сої, застосування інгібіторів нітрифікації та азот- і фосфатмобілізаційних інокулянтів в умовах достатнього зволоження у Малому Поліссі Лісостепу Західного, сфокусованого у єдиній системі удобрення дотепер не було вивчене і в науковій літературі про дослідження такого плану не повідомляється. Поширена у традиційних світових регіонах вирощування соя, вперше просувається у Мале Полісся, як культура великої економічної зацікавленості у зерновиробників регіону, під якою з року в рік тут, і в Україні загалом, розширюються площі сівби.

2. Фосфорно-калійне удобрення є обов'язковим для покращення родючості ґрунту. Ґрунт без внесення фосфорних і калійних добрив у фазі сходів містив мінімальний ресурс рухомих фосфатів – 124,2 мг/кг в орному та 104,4 мг/кг підорному шарах, обмінного калію – відповідно 120,1 і 101,4 мг/кг. Внесення фосфорно-калійних добрив у нормі  $P_{60}K_{60}$  додає в орному шарі у фазі сходів відповідно 11,0-15,0 та 11,1-11,5 мг/кг поживних речовин. На цьому фоні фосфатмобілізаційні бактерії (інокулянт Райс Пі) спричинили максимальне підвищення запасу доступних фосфатів у фазі сходів – до 139,1 мг/кг. Найвищі запаси фосфатів на фоні  $P_{60}K_{60}$  зберігалися і до збирання врожаю (132,2 мг/кг), порівняно з варіантами без інокуляції фосфатмобілізаційними бактеріями. Отже інокулянт Райс Пі на фоні  $P_{60}$  сприяв тривалішому підвищенню родючості ґрунту.

3. Система удобрення сої з мінімальною ( $N_{30}$ ) та подвійною нормою ( $N_{60}$ ) азоту у формі сульфату амонію з використанням нітрапірину або інокулянтів

спричинила обмеження накопичення нітратів в орному та, особливо, у підорних горизонтах ґрунту у фазі бутонізації (на 21,1% порівняно з нормою  $N_{30}P_{60}K_{60}$  (сульфат амонію). Застосування на цьому фоні азотфіксувального інокулянта ХайКот Супер Соя спричинює утворення навіть меншого ресурсу нітратів в орному шару ґрунту, порівняно з удобренням  $N_{30}P_{60}K_{60}$  з нітрапірином + підживлення  $N_{30}$  у бутонізацію сої.

4. Подвоєння норми азотного удобрення від  $N_{30}$  до  $N_{60}$  збільшило обсяги емісії закису азоту в атмосферу на 25%. Система удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  з використанням сульфату амонію + N-мобілізаційні бактерії стримувала викиди газоподібного азоту на рівні варіанту  $N_{30}P_{60}K_{60}$  без інокулянта. Отже, підтверджена ефективність удосконаленої системи удобрення сої стосовно збереження якості природного довкілля за використання азотних добрив.

5. Середньорічна температура повітря упродовж 2010-2023 років становила 9,0 проти 8,3°C у період 2010-2015 років, а середня максимальна температура сягнула 22,4°C, що вказує на сталу тенденцію зростання теплових ресурсів Лісостепу Західного в районі Малого Полісся. Із трьох років досліджень другий 2023 рік був найсприятливішим за тепловим ресурсом та зволоженням в період вегетації сої. Хоча травень 2023 та 2024 року був посушливим, проте у червні спостерігали надлишок опадів в обидва роки, що посприяло формування врожаю сої. Липень в усі роки досліджень був вологим, проте 2023 рік відрізнявся істотним перевищенням середньобагаторічної норми на 19 мм. 2022 рік вегетації був найменше сприятливим для продуктивності сої через відносно сухі квітень і травень та надмірно вологій вересень.

6. Тривалість вегетації сої була пов'язана з погодними умовами, які впливали на дію добрив, нітрапірину та інокулянтів. Подвійна норма азоту, а також одинарна із використанням азотних та фосфорних інокулянтів продовжувала вегетацію сої у сприятливі 2023 і 2024 роки. Інгібітор нітрифікації у всіх випадках застосування із сульфатом амонію спричиняв

пришвидшення завершення вегетації сої на 6-7 діб, з амонійною селітрою продовжував вегетацію на 4-5 діб.

7. Контроль інгібітором концентрації нітратів, які гальмують бульбочкоутворення, і заміна амонійної селітри на сульфат амонію не забезпечують такого вагомого результату, як поєднання інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . За такого варіанту маса бульбочок на рослині становила найбільші величини – у бутонізацію 0,49 г, і у квітування 0,82 г. Із внесенням нітрапірину 1,7 л/га перед сівбою на одинарній ( $N_{30}$ ) і подвійній ( $N_{30}$ ) дозі азоту у формі сульфату амонію у фазі квітування маса бульбочок становила 0,69 та 0,72 г, на фоні амонійної селітри ( $N_{30}$ ) без інгібітора утворення бульбочок було найбільше пригніченим (маса бульбочок у фазі квітування 0,39 г на одну рослину).

8. На мінімальному фоні сульфату амонію  $N_{30}+P_{60}K_{60}$  з використанням інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі висота рослин (84,1 см) і закріплення боба (14,5 см) були найвищими, порівняно з іншими варіантами. Така система удобрення у поєднанні з інокуляцією насіння сприяла утворенню найбільшої кількості бобів (16,3 боба), зерен на рослині (34,4 зерна), забезпечило масу 1000 зерен в діапазоні 194,1-193,5-194,9 г, маси зерен з рослини 6,7-6,3-6,9 г.

9. Експресдіагностика асиміляційного апарату польовим приладом N-Tester™ для оцінки стану живлення сої показала, що оптична активність листків була максимальною за системи удобрення, де фон  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (перед сівбою) з обробкою насіння інокулянтами ХайКот Супер Соя та Райс Пі. Внесення нітрапірину за початкової ( $N_{30}$ ) та підвищеної ( $N_{60}$ ) норми азоту у формі сульфату амонію на фоні  $P_{60}K_{60}$  під оранку істотно збільшувало оптичну активність, що свідчить про поліпшення азотного живлення сої. За третього тестування у фазі побуріння бобів оптична активність листків була найвищою, порівняно з фазами квітування та формування бобів, що свідчить про динамічне поліпшення азотного живлення сої аж до формування зерна та підтверджене найвищими балами візуального оцінювання стану посівів.

10. За внесення під оранку  $P_{60}K_{60}$ , перед сівбою  $N_{30}$  (сульфат амонію) з нітрапірином та підживленням  $N_{30}$  у фазі бутонізації урожай зерна сої в середньому за 2022-2024 роки досягнув рівня 3,90 т/га. Такий же врожай забезпечує система удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$  з використанням інокулянта ХайКот Супер Соя без внесення нітрапірину та підживлення. Надвишка за три роки становила 0,35 т/га порівняно з традиційними нормами удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Сумісне використання ХайКот Супер Соя і Райс Пі на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  додало ще 0,05 т/га надвишки, але вона була в межах статистичної похибки ( $HP_{05}$  абсолютна = 0,13-0,16 т/га). За сприятливої весни для дії інгібітора нітрапірину приріст врожаю зерна становив 0,33 т/га, порівняно з традиційною системою удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Амонійна селітра як без інгібітора, так і з нітрапірином зумовлювала менший врожай сої, порівняно із сульфатом амонію у всіх варіантах застосування.

11. Найбільше протеїну у зерні сої утворилося за двох систем удобрення: за внесення мінімальної норми азоту  $N_{30}$  у формі сульфату амонію на фоні  $P_{60}K_{60}$  у поєднанні із застосуванням інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі – 37,9-38,6%. Але максимального показника білковості зерна досягнуто за поєднання азотомобілізуючих та фосформобілізуючих бактерій – 38,6%, що на 2,8% більше аналогічної системи удобрення, тільки без інокулянтів. Високий вміст жирів у зерні сої спричинило застосування фосформобілізаційного інокулянта Райс Пі. Отже, покращення фосфорного живлення сої за допомогою мобілізаторів фосфатів сприяє утворенню жирних сполук у зерні. Оптимізація азотного удобрення сої знижувала олійність зерна, а нітрапірин, покращуючи азотне живлення сої, виразно зменшував нагромадження жиру в зерні. Максимальний збір протеїну – 1,58 т/га, 2023 найсприятливішого року забезпечила система удобрення фон  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$  (сульфат амонію перед сівбою) + N-мобілізуючі + P-мобілізуючі інокулянти, або такий самий, тільки без інокулянта P-мобілізатора.

12. За врожаю (3,90 т/га) система мінерального удобрення  $P_{60}K_{60}$  (під оранку) +  $N_{30}$  (у формі сульфату амонію перед сівбою) із застосуванням азотфіксувального інокулянта насіння ХайКотСупер Соя забезпечила максимальний чистий прибуток від реалізації зерна сої – 51754 грн/га. Лише на 750 грн/га менший і другий у дослідях прибуток забезпечила така ж система удобрення, але з додатковою інокуляцією насіння фосформобілізаційним препаратом Райс Пі.

13. Рентабельність виробництва сої була високою і коливалася в діапазоні від 228% до 293%. Застосування азотних добрив у формі сульфату амонію, збільшення норми азоту вдвічі і внесення нітрапірину зменшувало показник рентабельності на 18-39% відносно традиційної системи удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Проте на такому фоні удобрення використання інокулянта ХайКот Супер Соя забезпечило збільшення рентабельності на 26% до максимуму з-поміж удобрених варіантів – 293%. На цьому ж фоні удобрення окупність додаткових затрат була найбільшою – 8,00 грн/грн і перевищувала традиційний варіант удобрення на 0,37 грн/грн. Поєднання азотфіксувального та фосформобілізаційного інокулянтів (ХайКот Супер Соя + Райс Пі) на фоні  $N_{30}P_{60}K_{60}$  сприяло найвищому коефіцієнту енергетичної ефективності – 3,42.

## **ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ**

1. З метою отримання високого врожаю сої 3,55-3,95 т/га та підвищення віддачі мінеральних добрив на дерновому глейовому легкосуглинковому ґрунті у Малому Поліссі (Лісостеп Західний) рекомендуємо вносити під оранку  $P_{60}K_{60}$ , а перед сівбою сульфат амонію в нормі  $N_{30}$  та застосувати препарати-інокулянти ХайКот Супер Соя та Райс Пі. Ці технологічні прийоми забезпечили максимальну врожайність сої в середньому за 2022-2024 роки 3,95 т/га, максимальну білковість зерна 38,6% та чистий прибуток 51004 грн/га.

2. За потреби застосувати систему роздрібного внесення азотного добрива ( $N_{30}$  перед сівбою +  $N_{30}$  у фазі бутонізації) на бідніших ґрунтах та за відмови від інокулянтів доцільно внести перед сівбою стабілізатор азоту в ґрунт – N-Lock™ (1,7 л/га), що забезпечить наблизений до максимального врожай – 3,90 т/га, але зменшить вимивання нітратів та емісію газоподібного азоту з добрив, максимально послабить тиск ґрунтових нітратів на бульбочкоутворення.

3. У разі господарської необхідності застосувати амонійну селітру замість сульфату амонію як за одинарної норми внесення перед сівбою  $N_{30}$ , так із підживленням  $N_{30}$  у фазі бутонізації нітрат амонію слід поєднувати з внесенням інгібітора нітрифікації, щоб запобігти пригніченню бульбочкоутворення у сої.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаменко Т. І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату. Київ, 2014. В-во ТОВ «РІА»БЛПЦ. 16 с. URL: [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee\\_files/idmp-cee/idmp-agroclimatic.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee_files/idmp-cee/idmp-agroclimatic.pdf)
2. Андрушко М. О. Формування продуктивності гороху залежно від елементів системи удобрення. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. Львів-Оброшине. 2019. Вип. 66. С. 8-20. DOI: <http://phzt-journal.isgkr.com.ua/ua-66/1.pdf>
3. Андрущенко Г. О. Ґрунти західних областей УРСР. Львів-Дубляни, 1970. 184 с.
4. Бабич А. О., Бабич-Побережна А. А Стратегічна роль сої в розв'язанні глобальної продовольчої проблеми. *Корми і кормовиробництво*. 2011а. Вип. 69. С. 11-19.
5. Бабич А. О., Бабич-Побережна А. А. Селекція, виробництво, торгівля і використання сої в світі. Київ. Аграрні науки. 2011б. 548 с.
6. Бабич А. О., Венедіктов О. М. Моделі технології вирощування сої, їх економічна ефективність та конкурентоспроможність. *Корми і кормовиробництво*. 2006. Вип. 56. С. 22–29.
7. Бахмат М. І., Бахмат О. М. Розробка технологічних заходів для отримання екологічного зерна сої в умовах Західного Лісостепу. *Корми і кормовиробництво*. Київ, 2001. Вип. 47. С.105-106.
8. Бахмат О. М. Соя – культура майбутнього, особливості формування високого врожаю: монографія. Кам'янець-Подільський : ПП Мошак М. І. 2009. 208 с.
9. 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.

10. Вишнівський П. С., Фурман О. В. Продуктивність сої залежно від елементів технології вирощування в умовах Правобережного Лісостепу України. *Рослинництво та ґрунтознавство*. 2020. № 1. С. 13–22.  
doi.org/10.31548/agr2020.01.013
11. Впровадження Нітратної директиви в Україні. Новини. 17 Липня 2020.  
URL: [https://menr.gov.ua/news/35591.html?fbclid=IwAR1WcstOugFHeoyIRfk9o\\_Vi4z4weytSrjdqFswMIJ1TpbO8cbvG\\_YMzkto](https://menr.gov.ua/news/35591.html?fbclid=IwAR1WcstOugFHeoyIRfk9o_Vi4z4weytSrjdqFswMIJ1TpbO8cbvG_YMzkto)
12. Гадзовський Г. Л., Новицька Н. В., Мартинов О. М. Урожай і якість зерна сої під впливом інокуляції та позакореневого підживлення. *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 111. С. 44-48.  
doi.org/10.32851/2226-0099.2020.111.5.
13. Глупак З. І. Урожайність і якість сої сортів ранньостиглої групи в умовах північно-східної частини Лісостепу України. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія»*. 2016. Вип. 11 (26). С. 100–103.
14. Гнатів П. С. Функціональна діагностика в дендроекології : наукова монографія. Львів: В-во Камула, 2014. 336 с.
15. Гнатів П. С., Лагуш Н. І., Шестак В. Г. Зміни клімату в Україні і фіторізноманіття агрокультур. ПРОБЛЕМИ УНИКНЕННЯ ВТРАТ БІОРИЗНОМАНІТТЯ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ. *Матеріали міжн. наук. конф., присвяченої 100-річчю від дня народження професора Костянтина Малиновського (14-15 травня 2020 р.)*. Львів. С. 78-80.
16. Гнатів П. С., Литвин О. Ф., Іванюк В. Я., Лагуш Н. І., Шестак В. Г., Коцюба Б. І. Створення й апробація програмного забезпечення статистичного моделювання вірогідності результатів агрономічних експериментів. *Вісник ЛНАУ. Агрономія*, 2022, 26: 157-162. Doi.org/10.31734/agronomy2022.26.157
17. Голобородько С. П., Іутинська Г. О., Титова Л. В., Дубинська О. Д. Продуктивність сортів сої за інокуляції насіння бульбочковими й ендofітними бактеріями в умовах зрошення Півдня України. *Меліорація і*

*водне господарство*. 2020. № 1. С. 122–130.

[doi.org/10.31073/mivg202001-221](https://doi.org/10.31073/mivg202001-221).

18. 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.
19. Господаренко Г. М. Історія розвитку вчення про симбіотичну фіксацію азоту атмосфери. Симбіотична азотфіксація та врожай : за заг. ред. Г. М. Господаренка. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2024. С. 13–40.
20. 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.
21. Господаренко Г. М. Ефективність різних форм, строків і способів внесення мінеральних добрив та інгібіторів нітрифікації під буряк цукровий. Агрохімічна складова технології вирощування буряку цукрового / За заг. ред. Г. М. Господаренка. Київ : ТОВ «СІК ГРУПІ УКРАЇНА», 2020. С. 139–188.
22. Господаренко Г. М., Єщенко Н. Б. Окупність мінеральних добрив урожаєм сої на чорноземі опідзоленому правобережного Лісостепу. Зб. наук. праць УНУС. 2012. Вип. 81. Ч. 1. Агрономія. С. 8–14.
23. Господаренко Г. М., Прокопчук І. В. Трансформація кислотно-основних властивостей ґрунту за тривалого застосування добрив у польовій сівозміні. *Вісник Уманського НУС*. 2014. №1. С. 8–12.
24. Ґрунти Львівської області : колективна монографія / за ред. С. П. Позняка. Львів, ЛНУ імені Івана Франка, 2019. 424 с.
25. Дегодюк Е. Г., Дегодюк С. Е., Гуральчук С. З. Трансформація біосферних функцій педосфери у процесах кругообігу біогенних елементів в антропогенно порушених фітоценозах. *Живлення рослин: теорія і практика*. Київ: Логос, 2005. С. 14-43.

26. Димитров В. Г. Формування продуктивності сої залежно від біологічних особливостей та оптимізації елементів технології вирощування в умовах Лісостепу України : дис. ... канд. с.- г. наук: 06.01.09. Біла Церква, 2018. 61 с.
27. Дідора В. Г., Деробон І. Ю., Саврасих Л. Д. Технологічні показники якості сої залежно від інокуляції та удобрення в умовах Українського Полісся. Вісник ЖНАЕУ. 2017. № 1 (58), т. 1. С. 57–63.
28. Дослідна справа в агрономії: навч. посібник: у 2 кн. Кн. 1. Теоретичні аспекти дослідної справи / А. О. Рожков, В. К. Пузік, С. М. Каленська та ін.; за ред. А. О. Рожкова. Х.: Майдан, 2016. 316 с.
29. ДСТУ 8066:2015 Корми для сільськогосподарських тварин. Методи визначення енергоємності і поживності [Чинний від 2017-01-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2018. 11 с.
30. ДСТУ 4138-2002 Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]. К.: Держстандарт України, 2003. 173 с.
31. ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначання органічної речовини. [Чинний від 2005-07-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2005. 14 с.
32. ДСТУ 4729:2007. Якість ґрунту; Визначання нітратного і амонійного азоту в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського. Вид. офіц. [Чинний від 2008-01-01]. К. : Держспоживстандарт України, 2008. 9 с.
33. ДСТУ 7863:2015 Якість ґрунту. Визначення легкогідролізного азоту методом Корнфільда [Чинний від 2016-07-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 5 с.
34. ДСТУ ISO 10390:2007. Якість ґрунту. Визначення рН (ISO 10390:2005, IDT). [Чинний від 2009-10-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2012. 8 с.
35. 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
36. Єщенко В. О. та ін. Основи наукових досліджень в агрономії: за ред. В. О. Єщенка. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2014. 332 с.

37. Іванюк С. В. Формування сортових ресурсів сої відповідно до біокліматичного потенціалу регіону вирощування. *Корми і кормовиробництво*. 2012а. Вип. 71. С. 34–40.
38. Іванюк С. В., Вільгота М. В., Жаркова О. Ю. Вплив гідротермічних умов на формування продуктивності сої в умовах Лісостепу України. *Корми і кормовиробництво*. 2016. Вип. 82. С. 21–28.
39. Іванюк С. В., Темченко І. В., Семцов А. В. Тривалість вегетаційного періоду сої – основа формування сортових ресурсів регіону. *Корми і кормовиробництво*. 2012б. Вип. 73. С. 67–71.
40. Камінський В. Ф., Мосьондз Н. П. Формування продуктивності сої залежно від агротехнічних заходів в умовах Північного Лісостепу України. *Корми і кормовиробництво*. 2010. № 67. С. 45–50.
41. Кириченко В.В., Костромітін В.М., Красиловець Ю.Г. та ін. Зміни клімату і насіннєва продуктивність польових культур в умовах східної частини Лісостепу. *Агротехнологія польових культур*. Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва. Харків. 2009. С. 6-21.
42. 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
43. Козючко А. Г., Гавій В. М., Кучменко О. Б. Фотосинтетична продуктивність сої сорту Аннушка залежно від передпосівної обробки насіння метаболічно активними речовинами. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол.*, 2021, Т. 81, № 4 С. 81-90. doi: 10.25128/2078-2357.21.4.11.
44. Компанія Dow Chemical. 2012. Оцінка безпеки продукту: Нітрапірін. 6 стор. [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_08c1/0901b803808c186f.pdf](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08c1/0901b803808c186f.pdf)
45. Коцюба Б. І. Вплив азотних добрив, нітрапірину та інокулянтів на зернову продуктивність сої у Малому Поліссі. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. Вип.

46. Коцюба Б. І. Урожайність сої за різних систем азотного удобрення, застосування нітрапірину та інокулянтів насіння. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького. Серія: Сільськогосподарські науки*, 2024, т 26, № 101. 194-204. doi: 10.32718/nvlvet-a10131.
47. Коцюба Б. І. Чинники й закономірності формування зернової продуктивності сої на дерновому глейовому ґрунті Малого Полісся. *Агронаука і практика*.
48. Коцюба Б. І., Гнатів П. С., Іванюк В. Я. Зміна кислотності ґрунту під впливом систем удобрення сої, застосування стабілізатора нітратів та азотного інокулянта. *Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Актуальні проблеми агропромислового виробництва України: стратегії стійкості сільськогосподарського сектору під час війни та у післявоєнний період» (19 листоп. 2024 р.)*. Львів-Оброшине, 2024. (161 с.) С. 53-55
49. Коцюба Б. І., Станкевич А. П. Вплив інокулянтів Хай Кот Супер Соя та Райс Пі на формування продуктивності сої у Малому Поліссі на Заході України. *«Мікробіологія в сучасному сільськогосподарському виробництві»*. *Матеріали XVII Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції молодих вчених*, 28 серпня 2024 року, м. Чернігів. 2024. С. 62-64.
50. Кошевський І. І., Ляска С. І. Вплив інокуляції сої біологічними препаратами на розвиток грибних хвороб. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Біологія, біотехнологія, екологія*. 2014. Вип. 204. С. 127-132.  
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau\\_biol\\_2014\\_204\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_biol_2014_204_20).
51. Лихочвор В. В. Біологічне рослинництво. Львів : Українські технології, 2004. 312 с.
52. Лихочвор В. В., Петриченко В. Ф. Мінеральні добрива та їх застосування. 2-ге вид., доп. і випр. Львів: Українські технології, 2012. 324 с.
53. 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.
54. 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/>
  55. Логінова І. В., Городній М. М., Грицак І. П. Агрохімічна оцінка ролі інгібітора нітрифікації 3(5)-метилпіразолу в підвищенні ефективності азотних добрив. *Наукові доповіді НУБіП*. 2010. 6 (22). URL:  
<https://nd.nubip.edu.ua/2010-6/10livnfe.pdf>
  56. Лысенко В. С., Вардуни Т. В., Сойер В. Г., Краснов В. П. Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4 (часть 1). С. 112-120. (Електронний ресурс). Режим доступу :  
[www.rae.ru/fs/?section=content&op=show\\_article&article\\_id](http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id)
  57. 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
  58. 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.
  59. Львівська область: природні умови та ресурси: монографія / за заг. ред. д-ра геогр. наук, проф. М. М. Назарука. Львів: Видавництво Старого Лева, 2018. 592 с.
  60. Медведовський О. К., Іваненко П. І. Енергетичний аналіз інтенсивних технологій в сільському господарстві. К.: Урожай, 1988. 223 с.
  61. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення : керівний нормативний документ / За

- ред. Яцука І. П., Балюка С. А. 2-ге вид., допов. Київ, 2019. 108 с.
62. Михайлов Н. Минеральные удобрения и урожай. Зерновое хозяйство. 1972. 3: 26-29.
  63. Мікробні препарати в сучасних аграрних технологіях (науково-практичні рекомендації) / За ред. В. В. Волкогона. Київ, 2015. 248 с.
  64. 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](http://nbuv.gov.ua/UJRN/agr_2015_1_22)
  65. Мінімальна і максимальна добові температури, атмосферний тиск, кількість опадів 2022, 2023, 2024 років по метеопосту Львів. Метеопост. URL:  
<https://meteopost.com/weather/archive/>
  66. Моргун В. Н., Должинов С. В., Знак Н. Ю. Использование замедленной флуоресценции хлорофила для оценки фотосинтетической продуктивности и устойчивости растений. *Матер. съезда физиологов растений*. Ч. 2. 1992. С. 141.
  67. Мохаммед Ю. А., Дженсен Т., Хесер Дж., Чен Ч. 2013. Інгібітори, спосіб і час застосування азоту для покращення виробництва озимої пшениці в центральній частині Монтани. In Proceedings of the Western Nutrient Management Conference, Reno, NV.
  68. Навчально-краєзнавчий атлас Львівської області / Кравчук Я. С., Брусак В. П., Дикий І. В. та ін. Львів: ЛДУ-ДУ “Львівська політехніка” ВНТЛ, 1999. 25 с.
  69. Павленко В. Візьміть втрати азоту під контроль. Зелені сторінки. Дюпон Україна, 2018. №2. URL: [https://agromage.com/stat\\_id.php?id=991](https://agromage.com/stat_id.php?id=991)
  70. Петриченко В. Ф., Бабич А. О., Колісник С. І., Іванюк С. В. Соя: технологічні аспекти вирощування на насіння. *Насінництво*. 2008. № 66. С. 5–9.
  71. Петриченко В. Ф., Лихочвор В. В. Рослинництво. Нові технології вирощування польових культур : підручник. 5-те вид., виправ., доповн.

- Львів : Українські технології, 2020. 806 с.
72. Погромська Я. А. Вміст нітратів у ґрунті під зерно-просапною сівозміною залежно від способу його обробітку та метеорологічних факторів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2018. 87: 100-106. URL: <http://agrochemsoilsci.org/87/Full.pdf>
  73. Поліщук І. С., Поліщук М. І., Мазур О. В., Юрченко Н. А. Польова схожість насіння сортів сої залежно від строків сівби за температурним режимом ґрунту. *Сільське господарство та лісівництво*. 2018. № 11. С. 36–43. [doi.org/10.37128/2707-5826-2018](https://doi.org/10.37128/2707-5826-2018)
  74. Поліщук І. С., Поліщук М. І., Юрченко Н. А. Тривалість періоду вегетації та між фазних періодів сортів сої залежно від строків сівби та норм висіву насіння. *Сільське господарство та лісівництво*. 2019. № 4(15). С. 64–71. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2019-3-4-6>
  75. Постнікова Г. В. Аналіз господарської діяльності сільськогосподарських підприємств. Київ: Вища шк., 1987. 320 с.
  76. Разумов В. А. Справочник лаборанта-химика по анализу кормов. Россельхозиздат, 1986. С. 94–244.
  77. Розрахунки витрат і прибутку по вирощуванню сої в 2024. Агроексперт-Трейд. 2024. URR: <https://agroexp.com.ua/uk/zatratyi-i-pribyil-po-vyiraschivaniyu-soi>
  78. Симбіотична азотфіксація та врожай : за заг. ред. Г. М. Господаренка. Київ : ТОВ «ТРОПЕА», 2024. 416 с.
  79. Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) / В. В. Кириченко, С. С. Рябуха, Л. Н. Кобизєва, О. О. Посиляєва, 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>
  80. Статистика погоди. Кліматичні дані за роками та місяцями по метеостанції Львів. 2022-2024 роки. Метеопост. URL:

<https://meteopost.com/weather/climate/> та

<https://meteopost.com/weather/climate/year/>

81. Тараріко Ю. О., Несмашна О. Ю., Бердніков О. М. та ін., Біоенергетична оцінка сільського виробництва (науково-методична забезпечення). Київ: Аграрна наука, 2005. 200 с.
82. Ткаченко Л. Ю., Рудавська Н. М., Тимчишин О. Ф., Коник Г. С., Стасів О. О. Вплив елементів технології вирощування на продуктивність сої. Передгірне і гірське землеробство і тваринництво. 2024. Вип. 75 (2). С. 138-146. DOI: 10.32636/01308521.2024-(75)-2-12.
83. Токмакова Л. М., Трепач А. О., Пищур І. М. Мікробіологічна трансформація фосфору в кореневій зоні рослин соняшнику за дії *Bacillus sp.* 2473 та різного ступеня удобрення культури. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2023. Вип. 38. С. 40–50. doi.org/10.35868/1997-3004.38.40-50
84. Федорук І. В. Вплив інокуляції насіння на врожай сої. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. Херсон, 2019. № 108. С. 110.
85. 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
86. Фергюсон Р. Б., Ларк Р. М. і Слейтер Г. П. 2003. Підходи до визначення зони управління для використання інгібіторів нітрифікації. *Журнал ґрунтознавчого товариства Америки* 67(3): 937–47.
87. Фукс Б., Баумгартнер Н. Застосування стабілізаторів азотних добрив. *Журнал “Агроном”*. 2020. URL: <https://www.agronom.com.ua/zastosuvannya-stabilizatoriv-azotnyh-dobryv/>
88. Фурдига М. Фосфор як основа вдалого старту! Agritema. 2024. [https://agritema.com/fosfor-yak-osnova-vdalogo-startu/?srsltid=AfmBOoqQCudMALMl40\\_5\\_8aYcC8e5lvUUcfmQ6yjOeiJQbIcA8QguZeo](https://agritema.com/fosfor-yak-osnova-vdalogo-startu/?srsltid=AfmBOoqQCudMALMl40_5_8aYcC8e5lvUUcfmQ6yjOeiJQbIcA8QguZeo)

89. Фурман О. В. Тривалість вегетаційного періоду та фаз росту і розвитку рослин сої залежно від технологічних заходів вирощування. *Таврійський науковий вісник*. 2019. № 109. С. 148–154.  
<https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.109-1.23>
90. Чинчик О. С. Тривалість вегетаційного періоду та фаз росту і розвитку рослин сої залежно від сортових особливостей та удобрення. *Корми і кормовиробництво*. 2016. Вип. 82. С. 133–137.
91. Шевніков М. Я., Коблай О. О. Застосування біологічних, хімічних та фізичних засобів у технологіях вирощування сої та кукурудзи : монографія. Полтава : ФОП Крюков Ю. Ф., 2015а. 228с.
92. Шевніков М. Я., Лотиш І. І., Галич О. П. Особливості розвитку сої залежно від строків сівби в умовах Лівобережного Лісостепу України. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2015б. № 4. С. 14–17.
93. Шестак В. Г. Вплив інгібітора нітрифікації N-Лок Макс при внесенні під ячмінь озимий на викиди закису азоту в атмосферу. *XI Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «Актуальні проблеми агропромислового виробництва України: продовольча безпека в умовах воєнного часу і повоєнної відбудови країни»*, 10 листопада 2022 р. (ІСГ Карпатського регіону НААН (с. Оброшине).
94. Шестак В. Г. Значення фосфорно-калійних добрив для дії азоту та нітрапірину при вирощуванні ячменю озимого в Західному Лісостепу. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2022. Вип. 72(1): 105-134. doi: 10.32636/01308521.2022-(72)-1-8.
95. Шувар І. А. Агроекологічні основи високоефективного вирощування польових культур у сівозмінах біологічного землеробства: рекомендації. Львів: Українські технології. 2003. 36 с.
96. Шувар І. А., Гриник С. І. Вплив комплексного застосування обробітку та удобрення на структурний склад ґрунту і врожайність пшениці ярої в умовах

- Передкарпаття. *Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства НААН»*. 2019. С. 70–76.
97. A review of the recent scientific literature documenting the impact of 4R management on N<sub>2</sub>O emissions relevant to a Canadian context. Prepared for Fertilizer Canada. Prepared by: David Burton. Department of Plant, Food, and Environmental Sciences. Dalhousie University and Land Resource Consulting Services, March, 2018. URL: <https://fertilizercanada.ca/wp-content/uploads/2018/08/NERP-Science-Review-Paper-.pdf>.
  98. Alori E. T., Glick B. R., Babalola O. O. 2017. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*. V. 8. P. 9–17. doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971
  99. Ameen F., Sami A. AlYahya, Saleh AlNadhari, Hadi Alasmari, Fahad Alhoshani & Milton Wainwright. 2019. Phosphate solubilizing bacteria and fungi in desert soils: species, limitations and mechanisms. *Agronomy and Soil Science*. V. 65, 2019. P. 1446-1459. doi.org/10.1080/03650340.2019.1566713
  100. 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.
  101. Bai H., Purcell L. C. 2019. Evaluation of Soybean Greenness from Ground and Aerial Platforms and the Association with Leaf Nitrogen Concentration in Response to Drought. *Crop Physiology & Metabolism*. doi.org/10.2135/cropsci2019.03.0159
  102. Baig Kh. S., Arshad M., Shaharoona B., Khalid A. & Ahmed I. 2012. Comparative effectiveness of *Bacillus spp.* possessing either dual or single growth-promoting traits for improving phosphorus uptake, growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Annals of Microbiology*. V. 62, p. 1109–1119.
  103. Baliuk S., Vorotyntseva L., Zakharova M., Drozd O., Nosonenko O. 2017. Protection and reproduction of resource potential of soils in conditions of climate fluctuations. *Bull. of Agric. Sci.* 95/12. doi.org: 10.31073/agrovisnyk201712-02.

104. Barbosa H., Olsson L. 2019. Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. Geneva: IPCC. <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
105. Barker D. W., Sawyer J. E.. 2005. Nitrogen Application to Soybean at Early Reproductive Development. *Agron. J.* V. 97. 2005. P. 615-619.  
[doi.org/10.2134/agronj2005.0615](https://doi.org/10.2134/agronj2005.0615).
106. 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](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.06.012)
107. Ben Zineb A., Trabelsi D., Ayachi I., Barhoumi F., Aroca R., Mhamdi R. 2020. Inoculation with elite strains of phosphate-solubilizing bacteria enhances the effectiveness of fertilization with rock phosphates. *Geomicrobiol J.* 37:22–30.  
<https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1658826>
108. Board J. E. 2013. Preface in A Comprehensive Survey of International Soybean Research-Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships (Ed. Board, J.E.). InTech, Rijeka, Croatia.
109. Board J. E., Kahlon C. S. 2011. Soybean yield formation: What controls it and how it can be improved. In Soybean Physiology and Biochemistry (Ed. El-Shemy), InTech, Rijeka, Croatia, 1–36.
110. Bobrecka-Jamro, D.; Jarecki, W.; Buczek, J. 2018. Response of soya bean to different nitrogen fertilization levels. *J. Elem.* 23, 559–568. DOI: [10.5601/jelem.2017.22.3.1435](https://doi.org/10.5601/jelem.2017.22.3.1435)
111. Boroomandan P, Khoramivafa M, Haghi Y, Ebrahimi A. 2009. The effects of nitrogen starter fertilizer and plant density on yield, yield components and oil and protein content of soybean. *Pak J Biol Sci.* 12(4): 378–382.
112. Bouwman A. F. 1996. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46, 53-70.

113. Bouwman A. F. 1998. Nitrogen oxides and tropical agriculture. *Nature*, 392: 866-867.
114. Bouwman A. F., Boumans L. J. M., Batjes N. H., Thomson A. J., Giannopoulos G., Pretty J., Baggs E. M., Richardson D. J. 2012. Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. *Philos Trans R Soc B*, 367, pp. 1157-1168.
115. Bouwman A. F., Bouwman L. J. M., Batjes N. H. 2002. Emissions of N<sub>2</sub>O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochem Cycles*, 16(4), 1058. doi: 10.1029/2001GB001811.
116. 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.
117. Burton D. L., Li X., Grant C. A. 2008. Influence of fertilizer nitrogen source and management practice on N<sub>2</sub>O emissions from two Black Chernozemic soils. *Can J Soil Sci*, 88: 219-227.
118. Butterbach-Bahl K., Baggs E. M., Dannenmann M., Kiese R., Zechmeister-Boltenstern S. 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philos. Trans. R. Soc. B.*, 368, Article 20130122. doi.org/10.1098/rstb.2013.0122
119. Chakwizira E., Dawson A. E. and Stafford A. 2020. Yara N-tester chlorophyll meter calibration: a prequel. *Agronomy New Zealand*. 50:15-24.  
<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20220222800>
120. Chen H., Yin C., Fan X., Ye M., Peng H., Li T., Zhao Y., Wakelin S. A., Chu G., Liang Y. 2019. Reduction of N<sub>2</sub>O emission by biochar and/or 3, 4-dimethylpyrazole phosphate. (DMPP) is closely linked to soil ammonia oxidizing bacteria and nosZI-N<sub>2</sub>O reducer populations. *Sci.Total Environ.*, 694: 133658. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133658.

121. Climate change 2013: the physical science basis. By T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. M. B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2013). p. 1535.
122. Climate Change and Land. 2020. An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for Policymakers. 2020. Intergovernmental Panel on Climate Change. 36 p. URL: <https://climatechange.insightconferences.com/>.
123. Climate report shows the largest annual drop in EU greenhouse gas emissions for decades. An official website of the European Union. 5 November 2024. [https://commission.europa.eu/news/climate-report-shows-largest-annual-drop-eu-greenhouse-gas-emissions-decades-2024-11-05\\_en](https://commission.europa.eu/news/climate-report-shows-largest-annual-drop-eu-greenhouse-gas-emissions-decades-2024-11-05_en)
124. Cooper R. L. 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields, *Field Crop Res.* 82, 27–35.
125. De Borja R. A. F., Rosso M. L., Purcell L. C., Naeve S., Casteel S. N., Kovács P., Archontoulis S., Davidson D. and Ciampitti I. A. 2021. Environmental factors associated with nitrogen fixation prediction in soybean. *Frontiers in Plant science* 12: 675410. doi:10.3389/fpls.2021.675410.
126. Degenhardt R. F., Juras L. T., Smith, L. R. A., MacRae A.W., Ashigh, J., McGregor W. R. 2016. Application of Nitrpyrin 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.
127. 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

128. 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.
129. Dhillon J., Torres G., Driver E., Figueiredo B., Raun W. R. 2017. World phosphorus use efficiency in cereal crops. *Agron J* 109:1670–1677.  
doi.org/10.2134/agronj2016.08.0483
130. Di H. J., Cameron K. C. 2012. How does the application of different nitrification inhibitors affect nitrous oxide emissions and nitrate leaching from cow urine in grazed pastures? *Soil Use Manag*, 28:54–61.  
doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00373.x.
131. 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.
132. Din M., Nelofer R., Salman M., Khan F. H., Khan A., Ahmad M., Khan M. 2019. Виробництво *Azotobacter*, що фіксує азот (SR-4) і *Aspergillus niger*, що розчиняє фосфор, і їх оцінка на *Lagenaria siceraria* та *Abelmoschus esculentus*. *Biotechnol Rep.* 22:e00323. doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00323
133. Dittert, K., Bol, R., King, R., Chadwick, D., Hatch, D., 2001. Use of a novel nitrification inhibitor to reduce nitrous oxide emission from <sup>15</sup>N-labelled dairy slurry injected into soil. *Rapid Comm. Mass Spectrom.* 15, 1291-1296.
134. Dong S. K., Gong Z. P., Zu W. 2006. Effects of nitrogen nutrition levels on N-accumulation and yields of soybean. *Plant Nutr Fert Sci.* 2010; 16 (1): 65–70.
135. Engel R. E., Towey B. D., Gravens E. 2015. Degradation of the urease inhibitor NBPT as affected by soil pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 79: 1674–1683.  
doi.org/10.2136/sssaj2015.05.0169.
136. Erisman J., Sutton M., Galloway J., Klimont Z., Winiwarter W. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nat. Geosci.*, 1: 636–639.  
doi.org/10.1038/ngeo325.

137. Espín, S., García-Fernández, A. Nitrapyrin. In Encyclopedia of Toxicology, 3rd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014; pp. 519–522.
138. Fageria N. K., Baligar V. C., Clark R. B. Physiology of crop production. New York: Food Products Press; 2006.
139. 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.
140. FAO (2019) World fertilizer trends and outlook to 2022. Available from <http://www.fao.org/3/ca6746en/CA6746EN.pdf>. Accessed 3 December 2019.
141. 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/ta>  
<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
142. FAOSTAT crop production .2016.  
<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>.
143. 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>
144. Fowler D., Coyle M. & Skiba U. et al. 2013. The global nitrogen cycle in the twenty first century. *Philos. Trans. R. Soc. B.*, 368, Article 20130164.  
[doi.org/10.1098/rstb.2013.0164](https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0164)
145. 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](https://doi.org/10.1007/s00374-017-1249-2) .
146. Fu Q., Abadie M., Blaud A., Carswell A., Misselbrook T., Clark I. M., and Penny R. 2020. Effects of urease and nitrification inhibitors on soil N, nitrifier

- abundance and activity in a sandy loam soil. *Biology and Fertility of Soils*, 56(2): 185–194. doi: 10.1007/s00374-019-01411-5.
147. 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
  148. 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
  149. Galloway J. N., Dentener F. J., Capone D. G., Boyer E. W., Howarth R. W., Seitzinger S. P., Asner G. P., Cleveland C. C., Green P. A., Holland E. A., Karl D. M., Michaels A. F., Porter J. H., Townsend A. R., Vöosmarty C. J. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70: 153–226. doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0.
  150. Gentile, R., Vanlauwe, B., Chivenge, P., Six, J. 2008. Interactive effects from combining fertilizer and organic residue inputs on nitrogen transformations. *Soil Biology and Biochemistry*. 40:2375–2384. doi:10.1016/j.soilbio.2008.05.018.
  151. 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
  152. 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
  153. Gordon A. J., Skøt L., James C. L. and Minchin F. R. 2002. Short-term metabolic response of soybean root nodules to nitrate. *J. Exp. Bot.* 53, 423–428. doi: 10.1093/jexbot/53.368.423
  154. 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.
155. Gubry-Rangin C., Nicol G. W., Prosser J. I. 2010. Archaea rather than bacteria control nitrification in two agricultural acidic soils. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 74: 566–574. pmid: 21039653.
  156. 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
  157. Heatherly L. G.. 2022. Soybean Leaf Greenness and Nitrogen. Mississippi Soybean Promotion Board.  
<https://mssoy.org/articles/soybean-leaf-greenness-and-nitrogen>.
  158. 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/>. Accessed 26 August 2012.
  159. Hnativ P. S., Haskevych O. V., Kotsuba B. I., Ivaniyk V. Y. Influence of climate trends on the effect of nitrogen fertilizers, nitrapyrin and inoculates in soybean growing in Male Polissya. *Ukrainian Journal of Veterinary and Agricultural Sciences*, 2024, Vol. X, N X. P. XXX-XXX. doi: 10.xxxx. xxxxxx
  160. Hoyos-Villegas V., Houx J. H., Singh S. K., Fritschi F. B. 2014. Ground-Based Digital Imaging as a Tool to Assess Soybean Growth and Yield. *Crop Science*, 2014. doi.org/10.2135/cropsci2013.08.0540
  161. Hungria M., Mendes I. C. 2015. Nitrogen Fixation with Soybean: Perfect Symbiosis? In *Biological Nitrogen Fixation*, V. 2 (Ed. De Bruijn FJ.), John Wiley & Sons, Inc., p. 1009–1023.
  162. Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A., Kopriva S. 2017. The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition-Current Knowledge and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*. 2017. V. 8. P. 1–16. doi.org/10.12691/wjar7-2-5

163. Jamal A., Fazli I.S., Ahmad S., Abdin M. Z., Yun, S. J. 2005. Effect of sulphur and nitrogen application on growth characteristics, seed and oil yields of soybean cultivars. *Korean J. Crop Sci.* 2005, 50, 340–345.
164. Jareck, W., Bobrecka-Jamro D. 2015. Effect of fertilization with nitrogen and seed inoculation with nitragina on seed quality of soya bean (*Glycine max* (L) Merrill). *Acta Sci. Pol. Agric.* 2015, 14, 51–59
165. Jeffery D. R., Larry G. H, Felix B. F. 2006. Influence of large amount of nitrogen on nonirrigated and irrigated soybean. *Crop Sci.* 2006; 46(1): 52–60.
166. Kahraman A. 2017. Nutritional value and foliar fertilization in soybean. *J. Elem.* 2017, 22, 55–66. DOI: 10.5601/jelem.2016.21.1.1106
167. 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
168. 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.
169. Koester R. P., Nohl B. M., Diers B. W., Ainsworth E. A. 2016. Has photosynthetic capacity increased with 80 years of soybean breeding? An examination of historical soybean cultivars. *Plant, Cell & Environment* (2016) 39, 1058–10. doi.org/10.1111/pce.12675
170. Korobko A. 2021. Dynamics of soybean production in Ukraine and the world. *Agricultural and Food Sciences.* 2021. C. 125-134. DOI:10.33730/2310-4678.4.2021.253098
171. Kotsiuba B., Hnativ P., Ivaniuk V. 2024. Influence of nitrogen fertilizers, nitrapyrin, and inoculants on soybean yield formation in the Male Polissia region on gleyed soddy loam soil. *Теорія і практика розвитку*

- агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXV Міжнародного науково-практичного форуму, 02–04 жовтня 2024 року. ЛНУП. [Електронний ресурс]. 2024. С. 212-216.*  
<https://repository.lnup.edu.ua/jspui/handle/123456789/1859>
172. Kotsiuba B. I., Hnativ P. S., Ivaniuk V. Ya. Ecologization of soybean cultivation technology on derno-gleyozem soil of the Male Polissya. *Матеріали IX-го Міжнародного з'їзду екологів*. 26.09.2024. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2024/schedConf/presentations>.
  173. Kryzanowski L. 2018a. Nitrogen Fertilizer Management to Mitigate N<sub>2</sub>O Emissions in Alberta. PowerPoint Presentation provided by Len Kryzanowski. Jan 17, 2018.
  174. Kryzanowski L. Wallace T., Montgomery G., Sprout C., Lohstraeter G., Powers L., WagnerRiddle C. 2018b. Manure Management to Reduce Greenhouse Gas and Ammonia Emissions. PowerPoint Presentation provided by Len Kryzanowski. Jan 17, 2018.
  175. Kulig B., Klimek-Kopyra A., Ślizowska A., Oleksy A., Skowera B., Lepiarczyk A., Grygierzec W. 2024. A comparison of the methods used to assess the nutritional status of selected crop species. *Journal of water and land development*. 2024, No. 63 (X-XII): 1–10. DOI: 10.24425/jwld.2024.151784
  176. Kumar S., Wani J. A., Lone B. A., Fayaz A., Singh P., Qayoom S., Dar Z. A., Ahmed N. 2017. Effect of phosphorus and sulphur on nutrient and amino acids content of soybean (*Glycine max* L. Merrill) under 'Alfisols'. *J. Exp. Agric. Int.* 2017, 16, 1–7.
  177. Lancashire P. D., Bleiholder H., Van den Boom T., Langelüddeke P., Strauss R., Weber E., Witzemberger A. 1991. A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Ann. Appl. Biol.* 1991. 119: 561–601.  
[https://www.researchgate.net/profile/Hermann-Bleiholder/publication/229530290\\_A\\_uniform\\_decimal\\_code\\_for\\_growth\\_stages\\_of\\_crops\\_and\\_weeds/links/5e8](https://www.researchgate.net/profile/Hermann-Bleiholder/publication/229530290_A_uniform_decimal_code_for_growth_stages_of_crops_and_weeds/links/5e8)

- efe064585150839cae154/A-uniform-decimal-code-for-growth-stages-of-crops-and-weeds.pdf .
178. Latifnia E., Eisvand H. R. 2022. Soybean Physiological Properties and Grain Quality Responses to Nutrients, and Predicting Nutrient Deficiency Using Chlorophyll Fluorescence. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2022. V. 22, p. 1942–1954. doi.org/10.1007/s42729-022-00785-0
  179. 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.
  180. Li Y., Chapman S. J., Nicol G. W., Yao H. 2018. Nitrification and nitrifiers in acidic soils. *Soil Biol. Biochem.*, 116: 290–301.
  181. Lin, M. H., Gresshoff, P. M., Ferguson, B. J. 2012. Systemic Regulation of Soybean Nodulation by Acidic Growth Conditions. *Plant Physiol*. V.160. I.4. P. 2028-2039. DOI:10.1104/pp.112.204149
  182. Lindström K., Mousavi S. A. 2019. Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Microb Biotechnol*. 13(5): 1314–1335. doi: 10.1111/1751-7915.13517
  183. Linzmeier W., Gutser R., Schmidhalter U. 2001a. Nitrous oxide emission from soil and from a nitrogen-15-labelled fertilizer with the new nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate DMPP. *Biol. Fert. Soil*. 34: 103-108.
  184. Linzmeier W., Gutser R., Schmidhalter U. 2001b. The new nitrification inhibitor DMPP ENTEC® allows increased N-efficiency with simplified fertilizing strategies, in: Horst et al. (Eds.), *Proceedings of the 14th. Int. Plant Nutrition Colloquium*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Pp. 760-761.
  185. Litvak Sh. I. *Systematic approach to agrochemical research*. M.: Agropormizdat, 1990. 220 p.
  186. Liu X., Vitousek P., Chang Y., Zhang W., Matson P., Zhang F. 2016. Evidence for a historic change occurring in China. *Environ. Sci. Technol.*, 50: 505–506. doi.org/10.1021/acs.est.5b05972.

187. Lorenc-Kozik A. M., Pisulewska E. 2003. Effect of increasing levels of nitrogen fertilizer and microelements on seed yield of selected soybean cultivars. *Rośliny Oleiste-Oilseed Crops*. 2003, 24, 131–142.
188. Lošák T., Ševčík M., Plchová R., von Bennewitz E., Hlušek J., Elbl J., Buňka F., Polášek Z., Antonkiewicz J., Varga L. et al. 2018. Nitrogen and sulphur fertilisation affecting soybean seed spermidine content. *J. Elem.* 23, 581–588. DOI: 10.5601/jelem.2017.22.3.1516
189. Martins M. R., Sant'Anna S. A. C., Zaman M., Santos R. C., Monteiro R. C., Alves B. J. R., Jantalia C. P., Boddey R. M., Urquiaga S. 2017. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: impact on N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions, fertilizer-N-15 recovery and maize yield in a tropical soil. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 247: 54–62. doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.021.
190. 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.
191. Mohammad W., Iqbal, M. M., Shah S. M., Nawaz H., Basar N. 1998. Evaluation of nitrification inhibitor to improve fertilizer N use efficiency in potato crop. *Trop. Agric.*, 75: 21-24.
192. Mørkved P. T., Dörsch P., Bakken L. R. 2007. The N<sub>2</sub>O product ratio of nitrification and its dependence on long-term changes in soil pH. *Soil Biol. Biochem.*, 39: 2048-2057.
193. 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
194. Mueller N. D., Lassaletta L., Runck B. C., Billen G., Garnier J., Gerber J. S. 2017. Declining spatial efficiency of global cropland nitrogen allocation. *Global Biogeochem. Cycles*, 31: 245–257. doi.org/10.1002/2016gb005515.

195. Nag P., Shriti S., Das S. 2020. Microbiological strategies for enhancing biological nitrogen fixation in nonlegumes Get access Arrow. Journal of Applied Microbiology. V. 129. I. 2. 2020, P. 186–198. doi.org/10.1111/jam.14557
196. Nitrogen Stabilizer Products that Must Be Registered under FIFRA. Substances excluded from the definition of a nitrogen stabilizer. U.S. Environmental Protection Agency. URL:  
<https://www.epa.gov/pesticide-registration/nitrogen-stabilizer-products-must-be-registered-under-fifra#substances>.
197. 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.
198. 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>
199. Ohyama T., Minagawa R., Ishikawa S., Yamamoto M., Hung N. V. P., Ohtake N., Sueyoshi K., Sato T., Nagumo Y., Takahashi Y. 2013. Soybean seed production and nitrogen nutrition. In A Comprehensive Survey of International Soybean Research-Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships (Ed. Board J.E.). InTech, Rijeka, Croatia 115–157.
200. 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.
201. 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

202. Ono Y., Fukasawa M., Sueyoshi K., Ohtake N., Sato T., Tanabata S., Toyota R., Higuchi K., Saito A., Ohshima 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.
203. Orr C. H., James A., Leifert C., Cooper J. M., Cummings St. P. 2011. Diversity and Activity of Free-Living Nitrogen-Fixing Bacteria and Total Bacteria in Organic and Conventionally Managed Soils. *Appl Environ Microbiol.* 2011. 77(3):911-9. doi: 10.1128/AEM.01250-10.
204. Ortuzar-Iragorri M. A., Aizpurua A., Castellón A., Alonso A., Estavillo J. M., Besga G. 2018. Use of an N-tester chlorophyll meter to tune a late third nitrogen application to wheat under humid Mediterranean conditions. *Journal of Plant Nutrition.* 41: 627-635. doi.org/10.1080/01904167.2017.1414243
205. Osborne S. L., Riedell W. E. 2006. Starter nitrogen fertilizer impact on soybean yield and quality in the Northern Great Plains. *Agron J.* 2006; 98(6): 1569-1574.
206. 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.
207. Pannecoucq J., Goormachtigh S., Ceusters N., Bode S., Boeckx P., Roldan-Ruiz I. 2022. Soybean response and profitability upon inoculation and nitrogen fertilisation in Belgium. *European Journal of Agronomy.* V. 132, January 2022, 126390. doi.org/10.1016/j.eja.2021.126390
208. Pasda G., Hähndel R., Zerulla W. 2001. Effect of fertilizers with the new nitrification inhibitor DMPP 3,4-dimethylpyrazole phosphate on yield and quality of agricultural and horticultural crops. *Biol. Fert. Soil.* 34: 85-97.
209. Peters J. B. Speth P. E. Kelling K. A. and Borges R. 2004. Effect of soil pH on soybean yield. 5 p.

- <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=e118afe835231961ee7f2f90eb73c86d59316524>
210. Pfab H., Palmer I., Guegger F., Fielder S., Torsten M., Ruster R. 2012. Influence of a nitrification inhibitor and of placed N-fertilization on N<sub>2</sub>O fluxes from a vegetable cropped loamy soil. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 150: 91-101.
  211. 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.
  212. 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
  213. Randall G. W., Vetsch J. A., Huffman J. R. 2003. Nitrate Losses in Subsurface Drainage from a Corn–Soybean Rotation as Affected by Time of Nitrogen Application and Use of Nitrapyrin. *Journal of Environmental Quality*. V. 32. I. 5. P. 1764-1772. doi.org/10.2134/jeq2003.1764
  214. Ravishankara A. R., Daniel J. S., Portmann R. W. 2009. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326: 123-125.
  215. Roche L., Forrester P., Lanigan G., Richards K., Shaw L., Wall D. 2016. Impact of fertiliser nitrogen formulation, and N stabilisers on nitrous oxide emissions in spring barley. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 233: 229–237.
  216. Roco M. M., Blu, R. O., 2006. Evaluation of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate in two Chilean soils. *J. Plant Nutr.*, 29: 521-534.
  217. Roelandt C., van Wesemael B., Rousevell M. 2005. Estimating annual N<sub>2</sub>O emissions from agricultural soils in temperate climates. *Global Change Biol.*, 11: 1701-1711.

218. Rogovska N. P., Blackmer A. M., Mallarino A. P. 2007. Relationships between Soybean Yield, Soil pH, and Soil Carbonate Concentration. *Soil Science Society of America Journal*. 71(4). DOI:10.2136/sssaj2006.0235
219. Rotundo J. L., Miller-Garvin J. E. and Naeve S. L. 2016. Regional and temporal variation in soybean seed protein and oil across the United States. *Crop Science*. 56(2):797–808. doi: 10.2135/cropsci2015.06.0394.
220. Rotundo J. L., Westgate M. E. 2009. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crops Res.* 2009; 110(2): 147–156.
221. 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
222. Saito A., Tanabata S., Tanabata T., Tajima S., Ueno M., Ishikawa S., Ohtake N., Sueyoshi K., Ohshima T. 2014. Effect of nitrate on nodule and root growth of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Int. J. Mol. Sci.* 15, 4464–4480.
223. 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.
224. Sanz-Cobena A., Sanchez-Martin L., Garcia-Torres L., Vallejo A. 2012. Gaseous emissions of N<sub>2</sub>O and NO and NO<sub>3</sub>-leaching from urea applied with urease and nitrification inhibitors to a maize crop. *Agric. Ecosys. Environ.*, 149: 64-73.
225. Schlemmer M., Gitelson A., Schepers J., Ferguson R., Peng Y., Shanahan J., Rundquist D. 2013. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. V. 25, December 2013, P. 47-54. doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003
226. Setiyono T. D., Weiss A., Specht J., Bastidas A. M., Cassman K. G., Dobermann A. 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength

- on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*. V. 100, I. 2–3, P. 257–271. doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.011
227. 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.
  228. Shestak V., Hnativ P., Ivaniuk V., Olifir Y., Szulc W., Rutkowska B., Veba 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.
  229. Shi X., Hu H., He J., Chen D., Suter H.C. 2016a. Effects of 3, 4-dimethylpyrazole phosphate. (DMPP) on nitrification and the abundance and community composition of soil ammonia oxidizers in three land uses. *Biol. Fertil. Soils*, 52: 927–939. doi.org/10.1007/s00374-016-1131-7.
  230. Shi X., Hu H., Müller C., He J., Chen D., Suter HC. 2016b. Effects of the nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on nitrification and nitrifiers in two contrasting agricultural soils. *Appl. Environ. Microbiol.*, 82: 5236–5248. doi.org/10.1128/aem.01031-16.
  231. 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.
  232. Sincik M, Goksoy A. T., Turan Z. M. 2009. Soybean seed yield performances under different cultural practices. *Turk J Agric For.* 2009; 33: 111–118. doi.org/10.3906/tar-0807-26.
  233. Sohrabi Y., Habibi A., Mohammadi K., Sohrabi M., Heidari G., Gholamreza H., Shiva K., Masoumeh K. 2012. Effect of nitrogen (N) fertilizer and foliar-applied iron (Fe) fertilizer at various reproductive stages on yield, yield component and chemical composition of soybean (*Glycine max* L. Merr.) seed. *Afr. J. Biotechnol.* 2012, 11, 9599–9605.

234. 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](https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acsomega.3c00823?ref=article_openPDF)
235. Soumare A., Diedhiou A. G., Thuita M., Hafidi M. 2020. Exploiting Biological Nitrogen Fixation: A Route Towards a Sustainable Agriculture. *Plants (Basel)*. 2020. 9(8):1011. doi:10.3390/plants9081011
236. Souza E. F., Soratto R. P., Sandaña P., Venterea R. T., Rosen C. J. 2020. Split application of stabilized ammonium nitrate improved potato yield and nitrogen-use efficiency with reduced application rate in tropical sandy soils. *Field Crop Res.*, 254: 107847. doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107847.
237. State of the Climate 2024 Update for COP29. World Meteorological Organization: Weather, Climate, Water. Publication 11 November 2024.  
<https://wmo.int/publication-series/state-of-climate-2024-update-cop29>
238. Subbarao G. V., Yoshihashi T., Worthington M., Nakahara K., Ando Y., Sahrawat K. L., Rao I. M., Lata J. C., Kishii M., Braun H. J. 2015. Suppression of soil nitrification by plants. *Plant Sci.*, 233: 155-164.
239. Suganuma T., Fujikake H., Aida H., Ohtake N., Sueyoshi K., Ohyama T. 2001. Comparison of the growth and nitrogen fixation activity of the hypernodulation soybean mutant NOD1-3 and its parent cv. Williams in field cultivation. *Bull. Facul. Agric. Niigata Univ.* 53, 123–132.
240. Sun W., Shahrajabian M. H., Cheng Q. I. 2021. Nitrogen Fixation and Diazotrophs – A Review. *Rom Biotechnol Lett.* 2021; 26(4): 2834-2845. DOI: 10.25083/rbl/26.4/2834-2845
241. Suryantini and Kuntastyuti, H. 2015. Effect of nitrogen fertilization on soybean production under two cropping patterns. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences* 3(3): 316-323. doi.org/10.18006/2015.3(3).316.323

242. Sutton M. A., Howard C .M., Erisman J. W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., Grizzetti B. 2011. The European nitrogen assessment: sources, effects and policy perspectives. Cambridge University, New York.
243. Światowa produkcja soi według kraju. 2024. 3.10.2024. URL:  
<https://www.atlasbig.com/pl/kraje-wedlug-produkcji-soi>.
244. Szostak B., Głowacka A., Kasiczak A., Kiełtyka-Dadasiewicz A., Bąkowski M. 2020. Nutritional value of soybeans and the yield of protein and fat depending on a cultivar and the level of nitrogen application. *J. Elem.* 2020, 25: 45–57. DOI:10.5601/jelem.2019.24.2.1769
245. Tago K., Ishii S. & Senoo K. 2011. Phylogenetic and functional diversity of denitrifying bacteria isolated from various rice paddy and rice-soybean rotation fields. *Microbes and Environments*. 2011. Corpus ID: 25842333. DOI:10.1264/JSME2.ME10167
246. Tamagno S., Sadras V. O., Haegerle 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.
247. Tewari K., Nagumo Y., Takahashi Y., Sueyoshi K., Ohtake N., Ohyama T. 2011. A new technology of slow release nitrogen fertilizers for promotion of soybean growth and seed yield. Nova Science Publishers, Inc., New York, NY. 1–64.
248. Tewari K., Sato T., Abiko M., Ohtake N., Sueyoshi K., Takahashi Y., Magumo Y., Tutida T., Ohyama T. 2007. Analysis of the nitrogen nutrition of soybean plants with deep placement of coated urea and lime nitrogen. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53, 772–781
249. Tewari K., Suganuma T., Fujikake H., Ohtake N., Sueyoshi K., Takahashi Y., Ohyama T. 2004. Effect of deep placement of N fertilizers and different inoculation methods of Bradyrhizobia on growth, N<sub>2</sub> fixation activity and N absorption rate of field-grown soybean plants. *J. Agron. Crop Sci.* 190, 46–58.

250. Ti C., Yan X. 2020. Nitrogen regulation in China's agricultural systems. In: Liu X., Du E. (ed). *Atmospheric Reactive Nitrogen in China*, Springer, Singapore, pp. 297–309.
251. Tong D., Xu R. 2012. Effects of urea and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  on nitrification and acidification of Ultisols from Southern China. *J. Environ. Sci.*, 24: 682–689. doi.org/10.1016/s1001-0742(11)60832-2.
252. Vadez V., Sinclair T. R. and Serraj R. 2000. Asparagine and ureide accumulation in nodules and shoots as feedback inhibitors of  $\text{N}_2$  fixation in soybean. *Physiol. Plant* 110, 215–223. doi: 10.1034/j.1399-3054.2000.110211.x
253. Valdes C., Gillespie J. & Dohlman E. 2023. Soybean production, marketing costs, and export competitiveness in Brazil and the United States (Report No. EIB-262). U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. doi.org/10.32747/2023.8142532.ers
254. Vilas M. P., Verburg K., Thorburn P. J., Probert M. E., Bonnett G. D. 2019. A framework for analysing nitrification inhibition: a case study on 3, 4-dimethylpyrazole phosphate. (DMPP). *Sci. Total. Environ.*, 672: 846–854. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.462.
255. Vollmann J., Walter H., Sato T., Schweiger P. 2011. Digital image analysis and chlorophyll metering for phenotyping the effects of nodulation in soybean. *Computers and Electronics in Agriculture*. V. 75, I. 1, 2011, P. 190-195. doi.org/10.1016/j.compag.2010.11.003
256. 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.
257. Wansik Sh., Rashedu I., Abitha B. et al. 2016. Role of Diazotrophic Bacteria in Biological Nitrogen Fixation and Plant Growth Improvement. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*. V. 49. I. 1. P. 17-29. doi.org/10.7745/KJSSF.2016.49.1.017

258. 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>.
259. Yamashita N., Tanabata S., Ohtake N., Sueyoshi K., Sato T., Higuchi K. 2019. Effects of Different Chemical Forms of Nitrogen on the Quick and Reversible Inhibition of Soybean Nodule Growth and Nitrogen Fixation Activity. *Plant Sci.* 2019. Sec. *Plant Pathogen Interactions*. V. 10 – 2019.  
doi.org/10.3389/fpls.2019.00131
260. Yao Zh., Yan G., Zheng X., Wang R., Liu C., Butterbach-Bahl K. 2017. Reducing N<sub>2</sub>O and NO emissions while sustaining crop productivity in a Chinese vegetable-cereal double cropping system. *Environ. Pollut.*, 231: 929-941.
261. Yashima H., Fujikake H., Sato T., Ohtake N., Sueyoshi K. and Ohyama T. 2003. Systemic and local effects of long-term application of nitrate on nodule growth and N<sub>2</sub> fixation in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Soil Sci. Plant Nutr.* 49, 825–834. doi: 10.1080/00380768.2003.10410344
262. Yashima H., Fujikake H., Yamazaki A., Ito S., Sato T., Tewari K. et al. 2005. Long-term effect of nitrate application from lower part of roots on nodulation and N<sub>2</sub> fixation in upper part of roots of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) in two-layered pot experiment. *Soil Sci. Plant Nutr.* 51, 981–990. doi: 10.1111/j.1747-0765.2005.tb00137.x
263. Yazdani M., Bahmanyar M. A., Pirdashti H., Esmaili M. A. 2009. Effect of Phosphate Solubilization Microorganisms (PSM) and Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) on yield and yield components of Corn (*Zea mays* L.). *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009. V. 49. P. 90–93.

- <https://typeset.io/papers/effect-of-phosphate-solubilization-microorganisms-psm-and-uvvzmjrn4g>
264. Yoshiki, M., Sachie, H., Toshihide, M. & Motoki, K. (2013). Soybean as a Nitrogen Supplier. In Books. A Comprehensive Survey of International Soybean Research – Genetics, Physiology, Agronomy and Nitrogen Relationships. DOI: 10.5772/51017
  265. Yu C., Huang X., Chen H., Godfray H. C. J., Wright J. S., Hall J. W., Gong P., Ni S., Qiao S., Huang G., Xiao Y., Zhang J., Feng Z., Ju X., Ciais P., Stenseth N. C., Hessen D. O., Sun Z., Yu L., Cai W., Fu H., Huang X., Zhang C., Liu H., Taylor J. 2019. Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*, 567: 516–520. doi.org/10.1038/s41586-019-1001-1.
  266. Zacherl B., Amberger A. 1990. Effect of the nitrification inhibitors dicyandiamide, nitrapyrin and thiourea on *Nitrosomonas europaea*. *Fertil. Res.*, 22: 37–44.
  267. Zainab A., Morteza S.D., Amir A. M. 2014. Effect of different levels of nitrogen fertilizer on morphological traits and yield of soybean cultivar. *Adv. Environ. Biol.*, 8, 334–337.
  268. Zaman M., Nguyen M. L., Blennerhassett J. D., Quin B. F. 2008. Reducing NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and NO<sub>3</sub>-N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. *Biol. Fertil. Soils*, 44: 693–705. doi.org/10.1007/s00374-007-0252-4.
  269. Zebarth B. J., Rochette P., Burton D. L., Price M. 2008b. Effect of fertilizer nitrogen management on N<sub>2</sub>O emissions in commercial corn fields. *Can. J. Soil Sci.*, 88: 189-195.
  270. Zebarth B. J., Rochette P., D. L. Burton. 2008a. N<sub>2</sub>O emissions from spring barley production as influenced by fertilizer nitrogen rate. *Can. J. Soil Sci.*, 88: 197-205.
  271. Zhang M. Y., Wang W. J., Tang L., Heenan M., Xu Z. H. 2018. Effects of nitrification inhibitor and herbicides on nitrification, nitrite and nitrate

- consumptions and nitrous oxide emission in an Australian sugarcane soil. *Biol. Fertil. Soils*, 54: 697–706. doi.org/10.1007/s00374-018-1293-6.
272. Zhang S., Zheng Q., Noll L., Hu Y., Wanek W. 2019. Environmental effects on soil microbial nitrogen use efficiency are controlled by allocation of organic nitrogen to microbial growth and regulate gross N mineralization. *Soil Biol. Biochem.*, 135: 304–315. doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.019.
273. 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.
274. Zhang X., Huang G., Bian X., Zhao Q. 2013. Effects of root interaction and nitrogen fertilization on the chlorophyll content, root activity, photosynthetic characteristics of intercropped soybean and microbial quantity in the rhizosphere. *Plant Soil Environ.* 2013: 59(2): 80–88.
275. 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.

## Додатки

## Додаток А

### Рисунки до розділу 2



Рис. А.1. Вигляд дослідного поля 2022 року, відведеного для трирічних досліджень

## Додаток Б

## Таблиці до розділу 3

Таблиця Б.1 – Кореляція врожаю зерна сої 2023 року, із вмістом доступного азоту в ґрунті та його кислотністю,  $r_{\pm}$ 

Показник	Доза N кг/га	Урожай т/га	Нітрати в орному шарі		Nгідр. в орному шарі		pHсол.				
			у фазі бутонізації ,		у фазі бутонізації ,		Фаза бутонізації ,			Збирання	
			мг/кг	при збиранні, мг/кг	мг/кг	при збиранні, мг/кг	0-20 см	20-40 см	40-60 см	0-20 см	20-40 см
Урожай, т/га	0,74	X									
Нітрати у фазі бутонізації , мг/кг	0,93	0,76	X								
Нітрати при збиранні, мг/кг	0,66	0,27	0,78	X							
Nгідр. у фазі бутонізації , мг/кг	0,99	0,79	0,94	0,68	X						
Nгідр. при збиранні, мг/кг	0,91	0,83	0,93	0,69	0,96	X					
Фаза бутонізації , pH - 0-20 см	0,00	-0,16	-0,32	-0,58	-0,10	-0,30	X				
Фаза бутонізації , pH - 20-40 см	-0,20	-0,16	-0,53	-0,72	-0,24	-0,35	0,87	X			
Фаза бутонізації , pH - 40-60 см	-0,19	-0,07	-0,45	-0,60	-0,23	-0,39	0,69	0,81	X		

Збирання, рН - 0-20 см	0,17	-0,24	-0,17	-0,16	0,12	-0,05	0,7 9	0,76	0,49	X	
Збирання, рН - 20-40 см	-0,23	-0,72	-0,42	-0,02	-0,27	-0,33	0,3 8	0,39	0,05	0,74	X
Збирання, рН - 40-60 см	-0,60	-0,70	-0,78	-0,48	-0,59	-0,58	0,4 1	0,65	0,36	0,61	0,81

## **Додаток В**

### **Рисунки і таблиці до розділу 4**

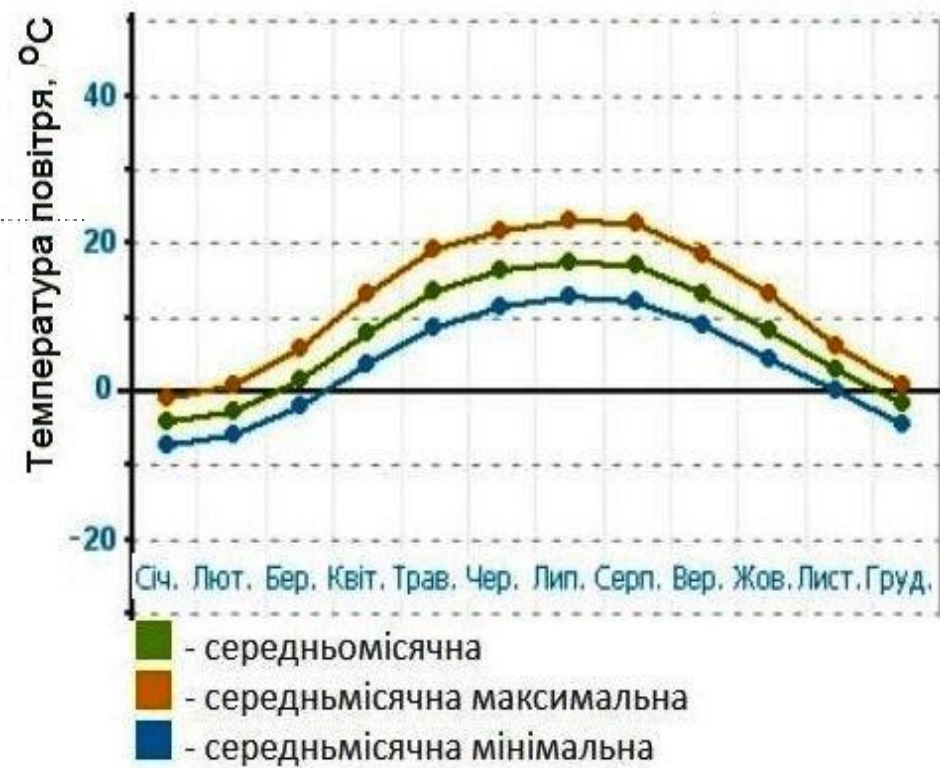




Рис. В.1. Середньобогаторічні кліматичні норми середньомісячної температури повітря ( $^{\circ}\text{C}$ ) та місячної суми опадів (мм) за спостереженнями метеостанції Львів [80]

Середня Т, °С

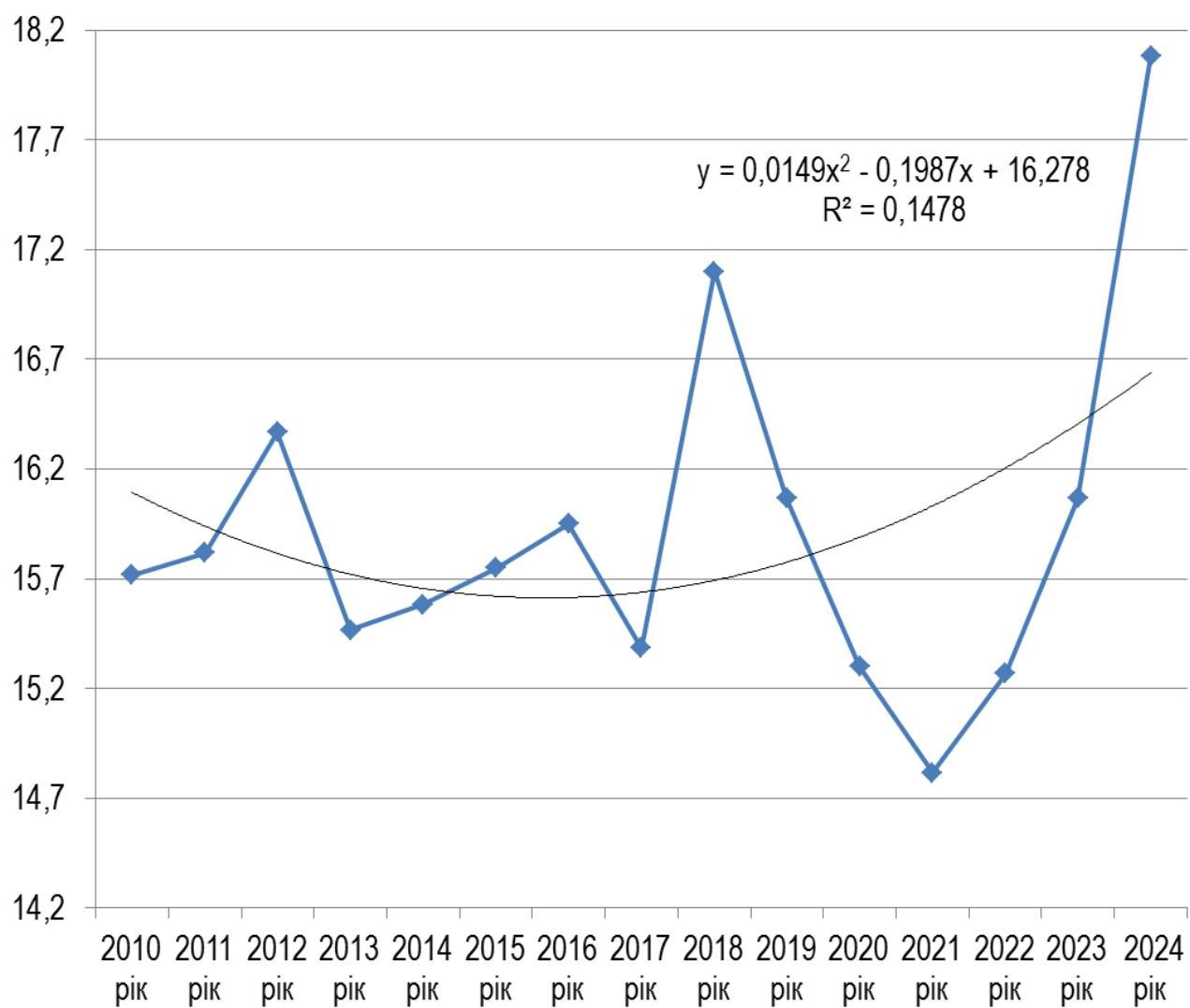


Рис. В.2. Середньомісячні температури упродовж з квітня до вересня включно за період 2010-2024 років за спостереженнями метеостанції Львів [80].

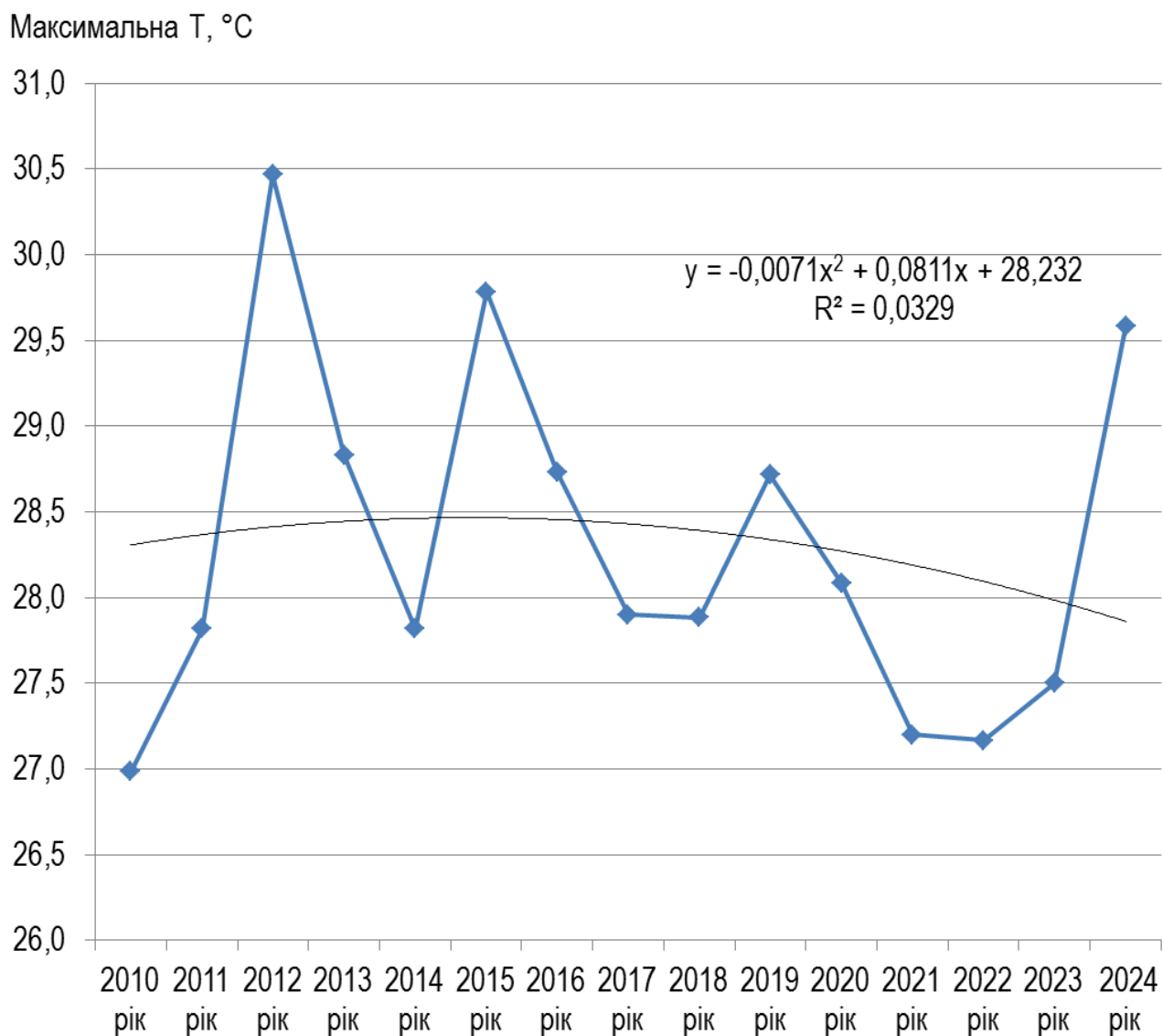


Рис. В.3. Середньомісячні максимальні температури температури упродовж з квітня до вересня включно за період 2010-2024 років за спостереженнями метеостанції Львів [80].

Мінімальна Т, °С

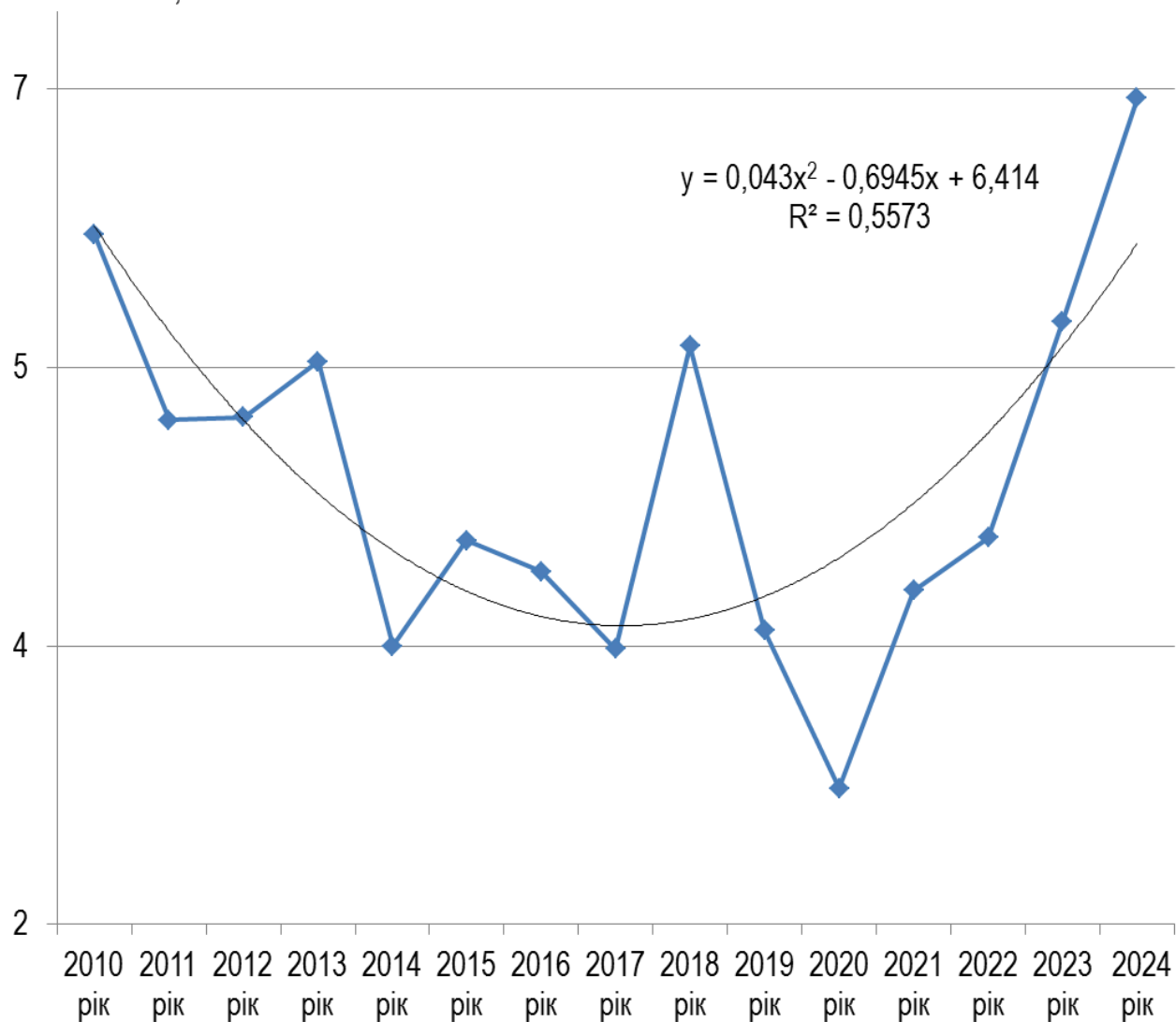


Рис. В.4. Середньомісячні мінімальні температури температури упродовж з квітня до вересня включно за період 2010-2024 років за спостереженнями метеостанції Львів [80].

Опади, мм

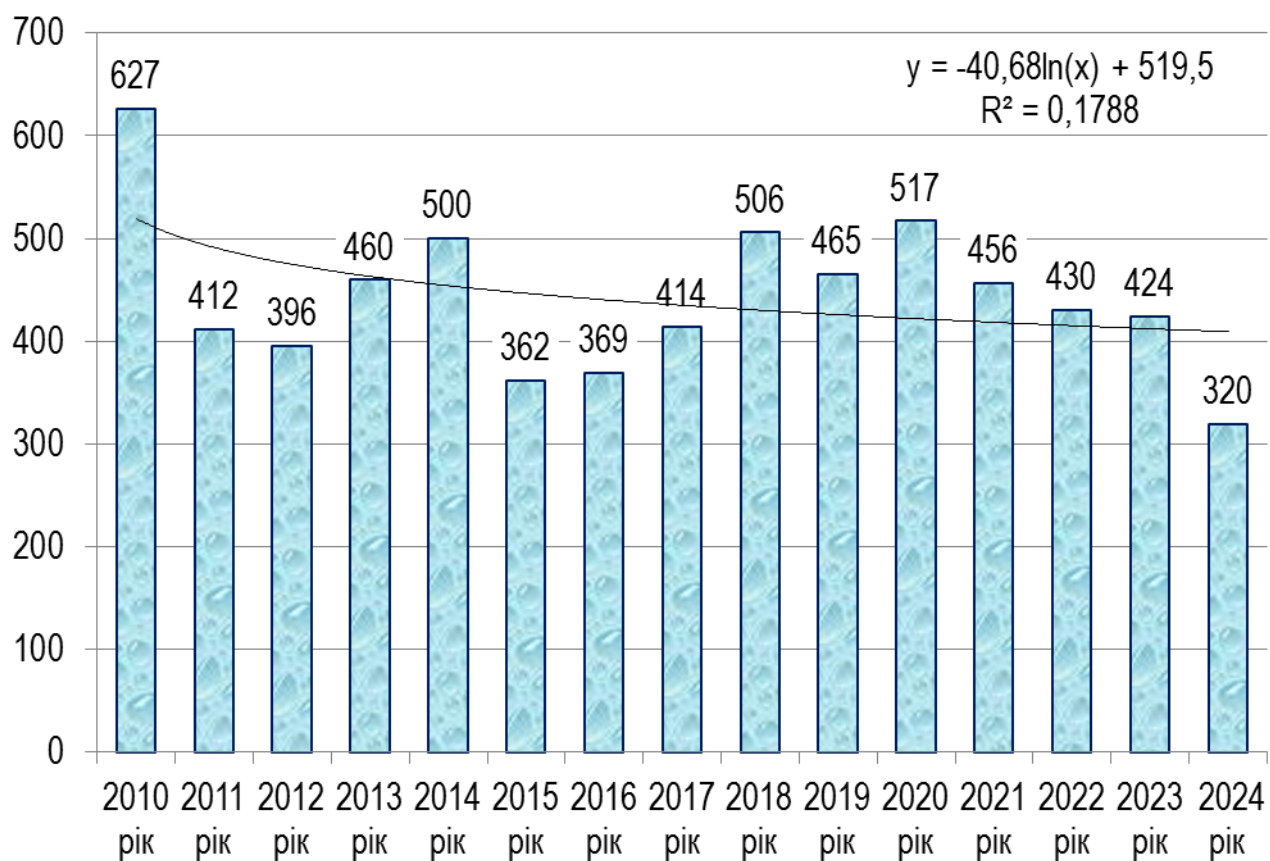


Рис. В.5. Опади упродовж квітня до вересня включно за період 2010-2024 років за спостереженнями метеостанції Львів [80].

Табл. В.1 – Статистика погоди у роки досліджень  
за даними метеостанції Львів [80]

Місяць	Температура, °C			Середня швидкість вітру, м/с	Опади, мм	Максимальна глибина снігу, см
	Середня	Максимальна	Мінімальна			
1	2	3	4	5	6	7
2022 рік						
Січень	-0,8	9,4°	-17,2	4,1	66	14
Лютий	2,1	9,8	-7,6	3,7	26	11
Березень	4,3	18,3	-7,9	2,4	16	-
Квітень	6,3	18,7	-3,7	2,7	<b>69</b>	-
Травень	14,1	27,3	0,8	2,3	<b>21</b>	-
Червень	19,4	33,0	6,8	2,1	<b>44</b>	-
Липень	19,5	32,7	8,0	2,2	94	-
Серпень	<b>20,0</b>	30,0	10,2	1,3	68	-
Вересень	12,3	21,3	2,4	1,9	136	-
Жовтень	10,8	26,2	0,1	2,3	16	-
Листопад	0,3	2,7	-1,4	1,8	0	-
Грудень	0,3	10,9	-10,4	2,6	0	-
Середнє/сума	<b>9,1</b>	<b>21,0</b>	<b>-1,7</b>	-	<b>553</b>	-
2023 рік						
Січень	1,9	14,7	-3,6	2,6	49	5
Лютий	0,0	8,5	-13,8	3,3	64	14
Березень	4,6	17,6	-6,6	3,1	68	5
Квітень	7,8	19,8	-2,0	2,3	<b>49</b>	9
Травень	14,0	24,2	3,2	2,3	<b>24</b>	-
Червень	17,0	29,2	5,6	1,9	<b>108</b>	-
Липень	19,6	30,7	8,0	1,8	120	-
Серпень	<b>20,9</b>	32,9	9,1	1,8	65	-
Вересень	17,1	28,2	7,6	1,5	59	-
Жовтень	11,1	22,5	-1,7	2,6	66	-
Листопад	3,8	15,4	-9,4	3,0	70	11
Грудень	1,3	11,0	-10,6	3,3	71	25
Середнє/сума	<b>9,9</b>	<b>21,2</b>	<b>-1,2</b>	-	<b>810</b>	-

Продовження табл. В.1.

1	2	3	4	5	6	7
2024 рік						
Січень	-1,2	7,3	-20,3	3,4	75	11

Лютий	5,6	16,9	-5,8	3,4	50	1
Березень	5,7	22,6	-5,4	2,7	79	1
Квітень	11,2	25,0	-0,9	2,6	<b>53</b>	-
Травень	15,7	27,6	0,5	2,2	<b>8</b>	-
Червень	19,4	31,0	8,1	2,1	<b>96</b>	-
Липень	21,4	33,8	9,5	1,9	76	-
Серпень	<b>20,8</b>	31,2	10,0	1,5	74	-
Вересень	20,0	28,9	11,5	2,0	14	-
Середнє/сума	<b>13,2</b>	<b>24,9</b>	<b>0,8</b>	-	<b>525</b>	-

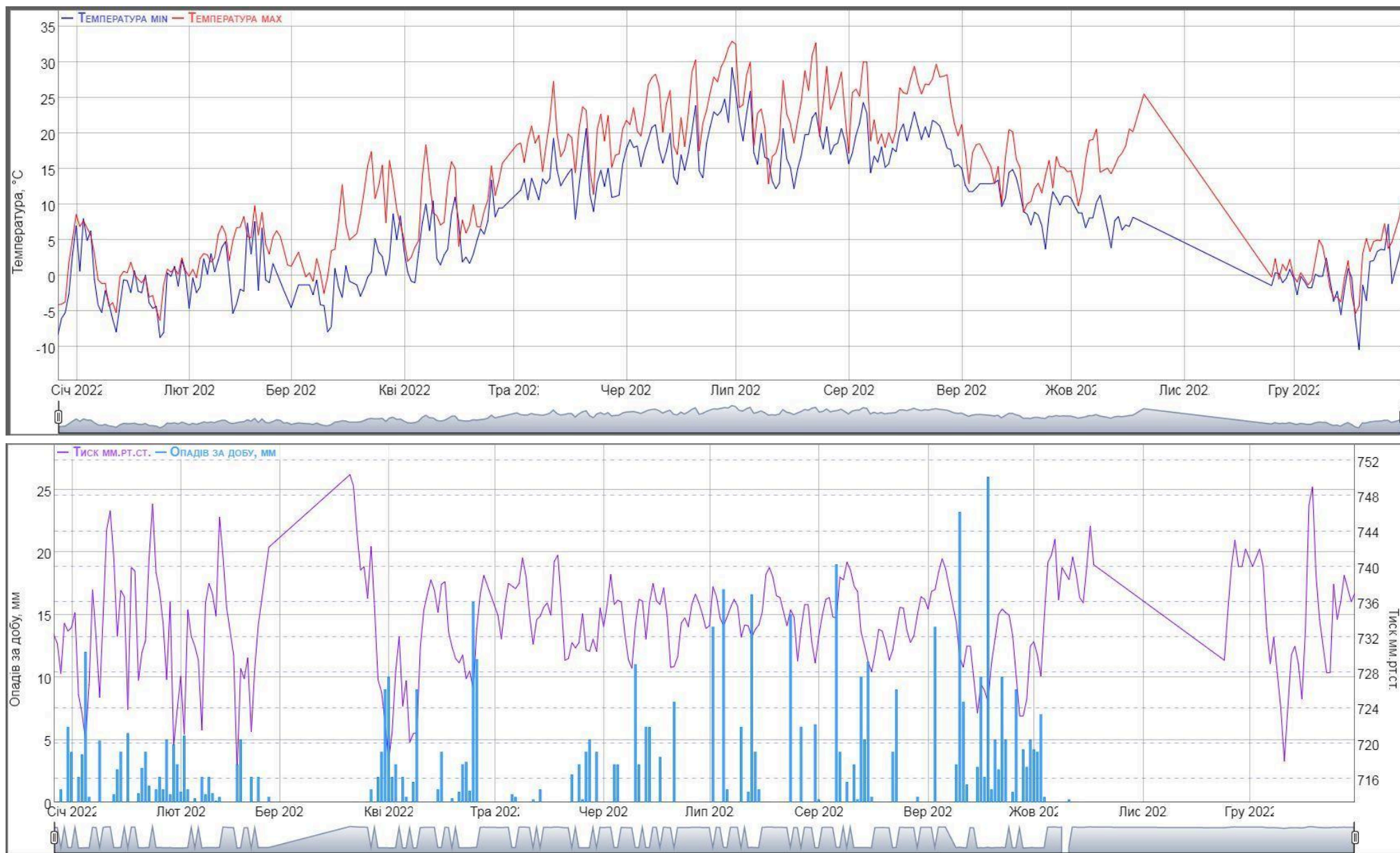
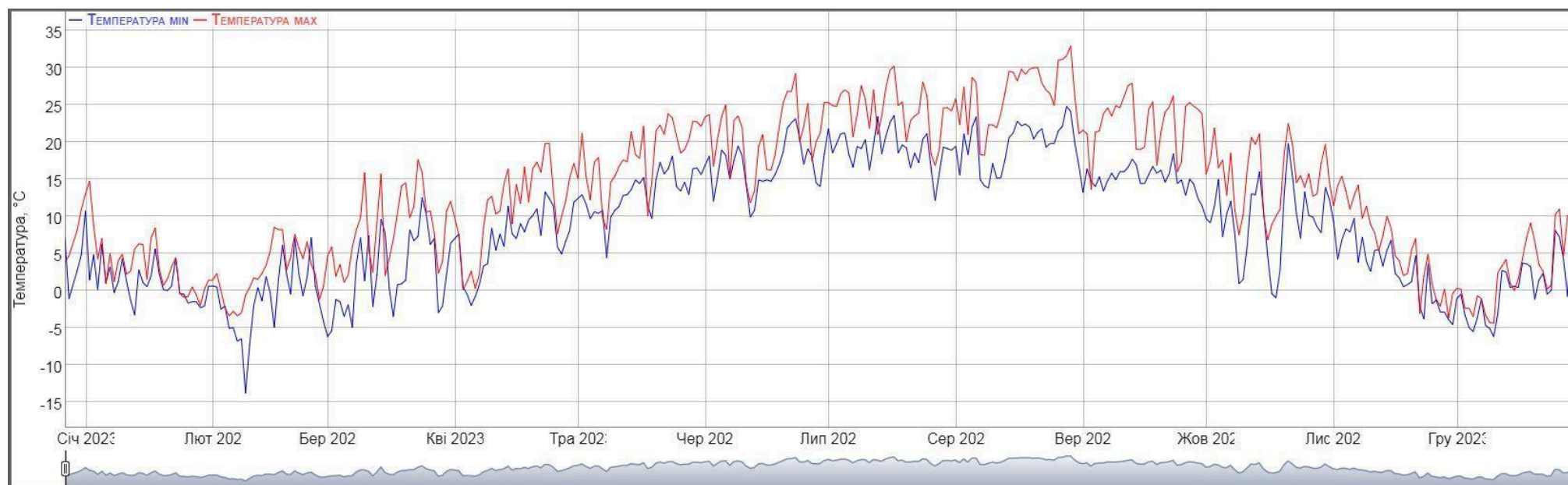


Рис. В.6. Температура й опади подовово восени 2022 року [80].



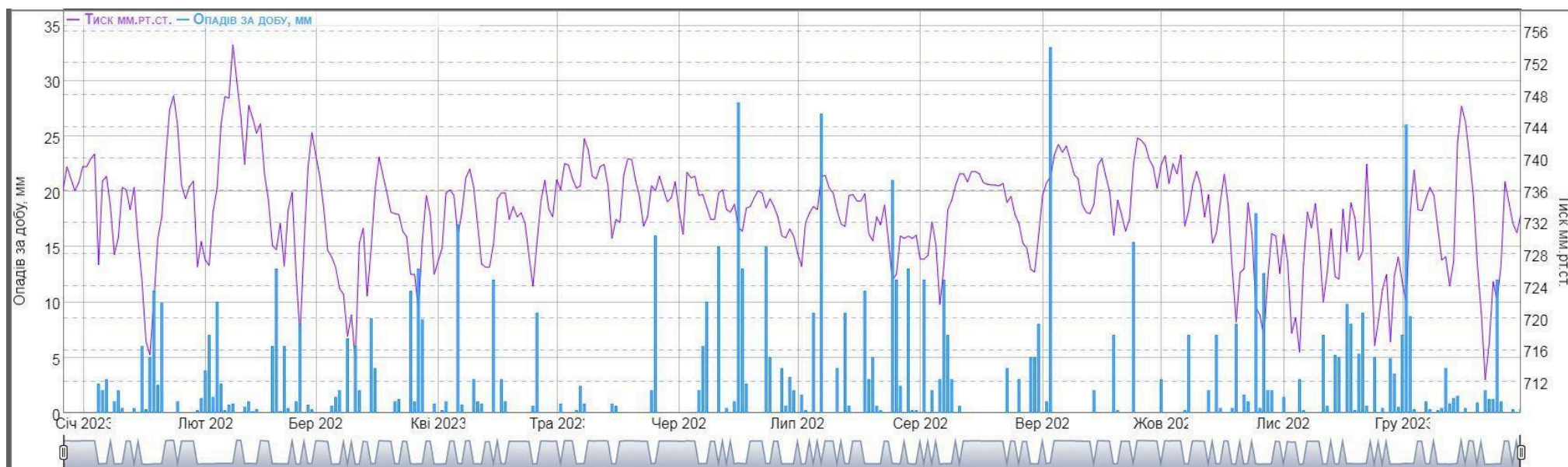


Рис. В.7. Температура й опади подово 2023 року [80].

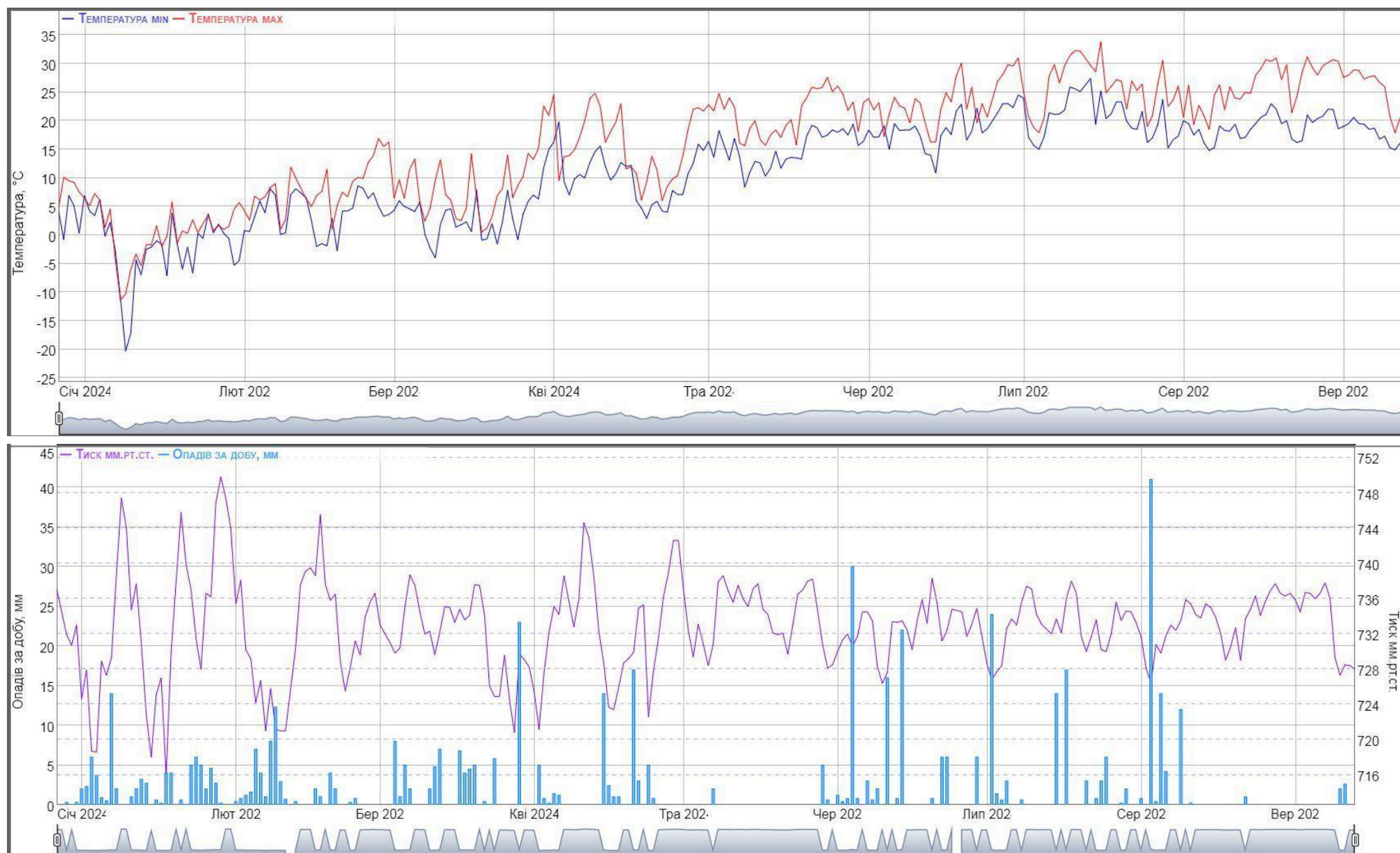
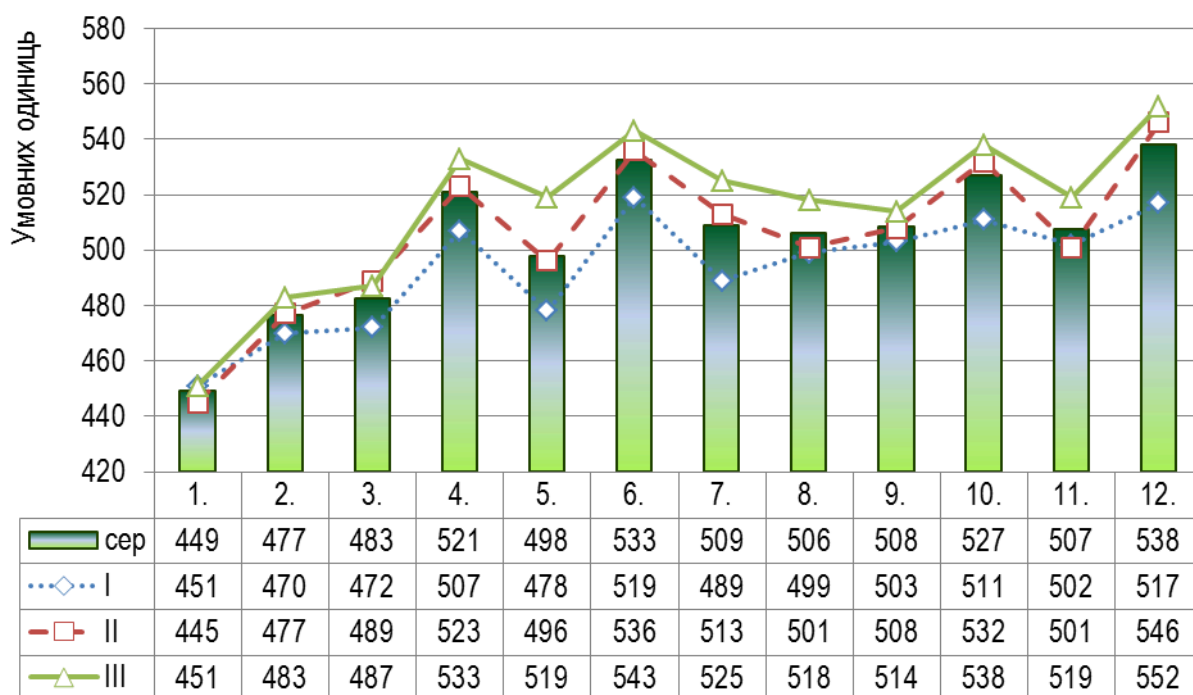


Рис. В.8. Температура й опади подовово 2024 року [80].

Таблиця В.2 – Біометрична структура врожаю сої (за даними спостережень 2023 року)

Варіант досліджу	Висота рослин, см	Висота нижнього боба, см	Бобів, од	Зерен, од	Маса зерен з рослини, г	Маса 1000 зерен, г	Маса бульбочок у фазі квіт., г
Контроль – без удобрення	73,1	12,3	13,2	23,4	5,2	190,9	0,38
Фон – Р60К60 (п.ор.)	74,9	12,9	14,1	28,1	5,5	191,1	0,43
Фон + N30 – Nsa (п.с.)	76,4	13,3	14,9	30,8	5,9	192,2	0,43
Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.)	76,7	13,6	15,3	32,2	6,1	193,1	0,69
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	79,7	14,2	15,2	32,3	6,1	190,9	0,48
Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	79,9	14,0	15,5	33,1	6,4	193,0	0,72
Фон + N30 – Naa (п.с.)	76,1	13,8	15,0	30,5	5,8	188,9	0,39
Фон + N30 – Naa+N-Lock™ (п.с.)	76,7	13,9	15,5	32,1	6,1	192,1	0,65
Фон + N30 – Naa+N-Lock™ (п.с.)+N30 – Naa(ф.б.)	79,1	14,1	15,6	32,2	6,3	192,5	0,67
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуєчі бактерії	83,2	14,3	16,0	33,9	6,7	194,1	0,78
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+Р-мобілізуєчі бактерії	78,6	13,9	15,8	33,7	6,3	193,5	0,70
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуєчі+Р-мобілізуєчі бактерії	84,1	14,5	16,3	34,4	6,9	194,9	0,82

## 21 червня



## 11 липня

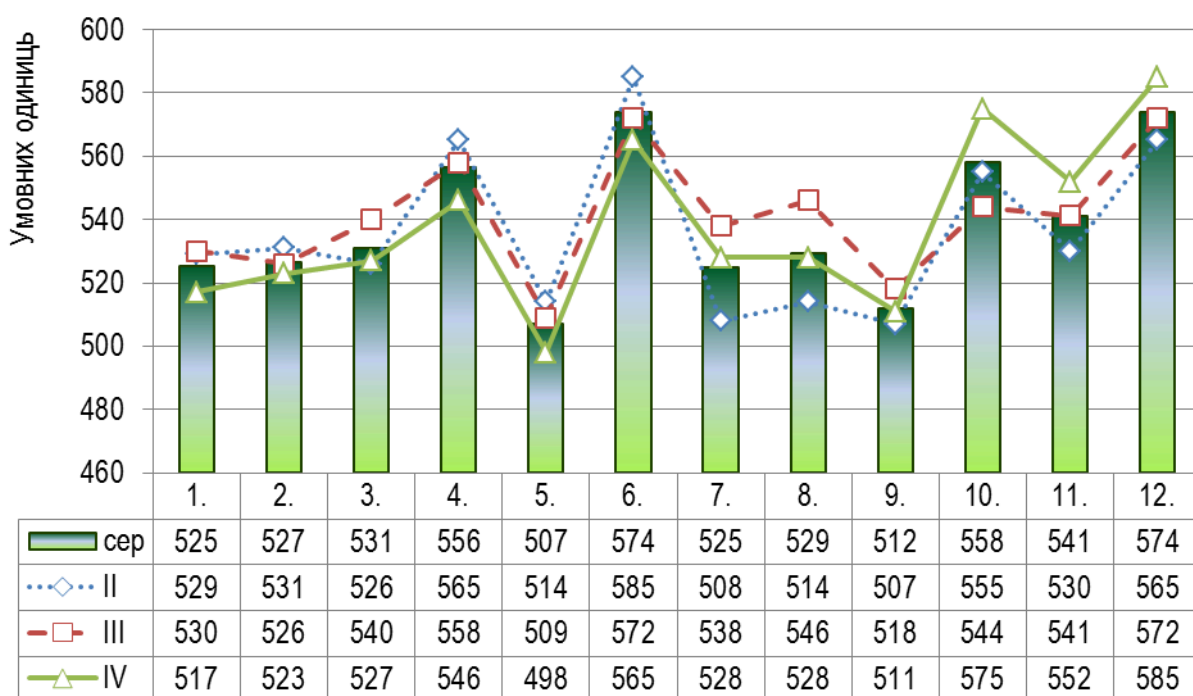


Рис. В.9. Результати вимірювання активності хлорофілу N-тестером «Яра тестер» 2023 року вегетації на початку квітування (21 червня) і формування бобів (11 липня), в умовних одиницях.

**Таблиця В.3 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) [16]  
достовірності даних оптичної активності хлорофілу у фазі побуріння бобів  
(2023 р.)**

Дисперсія	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	F <sub>факт.</sub>	F <sub>05</sub>
Загальна	29030	35	--	--	--
Варіантів	27854,67	11	2532,24	51,71	3,01
Залишок (помилки)	1175,33	24	48,97	--	--

Критерій істотності F <sub>факт.</sub>	—	51,71
Критерій F на 5%-му рівні значущості	—	3,01
Помилка досліду	ум.од.	4,04
Помилка різниці середніх	ум.од.	5,71
Відносна помилка різниці середніх	%	0,90
Коефіцієнт варіації	%	1,10
НІР <sub>05</sub> абсолютна	ум.од.	11,79
НІР <sub>05</sub> відносна	%	1,86



Рис. В.10. Ріст і розвиток сої без добрив на дерновому глейовому легкосуглинковому ґрунті Малого Полісся у фазі побуріння бобів (ВВСН 85 – 18.09.2023 р.).



Рис. В.11. Ріст і розвиток сої на фоні  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію) з використанням азотмобілізуючих бактерій *B. Japponicum* + фосформобілізуючих бактерій *B. atyloliquefaciens* у фазі побуріння бобів (ВВСН 85 – 18.09.2023 р.).



Рис. В.12. Ріст і розвиток сої на фоні  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію) + нітрапірин (перед сівбою) +  $N_{30}$  (сульфат амонію в фазі бутонізації) у фазі побуріння бобів (ВВСН 85 – 18.09.2023 р.).



Рис. В.13. Загальний вигляд коренів і рослин сої без добрив на дерновому глейовому легкосуглинковому ґрунті Малого Полісся у фазі побуріння бобів (ВВСН 85 – 18.09.2023 р.).



Рис. В.14. Загальний вигляд коренів і рослин сої на фоні  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію) з використанням азотмобілізуючих бактерій *B. Japonicum*

+ фосформобілізуючих бактерій *B. atyloliquefaciens*  
у фазі побуріння бобів (ВВСН 85 – 18.09.2023 р.).



Рис. А. В.15. Загальний вигляд коренів і рослин сої на фоні  $P_{60}K_{60} + N_{30}$  (сульфат амонію) + нітрапирин (перед сівбою) +  $N_{30}$  (сульфат амонію в фазі бутонізації) у фазі побуріння бобів (ВВСН 85 – 18.09.2023 р.).

## Додаток Г

## Таблиці і рисунки розділу 5

Таблиця Г.1 – Урожай зерна сої 2022 року, т/га

	Варіант дослідів	Повторення		
		I	II	III
1.	Контроль – без удобрення	2,59	2,62	2,76
2.	Фон – P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> (під оранку)	3,13	2,92	3,04
3.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (перед сівбою)	3,52	3,39	3,49
4.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію + N-Lock™(перед сівбою)	3,50	3,39	3,35
5.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (перед сівбою) + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (в фазі бутонізації)	3,56	3,54	3,50
6.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію + N-Lock™(перед сівбою) + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (в фазі бутонізації)	3,85	3,75	3,71
7.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра	3,31	3,21	3,38
8.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра + N-Lock™(перед сівбою)	3,52	3,48	3,52
9.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра + N-Lock™(перед сівбою) + N <sub>30</sub> – аміачна селітра (в фазі бутонізації)	3,75	3,64	3,70
10.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + азотмобілізуючі бактерії <i>B. japonicum</i> (ХайКот Супер Соя)	3,80	3,62	3,74
11.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + фосформобілізуючі бактерії <i>B. amyloliquefaciens</i> (Райс Пі)	3,71	3,54	3,61
12.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + азотмобілізуючі бактерії <i>B. japonicum</i> + Фосформобілізуючі бактерії <i>B. amyloliquefaciens</i>	3,85	3,84	3,73

Таблиця. Г.2 – Урожай зерна сої 2023 року, т/га

№ №	Варіант досліджу	Повторення		
		I	II	III
1.	Контроль – без удобрення	2,99	2,81	2,99
2.	Фон – P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> (під оранку)	3,13	2,98	3,03
3.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (перед сівбою)	3,79	3,58	3,69
4.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію + N-Lock™(перед сівбою)	4,12	3,91	4,02
5.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (перед сівбою) + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (в фазі бутонізації)	3,88	3,68	3,78
6.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію + N-Lock™(перед сівбою) + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (в фазі бутонізації)	4,11	3,91	4,00
7.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра	3,56	3,41	3,55
8.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра + N-Lock™(перед сівбою)	3,79	3,61	3,73
9.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра + N-Lock™(перед сівбою) + N <sub>30</sub> – аміачна селітра (в фазі бутонізації)	3,91	3,84	3,95
10.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + азотмобілізуєчі бактерії <i>B. japonicum</i> (ХайКот Супер Соя)	4,25	4,00	4,12
11.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + фосформобілізуєчі бактерії <i>B.</i> <i>amyloliquefaciens</i> (Райс Пі)	3,99	3,88	3,99
12.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + азотмобілізуєчі бактерії <i>B.</i> <i>Japonicum</i> + Фосформобілізуєчі бактерії <i>B.</i> <i>amyloliquefaciens</i>	4,15	3,95	4,05

Таблиця Г.3 – Урожай зерна сої 2024 року, т/га

№ №	Варіант досліджу	Повторення		
		I	II	III
1.	Контроль – без удобрення	2,89	2,91	2,70
2.	Фон – P <sub>60</sub> K <sub>60</sub> (під оранку)	3,12	3,16	2,77
3.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (перед сівбою)	3,55	3,58	3,31
4.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію + N-Lock™(перед сівбою)	3,66	3,68	3,32
5.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (перед сівбою) + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (в фазі бутонізації)	3,79	3,70	3,62
6.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфат амонію + N-Lock™(перед сівбою) + N <sub>30</sub> – сульфат амонію (в фазі бутонізації)	3,99	3,91	3,84
7.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра	3,51	3,51	3,21
8.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра + N-Lock™(перед сівбою)	3,66	3,62	3,37
9.	Фон + N <sub>30</sub> – амонійна селітра + N-Lock™(перед сівбою) + N <sub>30</sub> – аміачна селітра (в фазі бутонізації)	3,82	3,81	3,67
10.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + азотмобілізуючі бактерії <i>B. japonicum</i> (Хай Кот Супер Соя)	3,95	3,99	3,68
11.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + фосформобілізуючі бактерії <i>B.</i> <i>amyloliquefaciens</i> (Райс Пі)	3,73	3,71	3,57
12.	Фон + N <sub>30</sub> – сульфату амонію перед сівбою + азотмобілізуючі бактерії <i>B.</i> <i>Japonicum</i> + Фосформобілізуючі бактерії <i>B.</i> <i>amyloliquefaciens</i>	4,07	4,01	3,85

**Таблиця. Г.4 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) [16]**  
**урожайних даних 2022 року**

Дисперсія	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	$F_{\text{факт.}}$	$F_{05}$
Загальна	3,83	35	--	--	--
Варіантів	3,69	11	0,34	60,02	3,01
Залишок (помилки)	0,13	24	0,01	--	--

Критерій істотності $F_{\text{факт.}}$	—	60,02
Критерій F на 5%-му рівні значущості	—	3,01
Помилка досліду	т/га	0,04
Помилка різниці середніх	т/га	0,06
Відносна помилка різниці середніх	%	1,77
Коефіцієнт варіації	%	2,16
$НІР_{05}$ абсолютна	т/га	0,13
$НІР_{05}$ відносна	%	3,64

**Таблиця Г.5 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) [16]**  
**урожайних даних 2023 року**

Дисперсія	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	F <sub>факт.</sub>	F <sub>05</sub>
Загальна	5,18	35	--	--	--
Варіантів	4,97	11	0,45	50,68	3,01
Залишок (помилки)	0,21	24	0,01	--	--

Критерій істотності F <sub>факт.</sub>	—	50,68
Критерій F на 5%-му рівні значущості	—	3,01
Помилка досліду	т/га	0,05
Помилка різниці середніх	т/га	0,08
Відносна помилка різниці середніх	%	2,07
Коефіцієнт варіації	%	2,53
НІР <sub>05</sub> абсолютна	т/га	0,16
НІР <sub>05</sub> відносна	%	4,27

**Таблиця. Г.6 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) [16]**  
**урожайних даних 2024 року**

Дисперсія	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	$F_{\text{факт.}}$	$F_{05}$
Загальна	4,17	35	--	--	--
Варіантів	3,96	11	0,36	42,62	3,01
Залишок (помилки)	0,2	24	0,01	--	--

Критерій істотності $F_{\text{факт.}}$	—	42,62
Критерій F на 5%-му рівні значущості	—	3,01
Помилка дослідів	т/га	0,05
Помилка різниці середніх	т/га	0,08
Відносна помилка різниці середніх	%	2,04
Коефіцієнт варіації	%	2,5
$НIP_{05}$ абсолютна	т/га	0,15
$НIP_{05}$ відносна	%	4,22

## Додаток Д

## Таблиці і рисунки до розділу 6

Таблиця Д.1 – Біохімічні показники якості зерна сої за різних систем удобрення культури

Варіант досліджу	Сирий протеїн,%				Сирий жир,%				Сира клітковина,%				Волога,%			
	20	20	20	Сер	20	20	20	Сер	20	20	20	Сер	20	20	20	Сер
	22	23	24	едн	22	23	24	едн	22	23	24	едн	22	23	24	едн
	р.	р.	р.	є	р.	р.	р.	є	р.	р.	р.	є	р.	р.	р.	є
Контроль – без удобрення	32,8	33,2	33,1	33,0	19,5	19,3	19,9	19,6	9,1	7,9	8,2	8,4	7,6	7,1	7,4	7,4
Фон – Р60 К60 (п.ор.)	33,3	34,4	34,2	34,0	18,9	20,5	19,5	19,6	7,1	6,6	6,8	6,8	9,3	9,0	9,1	9,1
Фон + N30 – Nsa (п.с.)	35,4	36,1	35,8	35,8	19,8	21,7	20,5	20,7	5,2	5,1	5,1	5,1	9,1	8,7	9,0	8,9
Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.)	36,1	37,3	36,2	36,5	20,1	20,5	20,1	20,2	5,0	4,8	4,9	4,9	8,8	8,4	8,5	8,6
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	35,8	37,5	36,2	36,5	20,1	20,5	20,0	20,2	4,9	4,5	4,9	4,8	8,7	8,4	8,5	8,5
Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	36,8	37,7	37,1	37,2	20,0	20,2	20,1	20,1	4,7	4,4	4,6	4,6	8,8	8,2	8,6	8,5
Фон + N30 – Naa (п.с.)	34,7	35,9	35,5	35,4	19,8	20,9	20,8	20,5	8,5	7,5	8,2	8,1	9,4	9,0	9,1	9,2
Фон + N30 – Naa+N-Lock™(п.с.)	36,5	37,1	36,8	36,8	19,9	20,1	20,0	20,0	7,8	7,1	7,5	7,5	8,8	8,2	8,6	8,5
Фон + N30 – Naa+N-Lock™(п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	36,3	37,3	36,5	36,7	19,8	20,4	20,1	20,1	8,3	7,8	8,1	8,1	8,7	8,0	8,5	8,4
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуючі бактерії	37,5	38,3	37,8	37,9	19,8	20,2	20,1	20,0	4,0	3,8	3,9	3,9	8,7	8,2	8,4	8,4
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+Р-мобілізуючі бактерії	36,7	37,5	37,1	37,1	20,9	21,1	20,1	20,7	4,2	3,9	4,0	4,0	8,6	8,0	8,2	8,3
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N-мобілізуючі+ Р-мобілізуючі бактерії	38,1	38,9	38,7	38,6	20,1	20,5	20,4	20,3	3,5	3,1	3,2	3,3	8,1	7,7	8,0	7,9

**Таблиця Д.2 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) [16]**  
**достовірності даних вмісту сирого протеїну в зерні**

Дисперсія	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	F <sub>факт.</sub>	F <sub>05</sub>
Загальна	86,83	35	--	--	--
Варіантів	80,44	11	7,31	27,48	3,01
Залишок (помилки)	6,39	24	0,27	--	--

Критерій істотності F <sub>факт.</sub>	—	27,48
Критерій F на 5%-му рівні значущості	—	3,01
Помилка досліду	%	0,30
Помилка різниці середніх	%	0,42
Відносна помилка різниці середніх	%	1,16
Коефіцієнт варіації	%	1,42
НІР <sub>05</sub> абсолютна	%	0,87
НІР <sub>05</sub> відносна	%	2,40

*Таблиця Д.3 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) [16]*  
**достовірності даних вмісту сирого жиру в зерні**

Дисперсія	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	F <sub>факт.</sub>	F <sub>05</sub>
Загальна	9,41	35	--	--	--
Варіантів	4,13	11	0,38	<b>1,71</b>	<b>3,01</b>
Залишок (помилки)	5,28	24	0,22	--	--

Критерій істотності F <sub>факт.</sub>	—	1,71
Критерій F на 5%-му рівні значущості	—	3,01
Помилка дослідів	%	0,27
Помилка різниці середніх	%	0,38
Відносна помилка різниці середніх	%	1,9
Коефіцієнт варіації	%	2,33
НІР <sub>05</sub> абсолютна	%	0,79
НІР <sub>05</sub> відносна	%	3,92

**Таблиця Д.4 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) [16]**  
**достовірності даних вмісту сирої клітковини в зерні**

Дисперсія	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	$F_{\text{факт.}}$	$F_{05}$
Загальна	115,75	35	--	--	--
Варіантів	113,61	11	10,33	115,83	3,01
Залишок (помилки)	2,14	24	0,09	--	--

Критерій істотності $F_{\text{факт.}}$	—	115,83
Критерій F на 5%-му рівні значущості	—	3,01
Помилка досліду	%	0,17
Помилка різниці середніх	%	0,24
Відносна помилка різниці середніх	%	4,22
Коефіцієнт варіації	%	5,16
$НІР_{05}$ абсолютна	%	0,50
$НІР_{05}$ відносна	%	8,70

*Таблиця Д.5 – Кореляція врожаю зерна сої 2023 року  
з біометричними та біохімічними показниками продукційного процесу,  $r_{\pm}$*

	<i><b>Врожай 2023 р.</b></i>	Маса бульбо- чок у буто- нізац- ію	Маса бульбо- чок при квіту- ванні	Ма- са бу- льбо- чок при сти- гло- сті	Ви- сот- а ро- слин	Висо- та нижн- ього боба	К-с- ть бобів	К-ст- ь зере- н на росл- ині	Маса зере- н на росл- ині	Маса 1000 зере- н	Вмі- ст про- теї- нів	Вмі- ст жи- рів	Вмі- ст клі- тко- вин и	Збі- р про- теї- нів
Маса бульбочок у бутонізацію	<b>0,86</b>	X												
Маса бульбочок при квітуванні	<b>0,83</b>	0,95	X											
Маса бульбочок при стигlostі	<b>0,79</b>	0,96	0,87	X										
Висота рослин	<b>0,80</b>	0,91	0,79	0,94	X									
Висота нижнього боба	<b>0,87</b>	0,82	0,72	0,74	0,87	X								
К-сть бобів	<b>0,93</b>	0,90	0,84	0,80	0,86	0,95	X							
К-сть зерен на рослині	<b>0,94</b>	0,86	0,78	0,75	0,82	0,93	0,98	X						
Маса зерен на рослині	<b>0,92</b>	0,96	0,90	0,93	0,95	0,91	0,96	0,92	X					

Маса 1000 зерен	<b>0,70</b>	0,87	0,89	0,85	0,71	0,49	0,66	0,62	0,78	X				
Вміст протеїнів	<b>0,96</b>	0,91	0,84	0,84	0,89	0,95	0,98	0,97	0,97	0,69	X			
Вміст жирів	<b>0,30</b>	0,08	-0,08	0,03	0,09	0,24	0,34	0,42	0,18	0,02	0,25	X		
Вміст клітковини	<b>-0,69</b>	-0,74	-0,62	-0,78	-0,74	-0,56	-0,64	-0,69	-0,72	-0,72	-0,71	-0,32	X	
Збір протеїнів	<b>1,00</b>	0,86	0,83	0,79	0,80	0,87	0,93	0,94	0,92	0,70	0,96	0,30	-0,69	X
Збір жирів	<b>1,00</b>	0,86	0,83	0,79	0,80	0,87	0,93	0,94	0,92	0,70	0,96	0,30	-0,69	1,00

**Таблиця Д.6 – Кореляція фотооптичної активності хлорофілу з урожаєм зерна сої, масою сформованих бульбочок у фазі квітування та показниками продукційного процесу (за даними 2023 року),  $r_{\pm}$**

	Врожа й 2023 р.	Маса бульбочок при квітуванні	Хлорофілу квітування	К-сть зерен на рослині	Маса 1000 зерен
Маса бульбочок при квітуванні	0,83	X			
Хлорофіл у квітування	0,89	0,83	X		
К-сть зерен на рослині	0,94	0,78	0,90	X	
Маса 1000 зерен	0,70	0,89	0,59	0,62	X
Вміст протеїнів	0,96	0,84	0,91	0,97	0,69

**Додаток Е**  
**Таблиці і рисунки до розділу 7**

**Таблиця Е.1 – Вартість складників системи удобрення сої разом з витратами на їхнє внесення, грн**

№ №	Варіант	Амонійна селітра	Сульфат амонію	Фосфорно- калійний фон	N-Lock™	Внесення N-Lock™	ХайКот Супер Соя (БАСФ)	Райс Пі (Агрітема)	Внесення добрих	Вартість засобів та їхнього внесення
1	Контроль – без удобрення	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	Фон – Р60К60 (п.ор.)	–	–	3336	–	–	–	–	230	<b>3566</b>
3	Фон + N30 – Nsa (п.с.)	–	2230	3336	–	–	–	–	460	<b>6026</b>
4	Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.)	–	2230	3336	1290	180	–	–	460	<b>7496</b>
5	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	–	4460	3336	–	–	–	–	690	<b>8486</b>
6	Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	–	4460	3336	1290	180	–	–	690	<b>9956</b>
7	Фон + N30 – Naa (п.с.)	1580	–	3336	–	–	–	–	460	<b>5376</b>
8	Фон + N30 – Naa+N-Lock™(п.с.)	1580	–	3336	1290	180	–	–	460	<b>6846</b>
9	Фон + N30 – Naa+N-Lock™(п.с.)+N30 – Naa (ф.б.)	3160	–	3336	1290	180	–	–	690	<b>8656</b>
10	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+ ХайКот Супер Соя	–	2230	3336	–	–	–	–	460	<b>6466</b>
11	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+Райс Пі	–	2230	3336	–	–	–	170	460	<b>6196</b>
12	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N+P-бактерії	–	2230	3336	1290	180	440	170	460	<b>8106</b>

Примітка \*: п.ор. – під оранку; Nsa – сульфат амонію; п.с. – перед сівбою; ф.б. – фаза бутонізації; Naa – амонійна селітра.

Таблиця Е.2 – Економічна ефективність систем удобрення сої, у середньому за 2022-2024 роки

№ №	Варіант	Урожайність, т/га	Приріст врожаю, т/га	Вартість валової продукції, грн./га	Вартість приросту урожайності, грн./га	Додаткові затрати, грн./га	Всього затрат, грн./га	Чистий прибуток, грн./га	Рентабельність, %	Окупність 1 грн. затрат на добрива і їх внесення, грн.
1	Контроль – без удобрення	2,81	0,00	50018	0	0	11200	38818	346,6	–
2	Фон – Р60К60 (п.ор.)	3,03	0,22	53934	3916	3566	14766	39168	265,3	11,0
3	Фон + N30 – Nsa (п.с.)	3,55	0,74	63190	13172	6026	17226	45964	266,8	7,63
4	Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.)	3,66	0,85	65148	15130	7496	18696	46452	248,5	6,20
5	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	3,67	0,86	65326	15308	8486	19686	45640	231,8	5,38
6	Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.) +N30 – Nsa (ф.б.)	3,90	1,09	69420	19402	9956	21156	48264	228,1	4,85
7	Фон + N30 – Naa (п.с.)	3,41	0,60	60698	10680	5376	16576	44122	266,2	8,21
8	Фон + N30 – Naa+N-Lock™(п.с.)	3,59	0,78	63902	13884	6846	18046	45856	254,1	6,70
9	Фон + N30 – Naa+N-Lock™(п.с.) +N30 – Naa (ф.б.)	3,79	0,98	67462	17444	8656	19856	47606	239,8	5,50

10	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+ ХайКот Супер Соя	3,90	1,09	69420	19402	6466	1766 6	5175 4	293,0	8,00
11	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+ Райс Пі	3,75	0,94	66750	16732	6196	1739 6	4935 4	283,7	7,97
12	Фон + N30 – Nsa (п.с.)+ N+P-бактерії	3,95	1,14	70310	20292	8106	1930 6	5100 4	264,2	6,29

Примітка \*: п.ор. – під оранку; Nsa – сульфат амонію; п.с. – перед сівбою; ф.б. – фаза бутонізації; Наа – амонійна селітра.

**Таблиця Е.3 – Енергетична ефективність удосконалення системи мінерального удобрення сої,  
у середньому за 2022-2024 роки**

Варіант досліджу	Урожай ність зерна, т/га	Вихід сухої речов ини, т/га	Енерго- ємність додаткових матеріалів, МДж/га	Енерго- ємність зерна, МДж/га	Енерго- витрати, МДж/га сівби	K <sub>ее</sub> (коефіціє нт енерг.ефе кт.)
Контроль – без удобрення	2,81	2,47	0,00	50879	16550	3,07
Фон – Р60К60 (п.ор.)	3,03	2,67	1477	54988	18027	3,05
Фон + N30 – Nsa (п.с.)	3,55	3,12	4304	64294	20854	3,08
Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.)	3,66	3,22	4713	66348	21263	3,12
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+N30 – Nsa (ф.б.)	3,67	3,23	7131	66530	23681	2,81
Фон + N30 – Nsa+N-Lock™(п.с.) +N30 – Nsa (ф.б.)	3,90	3,43	7540	70639	24090	2,93
Фон + N30 – Naa (п.с.)	3,41	3,00	4304	61756	20854	2,96
Фон + N30 – Naa+N-Lock™(п.с.)	3,59	3,16	4713	65080	21263	3,06
Фон + N30 – Naa+N-Lock™(п.с.) +N30 – Naa (ф.б.)	3,79	3,34	7540	68705	24090	2,85
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+ ХайКот Супер Соя	3,90	3,43	4359	70760	20909	<b>3,38</b>
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+ Райс Пі	3,75	3,30	4311	67920	20861	<b>3,26</b>
Фон + N30 – Nsa (п.с.)+ N+P-бактерії	3,95	3,47	4359	71545	20909	<b>3,42</b>

Примітка \*: п.ор. – під оранку; Nsa – сульфат амонію; п.с. – перед сівбою ; ф.б. – фаза бутонізації; Naa – амонійна селітра.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України

1. Коцюба Б. І. Вплив азотних добрив, нітрапірину та інокулянтів на зернову продуктивність сої у Малому Поліссі. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. Вип. 105, Част. 1, 2024. С. 324-337. DOI: 10.32782/2415-8240-2024-105-1-324-337.
2. Коцюба Б. І. Урожайність сої за різних систем азотного удобрення, застосування нітрапірину та інокулянтів насіння. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького. Серія: Сільськогосподарські науки*, 2024, т 26, № 101. С. 194-204. doi: 10.32718/nvlvet-a10131.
3. Коцюба Б. І. Чинники й закономірності формування зернової продуктивності сої на дерновому глейовому ґрунті Малого Полісся. *Агронаука і практика*. Вип. 3, Ч. 4, 2024. С. 17-31. DOI: 10.32636/agroscience.2024-(3)-4-3
4. Гнатів П. С., Литвин О. Ф., Іванюк В. Я., Лагуш Н. І., Шестак В. Г., Коцюба Б. І. Створення й апробація програмного забезпечення статистичного моделювання вірогідності результатів агрономічних експериментів. *Вісник ЛНУП. Агрономія*, 2022, 26: 157-162. Doi.org/10.31734/agronomy2022.26.157 (Здобувачем узагальнено матеріал, здійснено статистичну обробку даних та колективно сформульовані висновки).
5. Гнатів П. С., Іванюк В. Я., Полухович М. М., Шестак В. Г., Оліфір Ю. М., Коцюба Б. І., Баранський Д. В. Оптимізація азотного удобрення темно-сірого опідзоленого ґрунту Західного Лісостепу за використання інгібітора нітрифікації. *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С. З. Гжицького. Серія: Сільськогосподарські науки*, 2023, т. 25, № 98. С.132-141. doi: 10.32718/nvlvet-a9822. (Здобувачем зібрано й узагальнено теоретичний матеріал, описано методи досліджень та колективно сформульовані висновки).

**Статті у міжнародних виданнях, що включені до наукометричних баз  
(Scopus, Web of Science)**

6. Shestak V., Hnativ P., Ivaniuk V., Olifir Y., Szulc W., Rutkowska B., Spychaj-Fabisiak E., Vega N., Parkhuc B., Kachmar O., Kocyuba B., Bahaj T. 2023. Dynamics of the forms of nutrient nitrogen in Greyic Luvic Phaeozem when regulating their resources with fertilizers and nitrapyrin applied to winter barley. *Journal of Elementology*, 28(1): 41-58. DOI: 10.5601/jelem.2023.28.1.2352. (Scopus, Web of Science). *(Здобувачем здійснено пошук та узагальнення наукових джерел, підготовлено ілюстрації до статті та колективно сформульовані висновки).*

**Інші публікації**

7. Коцюба Б. І., Станкевич А. П. Вплив інокулянтів ХайКот Супер Соя та Райс Пі на формування продуктивності сої у Малому Поліссі на Заході України. *«Мікробіологія в сучасному сільськогосподарському виробництві»*. Матеріали XVII Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції молодих вчених, 28 серпня 2024 року, м. Чернігів. 2024. С. 62-64 (Здобувачем підготовлено текст статті та сформульовано колективні висновки).

8. Kotsiuba B., Hnativ P., Ivaniuk V. Influence of nitrogen fertilizers, nitrapyrin, and inoculants on soybean yield formation in the Male Polissia region on gleyed soddy loam soil. *Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXV Міжнародного науково-практичного форуму, 02–04 жовтня 2024 року*. ЛНУП. [Електронний ресурс]. 2024. С. 212-216. (Здобувачем опрацьовано дані по профілю ґрунту, підготовлено текст статті в частині продуктивності сої, сформульовано колективні висновки).

9. Kotsiuba B. I., Hnativ P. S., Ivaniuk V. Ya. Ecologization of soybean cultivation technology on derno-gleyozem soil of the Male Polissya. *Матеріали IX-го Міжнародного з'їзду екологів*. 26.09.2024. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2024/schedConf/presentations>. (Здобувачем

*опрацьовано дані агрохімічних показників ґрунту, зроблено розрахунки та підготовлено текст статті, сформульовано колективні висновки).*

10. Коцюба Б. І., Гнатів П. С., Іванюк В. Я. Зміна кислотності ґрунту під впливом систем удобрення сої, застосування стабілізатора нітратів та азотного інокулянта. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Актуальні проблеми агропромислового виробництва України: стратегії стійкості сільськогосподарського сектору під час війни та у післявоєнний період» (19 листоп. 2024 р.). Львів-Оброшине, 2024. (161 с.) С. 53-55 (*Здобувачем виконав експеримент, проаналізував агрохімічні показники ґрунту, зробив розрахунки та підготував текст статті, колективно сформулював висновки).*

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Керівник ПАФ ім. М. Шашкевича

Соловій Р. П.

« 18 жовтня 2024 р.



### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

#### Результатів дисертаційної роботи Коцюби Богдана Ігоровича «ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АЗОТНОГО УДОБРЕННЯ СОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНГІБІТОРА НІТРИФІКАЦІЇ ТА ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ В УМОВАХ МАЛОГО ПОЛІССЯ»

18 жовтня 2024 року

с. Вузлове

Цим актом підтверджуємо впровадження рекомендацій із дисертаційної роботи Коцюби Богдана Ігоровича «ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АЗОТНОГО УДОБРЕННЯ СОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНГІБІТОРА НІТРИФІКАЦІЇ ТА ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ В УМОВАХ МАЛОГО ПОЛІССЯ» у Приватній агрофірмі ім. М. Шашкевича за такими позиціями:

1. З метою збільшення врожайності сої та підвищення віддачі мінеральних добрив на дерновому глейовому легкосуглинковому ґрунті вносили під оранку  $P_{60}K_{60}$ , перед сівбою сульфат амонію в нормі  $N_{30}$  та обробляли насіння інокулянтами ХайКот Супер Соя (БАСФ) та Райс Пі (Агрітема) у рекомендованих виробниками нормах витрат. Поєднання цих технологічних заходів забезпечило прибавку врожаю сої 0,37 т/га, максимальну білковість зерна 38,1% та умовно чистий прибуток 6100 грн/га порівняно з традиційною системою удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ . Це забезпечило сукупний прибуток на площі 48 га 292800 грн.

2. За дробного внесення азотного добрива ( $N_{30}$  перед сівбою +  $N_{30}$  у фазі бутонізації) на площі 27 га та внесення перед сівбою препарату N-Lock™ (1,7 л/га) для пролонгації періоду утворення нітратів на початку вегетації сої отримали прибавку врожаю 0,31 т/га. Це забезпечило чистий прибуток 2200 грн/га, порівняно з фоном удобрення  $N_{30}P_{60}K_{60}$ , та сукупний прибуток з усієї площі 59400 грн.

Від розробника  
рекомендацій:  
аспірант кафедри агрохімії  
та ґрунтознавства ЛНУП

Коцюба Б. І.

Від господарства бухгалтер  
ПАФ ім. М. Шашкевича

Фрей Ю. Є

**ЛЬВІВСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**



**LVIV  
NATIONAL  
ENVIRONMENTAL  
UNIVERSITY**

вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни,  
Львівський район, Львівська область, 80381,  
Україна  
тел.: (032)22-42-335, факс: (032)22-42-919,  
e-mail: rectorat@lnup.edu.ua

1, Volodymyra Velykoho Str., Dublyany,  
Lviv district, Lviv region, 80381  
Ukraine  
phone: (032)22-42-335, fax: (032)22-42-919,  
e-mail: rectorat@lnup.edu.ua

09.01.2025 № 0425-03/3-84  
На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

### ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження  
аспіранта кафедри агрохімії та ґрунтознавства  
Львівського національного університету природокористування  
**КОЦЮБИ БОГДАНА ІГОРОВИЧА**

Аспірант Львівського національного університету природокористування Богдан Ігорович КОЦЮБА на основі результатів наукових досліджень за темою дисертації «ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АЗОТНОГО УДОБРЕННЯ СОЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНГІБІТОРА НІТРИФІКАЦІЇ ТА ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ В УМОВАХ МАЛОГО ПОЛІССЯ» на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 201 «Агрономія» розробив та надав свої пропозиції до програм навчальних дисциплін, які викладаються в університеті: «Системи удобрення польових культур», «Рослинництво», «Аналітичний агрохімсервіс та управління якістю ґрунтів», «Екологічні основи застосування добрив і моніторинг родючості ґрунтів».

Довідка видана для пред'явлення у разову спеціалізовану вчену раду, в якій проводитиметься захист названої дисертації.

Голова комісії з реорганізації  
Львівського національного  
університету природокористування



Іван ПАРУБЧАК