УДК: 631.427.2:635.655

Вплив інтегрованого застосування добрив та меліорантів на мікробіоценоз кислого дерново-підзолистого ґрунту в ризосфері сої

А. С. Левішко [1,a,✉], І. І. Гуменюк [1,b], П. М. Маменко [1,c], О. Ю. Колодяжний [1,d], Л. А. Ященко [2,e], Г. Ф. Ровна [2,f]

[1] **Інститут агроекології і природокористування НААН,** *Київ, Україна*
[2] **Інститут сільського господарства Західного Полісся**, *с. Шубків, Рівненська обл.,Україна*

ІНФОРМАЦІЯ

Отримано 24.02.2026
Отримано після доопрацювання 03.06.2026
Затверджено до видання 08.06.2026
Доступно онлайн 30.06.2026

Ключові слова:

ґрунт;
соя;
вапнування;
NPK-добрива;
мікробіоценоз;
азотфіксування;
агроекосистема

АНОТАЦІЯ

У статті викладено результати дослідження впливу інтегрованої агрохімічної меліорації кислого (pH = 4,1) дерново-підзолистого зв'язнопіщаного ґрунту (Albic Arenosols) на структуру та функціональну активність ґрунтового мікробіоценозу у ризосфері сої. Дослідження проведено у 2024–2025 рр. на дослідному полі Інституту сільського господарства Західного Полісся НААН, у Рівненській області. Програма польового експерименту включала 8 варіантів, що поєднували вапнування (доломітове борошно або $CaCO_3$ у дозах 1,0–1,5 Нг) із диференційованим внесенням NPK-добрив та дворазовим позакореневим підживленням мікродобривами. В результаті інтегрованої агромеліорації констатовано підвищення pH ґрунтового розчину до діапазону 5,5–6,2 та зниження гідролітичної кислотності у 2–3 рази. Це створило підґрунтя для інтенсифікації мікробіологічних процесів: чисельність амоніфікаторів зросла в 3,7 раза (макс. 18,53 млн КУО/г), активізувалися стрептоміцети, тоді як популяція мікроміцетів скоротилася у 2,8 раза. Деструкція органіки змістилася з грибного на більш енергоефективний бактеріальний шлях. Мікробна біомаса досягла максимуму (105,56 мкг С/г) за поєднання доломітового борошна з помірними дозами добрив, що корелювало зі стабілізацією емісії CO_2. Найвищу ефективність продемонстрували варіанти, що базувалися на вапнуванні доломітовим борошном (1,5 Нг) у комбінації з мікродобривами. Вони забезпечили формування евтрофного мікробіоценозу із низьким коефіцієнтом оліготрофності (0,09–0,18) та високою метаболічною активністю. Результати доводять, що інтегрована агрохімічна меліорація є фундаментом для екологізації землеробства на кислих ґрунтах, дозволяє поєднувати підтримку високої продуктивності сої зі збереженням гумусового балансу та біорізноманіття.

✉ alodua2@gmail.com

ORCID: [a] 0000-0003-4037-1730, [b] 0000-0002-6692-0171, [c] 0009-0001-9945-8462, [d] 0000-0001-5359-1738, [e] 0000-0003-1407-0133, [f] 0000-0002-7599-5650

Форма цитування: Левішко А. С., Гуменюк І. І., Маменко П. М., Колодяжний О. Ю., Ященко Л. А., Ровна Г. Ф. Вплив інтегрованого застосування добрив та меліорантів на мікробіоценоз кислого дерново-підзолистого ґрунту в ризосфері сої. *Агрохімія і ґрунтознавство* / ННЦ «Ін-т ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2026. Вип. 100. С. 59–72. https://doi.org/10.31073/acss100-01

Поширення статті здійснюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY–NC 4.0

1. Вступ

У сучасному аграрному секторі концепція здоров'я ґрунту трансформується: від його фізичних та хімічних характеристик до визнання домінантної ролі біологічного компонента. Показники, що описують склад і кількість мікроорганізмів ґрунту, які є головними драйверами біогеохімічних циклів, реагують на антропогенний вплив значно швидше ніж інші традиційні показники, що робить їх ідеальними біоіндикаторами стану ґрунту. Особливої актуальності це набуває для кислих дерново-підзолистих ґрунтів Західного Полісся України. Підвищена кислотність тут не лише лімітує доступність фосфору та гальмує азотфіксацію, а й стимулює розвиток патогенної мікрофлори, що критично обмежує врожайність сої — стратегічної культури для білкового балансу та диверсифікації сівозмін.

Здоров'я ґрунту є значущою базою землеробства для гарантування продовольчої безпеки та стійкого розвитку агросистем. Домінування протягом десятиліть в оцінці стану ґрунту фізичних і хімічних діагностичних показників призвело до недооцінювання біологічних компонентів, що обмежує ефективність

агротехнологій. Мікроорганізми є головними рушіями кругообігу елементів і найкращими біомаркерами стану ґрунту. Їхня реакція на людське втручання може бути виявлена значно оперативніше, і є більш інформативним індикатором порівняно з традиційними методами моніторингу. У контексті глобальних викликів, таких як деградація земель і зміна клімату, моніторинг мікробіоти стає інструментом для прогнозування та корекції екологічних ризиків. Кислі дерново-підзолисті ґрунти, поширені в Західному Поліссі України, характеризуються низькою родючістю через підвищену кислотність, що гальмує азотфіксацію та сприяє розвитку патогенів. Такі умови ускладнюють вирощування зернових і бобових культур, зокрема сої, яка є стратегічною для диверсифікації посівних площ і поліпшення білкового балансу в харчуванні. Соя, як азотфіксувальна культура, є чутливою до pH-режиму та доступності елементів живлення, що робить її ідеальним об’єктом для вивчення мікробних трансформацій. Інтегрований агрохімічно-меліоративний вплив, що поєднує вапнування ґрунту з диференційованим внесенням NPK-добрив, обіцяє оптимізувати мікробне угруповання, підвищуючи його функціональний потенціал. Актуальність такого підходу посилюється в умовах інтенсивного землеробства, де надмірне використання добрив веде до дисбалансу мікробіоти та втрат вуглецю. Дослідження мікробіологічних реакцій на таке інтегрування заходів дозволяє верифікувати ефективність агротехнологій, мінімізуючи екологічні ризики, такі як емісія CO_2 і накопичення токсинів [1–3]. Особливу наукову цінність становить здійснена в межах дослідження всебічна характеристика еколого-трофічних груп мікроорганізмів у ризосфері сої на кислому ґрунті, що доповнюється аналізом показників оліготрофності та інтенсивності мінералізаційних процесів. Отже, здобуті дані стануть підґрунтям для формування адаптивних моделей агровиробництва, які гарантуватимуть тривале збереження стабільності агроландшафтів і зростання врожайності сої в аналогічних ґрунтово-кліматичних умовах. Так, метою нашої роботи було дослідити вплив інтегрованого застосування агрохімічних і меліоративних засобів на структуру та функціональну активність мікробіоценозу у ризосфері сої на кислому дерново-підзолистому ґрунті.

2. Використані матеріали та методи

Польові дослідження проведено у межах польового стаціонарного досліду Інституту сільського господарства Західного Полісся НААН України (Рівненська обл., Рівненський р-н, с. Шубків), закладеного у 2020 р. на дерново-підзолистому зв’язнопіщаному ґрунті. Дослідження вели у ланці сівозміни «соняшник – кукурудза на зерно – соя». Схема досліду включала варіанти різних систем удобрення та вапнування з метою визначення оптимальної дози мінеральних добрив для живлення культур та ефективності меліоративних засобів для створення оптимальних умов розвитку мікроорганізмів у ризосфері сої і підвищення родючості ґрунту.

Об’єктами вивчення слугували посіви сої сорту Сіверка, вирощуваної впродовж 2024–2025 рр. згідно зі схемою досліду, наведеною в табл. 1. Попередником сої була кукурудза на зерно. Перед посівом проводили обробку насіння препаратом «Різолайн®-р Соя» (виробник – БТУ-центр), доза 2,0 л на 1 т, з метою створення ефективного симбіотичного апарату рослинами сої, що є екологічно безпечною альтернативою надмірному внесенню мінеральних азотних добрив та сприяє відновленню родючості ґрунту.

До схеми досліду включено контрольний варіант (№ 1) (без добрив і вапнування) з метою оцінювання фонової родючості ґрунту, а також варіанти з внесенням $CaMg(CO_3)_2$ (№№ 2–7) і $CaCO_3$ (№ 8) у різних дозах (1,0 та 1,5 Нг), що дозволило встановити ефективність післядії різних видів і доз меліорантів на зниження кислотності ґрунту в поєднанні з мінеральним удобренням сої (Табл. 1). Варіанти з дозою $N_{45}P_{60}K_{60}$ (№№ 3, 7, 8) відображають зональні рекомендації щодо системи удобрення сої [4], тоді як нормативні дози добрив сформовано за принципом компенсації виносу NPK з основною (за урожаю зерна 3 т/га) та побічною продукцією: варіант № 4 ($N_{55}P_{20}K_{50}$) — основною; № 5 ($N_{65}P_{50}K_{75}$) —

основною і відповідною кількістю побічної продукції. У варіанті № 6 (N_{55}) контролюється винос N основною продукцією.

Таблиця 1

Набір варіантів польового досліду

№	Варіант
1	Без добрив і меліорантів
2	$CaMg(CO_3)_2$ (1,0 Нг)
3	$CaMg(CO_3)_2$ (1,0 Нг) + $N_{45}P_{60}K_{60}$ + мікродобриво (двічі)
4	$CaMg(CO_3)_2$ (1,0 Нг) + $N_{55}P_{20}K_{50}$ + мікродобриво (двічі)
5	$CaMg(CO_3)_2$ (1,0 Нг) + $N_{65}P_{50}K_{75}$ + мікродобриво (двічі)
6	$CaMg(CO_3)_2$ (1,0 Нг) + N_{55} + мікродобриво (двічі)
7	$CaMg(CO_3)_2$ (1,5 Нг) + $N_{45}P_{60}K_{60}$ + мікродобриво (двічі)
8	$CaCO_3$ (1,0 Нг) + $N_{45}P_{60}K_{60}$ + мікродобриво (двічі)

Мінеральні добрива (карбамід, суперфосфат простий, калійні солі) внесено разом з посівом насіння сої навесні 2025 р.

У всіх варіантах з макродобривами додатково застосовано мікродобриво «Нутрівант універсальний» (2 кг/га), позакоренево (способом обприскування) дворазово — у фази 1-ї і 3–5-ї пар листків сої з метою оптимізації мікроелементного живлення сої для більш ефективного засвоєння поживних макроелементів.

Експеримент проведено за загальноприйнятою для зони Полісся агротехнікою вирощування на ділянках із посівною площею 99 м^2 та обліковою — 50 м$^{2.}$. У схемі досліду передбачено триразове повторення варіантів з послідовним розміщенням. Вапнування проводили восени 2020 р. під час закладки досліду, під першу культуру у сівозміні — пшеницю озиму. Загальний фон у досліді — заорювання побічної продукції.

Фізико-хімічні характеристики ґрунту до закладки досліду: pH – 4,0; гідролітична кислотність — 2,60 ммоль на 100 г ґрунту. Вміст елементів живлення (мг/кг ґрунту): легкогідролізований азот (N) — 40,2; рухомий фосфор (P_2O_5) — 176,0; рухомий калій (K_2O) — 58,4.

У кожному з варіантів проводили комплексне вивчення деяких хімічних індикаторів та мікробіологічних характеристик ґрунту в ризосфері сої. Таке поєднання оцінювання агрономічної і мікробіологічної якості ґрунту забезпечує комплексне розкриття ефективності інтегрованих технологій, формує наукову основу для розробки стійких та екологічно безпечних моделей вирощування сої на кислих ґрунтах Полісся.

Проби ґрунту для лабораторних аналізів відбирали у 2025 р. у ризосфері сої на час бутонізації рослин (ВВСН 45-48) із орного шару (0–20 см) за ДСТУ 4287:2004[1], попередню обробку проб здійснювали за ДСТУ ISO11464:2007[2]. Середній зразок ґрунту формували з п'яти окремих проб, відібраних по діагоналі ділянки на приблизно рівних відстанях. Лабораторні дослідження проводили у 5-кратній повторності.

У середніх зразках ґрунту визначали такі характеристики: pH_{KCl} — потенціометричним методом, за ДСТУ ISO 10390-2022[3]; гідролітичну кислотність (Нг, ммоль/100 г ґрунту) — за Каппеном (ДСТУ 7537:2014[4]); вміст азоту сполук, що

[1] ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб: [Чинний від 2004-30-04]. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 5 с.

[2] ДСТУ ISO11464:2007. Якість ґрунту. Попереднє обробляння зразків для фізико-хімічного аналізу: [Чинний від 2009-01-10]. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 12 с.

[3] ДСТУ ISO 10390-2022 (ISO 10390:2021, IDT). Ґрунт, оброблені біовідходи та осад. Визначення pH. [Чинний від 2022-02-16]. Київ: Держспоживстандарт України, 2022. 14 с.

[4] ДСТУ 7537:2014 Якість ґрунту. Визначення гідролітичної кислотності: [Чинний від 2015-04-01]. Київ: Держстандарт України, 2015. 15 с.

легкогідролізовані (мг/кг ґрунту) — за Корнфілдом (ДСТУ 7863:2015[5]); вміст рухомих сполук фосфору і калію (мг/кг ґрунту) — за Кірсановим (ДСТУ 4405:2005[6]).

Чисельність ґрунтових мікроорганізмів визначали методом посіву граничних розведень мікробних суспензій на агаризовані середовища, відповідні трофічним потребам основних фізіологічних груп мікроорганізмів за ДСТУ 7847:2015[7]. Кількість амоніфікаторів підраховували на м’ясо-пептонному агарі (МПА); мікроміцетів — на середовищі Чапека; бактерій, які живляться мінеральними формами азоту і стрептоміцетів — на крохмале-аміачному агарі (КАА); оліготрофні мікроорганізми — на голодному агарі (ГА); діазотрофи — на середовищі Ешбі; педотрофи — на ґрунтовому агарі (ГрА).

Спрямованість мікробіологічних процесів у ґрунті оцінювали за відповідними коефіцієнтами згідно з методикою, описаною в монографії К. А. Андреюк та ін. [5].

Коефіцієнт мінералізації розраховували за формулою:

$$К_м = С_{КАА}/С_{МПА}, \quad (1)$$

де $С_{КАА,} \cdot С_{МПА}$ — кількість мікроорганізмів, що виросли на, крохмале-аміачному та м'ясо-петонному агарах відповідно.

Коефіцієнт оліготрофності розраховували за формулою:

$$К_{ол} = С_{ГА}/(С_{КАА} + С_{МПА}), \quad (2)$$

де $С_{ГА}$ — кількість мікроорганізмів, що виросли на голодному агарі.

Коефіцієнт педотрофності розраховували за формулою:

$$К_{пед} = С_{ґр.А}/С_{МПА}, \quad (3)$$

де $С_{ґр.А}$ — кількість мікроорганізмів, що виросли на ґрунтовому агарі.

Активність основних біологічних процесів, перебіг яких відбувається за участі мікроорганізмів, визначали за показниками та методами, рекомендованими в монографії В. В. Волкогон та ін. [6]: вміст загальної біомаси мікроорганізмів у ґрунті — за регідратаційним методом (ДСТУ ISO 14240:2003[8]); інтенсивність емісії CO_2 або *«дихання»* ґрунту — за адсорбційним методом Штатнова (ДСТУ ISO 16072:2005[9]).

Статистичний аналіз застосовували на всіх етапах опрацювання експериментальних даних. Мікробіологічні дослідження проводили у п'ятикратній повторності; чисельність мікроорганізмів основних еколого-трофічних груп подавали як середнє арифметичне значення зі стандартною похибкою. На основі усереднених значень чисельності груп розраховували коефіцієнти спрямованості мікробіологічних процесів — мінералізації-іммобілізації, оліготрофності та педотрофності, а також показники загальної мікробної біомаси й інтенсивності емісії CO_2. Математичну та статистичну обробку експериментальних даних виконували з використанням програм Microsoft Excel 2019 та MiniTab 19. Статистичний аналіз проводили методом однофакторного дисперсійного аналізу (One-way ANOVA). Достовірність відмінностей між середніми значеннями варіантів досліду оцінювали за критерієм Фішера при рівні статистичної значущості $p \leq 0,05$.

3. Результати дослідження

Враховуючи, що ґрунтовий мікробіом є чутливим біоіндикатором здоров’я едафічної системи, особливо у кислих ґрунтах, де домінування ацидофільної мікробіоти гальмує азотфіксацію та підвищує ризик розвитку патогенів, було

[5] ДСТУ 7863:2015. Якість ґрунту. Визначення легкогідролізного азоту методом Корнфілда. [Чинний від 2016-07-01]. Київ: УкрНДНЦ, 2016. 9 с.

[6] ДСТУ 4405:2005. Якість ґрунту. Визначання рухомих сполук фосфору і калію за методом Кірсанова в модифікації ННЦ ІГА. [Чинний від 2006-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 10 с.

[7] ДСТУ 7847:2015 Якість ґрунту. Визначення чисельності мікроорганізмів у ґрунті методом посіву на тверде (агаризоване) живильне середовище. [Чинний від 2016-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2016. 26 с.

[8] ДСТУ ISO 14240:2003. Якість ґрунту. Визначення ґрунтової мікробної біомаси. Частина 1: Метод субстрат-стимульованого дихання. [Чинний від 2003-06-11]. Київ: Держстандарт України, 2004. 15 с.

[9] ДСТУ ISO 16072:2005. Якість ґрунту. Лабораторні методи визначення мікробного дихання ґрунту. [Чинний від 2006-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 33 с.

досліджено ефективність поєднання вапнування (доломітове борошно $CaMg(CO_3)_2$ у дозі 1,0–1,5 Нг або $CaCO_3$ у дозі 1,0 Нг) із диференційованим внесенням NPK. Польовий експеримент включав вісім варіантів, розроблених для забезпечення стабільної продуктивності сої на кислих ґрунтах, включаючи контроль (без добрив і вапнування), внесення NPK-добрив за рекомендованою дозою з урахуванням виносу основною або основною та побічною продукцією із двократним застосуванням мікродобрив позакоренево на фоні післядії вапнування.

На першому етапі роботи було проведено аналіз фізико-хімічних властивостей та агрохімічних характеристик ґрунту, у пробах, відібраних у 2025 р. (Табл. 2).

Таблиця 2

Фізико-хімічні та агрохімічні характеристики дерново-підзолистого ґрунту у шарі 0-20 см (2025)

Варіант польового досліду	pH_{KCl}	Гідролітична кислотність (Нг), ммоль/100 г ґрунту	Вміст елементів живлення, мг/кг ґрунту		
			N легкогідро-лізований	P_2O_5 рухомий	K_2O рухомий
1	4,09	2,29	47,8	168,3	59,5
2	5,60	0,79	57,6	222,9	77,9
3	5,81	0,79	65,8	248,3	109,6
4	5,91	0,90	63,5	228,3	98,9
5	5,48	1,11	72,9	245,9	138,1
6	5,53	0,96	59,5	220,4	92,3
7	6,20	0,84	67,4	284,0	128,6
8	6,18	0,88	66,8	238,3	102,3

Примітка: варіанти описано в табл. 1

Аналіз результатів дослідження свідчить, що ґрунт на варіанті контроль (1, без добрив) характеризувався критично низькими значеннями показників родючості, де сильно висока обмінна кислотність (pH = 4,09) та висока гідролітична кислотність (Нг – 2,29 ммоль/100 г ґрунту) обмежують рухомість поживних речовин, проте внесення меліорантів і добрив істотно змінює родючість ґрунту. Зокрема, застосування мінерального удобрення на фоні післядії вапнякових матеріалів у дозах 1,0–1,5 Нг дозволило змістити реакцію середовища до оптимальних для сої значень pH (5,6–6,2), що відповідає зниженню концентрації протонів (H^+) на один – два порядки. Найвищий ефект нейтралізації спостерігали у варіанті з комбінованим внесенням NPK та доломітового борошна.

Разом з тим, відомо, що на малобуферних кислих ґрунтах одноразове внесення навіть розрахункових доз вапна може призводити до ризику «вапняного шоку», різкого порушення кислотно-основної рівноваги та тимчасового пригнічення ґрунтової мікрофлори. Згідно з результатами монографії за редакцією М. А. Захарової [7], у постмілітарних умовах доцільніше застосовувати поетапне вапнування, розподіляючи повну дозу на 3–5 років. Такий підхід дозволяє уникнути стресів для біоти та забезпечує більш стабільне відновлення біогеохімічних процесів у ґрунті.

Щодо азотного режиму, використання повного комплексу мінеральних добрив, розрахованого на винос елементів живлення продукцією (варіант 5), забезпечило максимальне зростання вмісту в ґрунті легкогідролізованих сполук азоту, що істотно перевищує значення показника на контролі та варіанті із виключно азотним живленням (№ 6). Вміст рухомих сполук фосфору також підтверджує перевагу комплексного підходу: поєднання вапнування із внесенням NPK забезпечило істотне зростання концентрації P_2O_5, максимальне значення якої встановлено на варіанті 7. Натомість за кислих умов без належної меліорації спостерігається суттєве зниження доступності фосфору внаслідок його фіксації ґрунтовими компонентами. Аналогічна тенденція простежується і з калієм, вміст якого під впливом добрив зростає у два-три рази порівняно із контрольним варіантом, досягаючи максимуму при повному мінеральному забезпеченні (№ 5).

Таким чином, зрозуміло, що найбільш ефективним для оптимізації родючості кислих ґрунтів є поєднання вапнування зі збалансованим живленням (NPK + мікродобрива). Однак у виробничих умовах, особливо в зоні поширення кислих ґрунтів, рекомендується переходити від одноразового до поетапного внесення меліорантів з метою мінімізації агроекологічних ризиків. При цьому важливо контролювати доступність мікроелементів (Zn, Cu, Mn, Co), оскільки при pH > 6,0 можливе зниження їх доступності, тому у виробництві рекомендується проводити листкове підживлення мікроелементами.

Із метою аналізу впливу згаданих агрохімічних трансформацій ґрунту на структуру мікробного угруповання, що є одним з ключових індикаторів його стану, було проведено визначення чисельності основних еколого-трофічних груп мікроорганізмів в досліджуваному агроценозі сої. Задля зручності порівняння та наочності змін, що відбувались, кількість мікроорганізмів кожної групи у контрольному варіанті було позначено як 100 %, а число мікроорганізмів інших варіантів виражали у зміні відсоткового співвідношення відносно нього (Рис. 1). Таким чином, легко побачити, зміну (збільшення чи зменшення) чисельності певних мікроорганізмів під впливом різних систем удобрення та вапнування.

Так, експериментальні дані демонструють виразну залежність структури мікробного ценозу у ґрунті ризосфери сої від застосовуваних агротехнічих заходів на кислих дерново-підзолистих ґрунтах. У контрольному варіанті чисельність амоніфікувальних бактерій становила 5,04 млн КУО/г, мікроміцетів — 50,40 тис. КУО/г, що відображає типовий для неокультурених кислих ґрунтів грибно-оліготрофний тип деструкції органічної речовини. Олігонітрофіли переважають над амоніфікаторами (8,42 млн порівняно з 5,04 млн), а педотрофи утримуються на рівні 3,28 млн КУО/г.

Вапнування доломітовим борошном у дозі 1,0 Нг (варіант 2) знижує чисельність амоніфікаторів до 4,00 млн КУО/г і мікроміцетів до 29,07 тис. КУО/г, тоді як олігонітрофіли залишаються на високому рівні (8,72 млн КУО/г), що свідчить про стабілізацію оліготрофного стану за умови нейтралізації кислотності.

Застосування мінеральних добрив NPK у поєднанні з мікродобривами суттєво змінює структуру мікробіоценозу, стимулюючи бактеріальну складову та пригнічуючи грибну. Найвища чисельність амоніфікаторів зафіксована у варіанті 5 (фон + $N_{65}P_{50}K_{75}$ + МД) — 18,53 млн КУО/г, що в 3,7 раза перевищує контроль. Високі значення цієї групи також характерні для варіантів 7 (16,05 млн) та 6 (14,04 млн). Аналогічно зростає кількість бактерій, які використовують мінеральні форми азоту, — до 2,43 млн КУО/г у варіанті 5, та стрептоміцетів (актинобактерій-антагоністів) – до 2,00 млн КУО/г у тому ж варіанті (відносно 0,97 млн у контролі).

Чисельність мікроміцетів різко знижується за інтенсивного удобрення: мінімум 18,17 тис. КУО/г у варіанті 3 ($N_{45}P_{60}K_{60}$ + МД), що в 2,8 раза менше, ніж у контролі. У варіантах 4–8 цей показник коливається в межах 25,20–32,70 тис. КУО/г, що вказує на переорієнтацію деструкції органічної речовини з грибного на бактеріальний шлях.

Оліготрофи досягають максимуму у варіанті 3 (3,23 млн КУО/г), педотрофи — у варіантах 5, 6 та 8 (3,71–3,82 млн КУО/г), олігонітрофіли — у варіанті 4 (11,41 млн КУО/г). У варіанті 7 (з підвищеною дозою доломіту) олігонітрофіли знижуються до 7,06 млн КУО/г, що корелює із покращенням трофічного режиму та підвищенням доступності поживних речовин.

Загалом, внесення повного комплексу NPK у поєднанні з мікродобривами стимулює деструкцію органіки (амоніфікатори), азотне живлення (бактерії мінерального азоту), антагонізм до патогенів (стрептоміцети) та пригнічує грибну мікробіоту, що знижує ризик розвитку фітопатогенних мікроміцетів, до яких соя особливо чутлива. Вапнування стабілізує ці процеси, сприяючи високій активності олігонітрофілів і педотрофів (варіант 7 та 8).

Найбільш сприятливий вплив на мікробний ценоз сформувався у 5 варіанті, де забезпечується максимальна стимуляція розвитку корисних бактеріальних груп (амоніфікатори, стрептоміцети, бактерії мінерального азоту) та сильне пригнічення грибів, що є ключовим для підвищення родючості та можливого поліпшення

фітосанітарного стану ґрунту під сою. Варіант 3 є оптимальним для забезпечення максимального контролю грибної мікробіоти, а 7 варіант — для збалансованого поліпшення трофічного режиму та стабілізації мікробіоценозу за високого pH.

Відповідно, інтегроване застосування вапнування (1,0–1,5 Нг) разом із мінеральними добривами та мікродобривами нейтралізує ґрунтову кислотність, підвищує значення pH і створює сприятливі умови для розвитку нейтрофільних та евтрофних бактерій. Це спричинює переорієнтацію мікробіоценозу в бік бактеріально-евтрофного типу — найчастіше зі збільшенням відносної частки *Proteobacteria, Bacteroidetes* та *Actinobacteria* і зменшенням оліготрофних груп (наприклад, *Acidobacteria*) [8, 9, 10, 11].

Активізація бактеріальної спільноти прискорює мінералізацію органічних речовин, підвищує мікробіологічну активність і посилює конкурентний антагонізм корисних бактерій щодо фітопатогенів, що в сукупності знижує фітопатогенні ризики та сприяє природній супресивності ґрунту. Це особливо важливо для сої, яка потребує нейтральної реакції середовища, високої доступності азоту та фосфору, а також захисту від грибних інфекцій. Рекомендується поєднання вапнування із застосуванням NPK в дозах, розрахованих на винос продукції (варіанти 5 та 7) разом із мікродобривами та подальшим обов'язковим моніторингом агрохімічних і мікробіологічних показників для уникнення ризиків переазотування та надмірної фіксації фосфору.

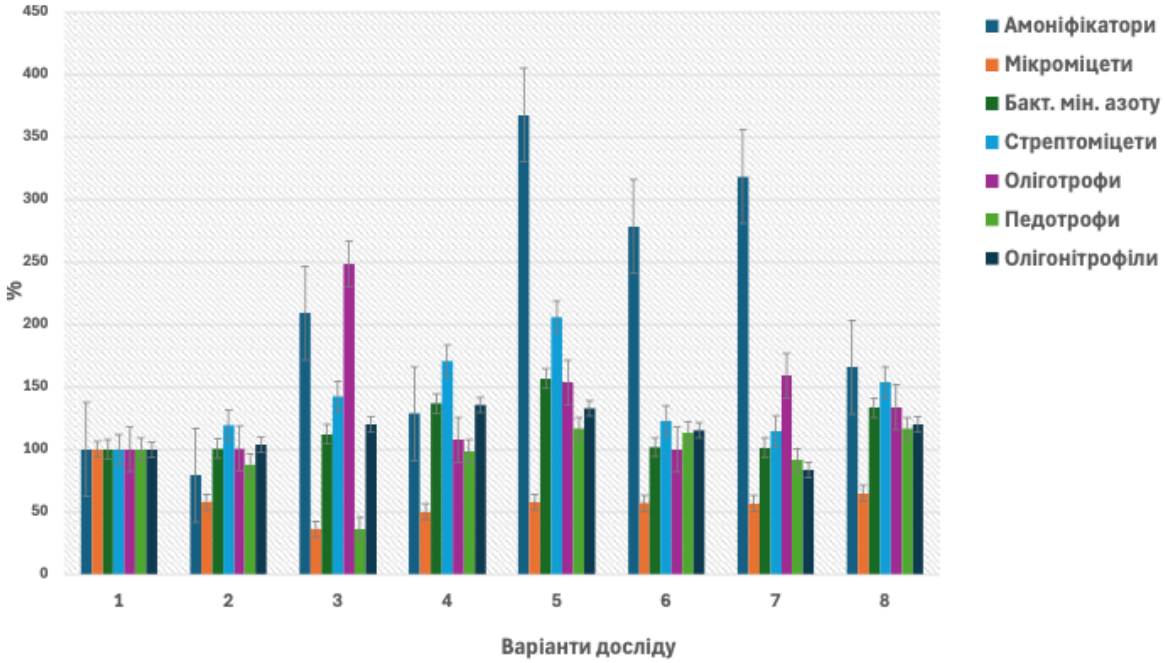

Рис. 1. *Чисельність мікроорганізмів основних еколого-трофічних груп у ризосфері сої (%, відносно контролю). Склад варіантів досліду див. у табл. 1.*

Показано, що застосована схема досліду призводить до агрохімічних трансформацій, що зумовлюють перебудови складу мікробного угруповання у ґрунті: підвищення значень pH та внесення NPK ініціюють інтенсивне зростання корисних еколого-трофічних груп, таких як амоніфікатори, нітротрофи та стрептоміцети, чисельність яких зростає в рази. Водночас, нейтралізація кислотності призводить до суттєвого пригнічення кислотолюбних компонентів, зокрема мікроміцетів, що знижує ризик розвитку фітопатогенних грибів, тоді як активізація бактеріальних груп може сприяти ефективнішій азотфіксації та антагонізму патогенів. Таким чином, застосовані заходи не лише викликали поліпшення фізико-хімічних властивостей ґрунту, але й оптимізували біологічну складову ґрунту, посилюючи її функціональний потенціал та стійкість для забезпечення високої продуктивності сої [12].

Наступним етапом досліджень був аналіз загальної мікробної біомаси та інтенсивності ґрунтового дихання (емісії CO_2) у ризосфері сої. Ґрунтове «дихання» є ключовим показником біологічної активності ґрунту, оскільки інтегрує метаболічну функцію його живого компоненту: процес включає поглинання кисню з атмосфери та виділення CO_2 як кінцевого продукту окиснювального розпаду органічних речовин, що слугує джерелом вуглецю для рослин. Інтенсивність емісії CO_2 безпосередньо відображає швидкість деструкції органічного матеріалу, корелюючи з обсягом розкладеної речовини та розвитком мікроорганізмів, пов'язаним із вмістом органічних сполук. Отже, моніторинг ґрунтового «дихання» є критичним інструментом для оцінки метаболічної активності та загального функціонування ґрунтового мікробіому.

Комплексний аналіз показав, що застосування NPK-добрив у поєднанні з вапнуванням кардинально трансформує склад мікробного угруповання кислого ґрунту під соєю, переходячи від системи, де домінують гриби із високою біомасою (як у контролі, 65,87 мкг С/г), до більш ефективної бактеріоцентричної системи. Хоча удобрення (NPK) знижує інтенсивність ґрунтового дихання (в середньому на 5,3 мг CO_2/кг), воно значно підвищує загальну мікробну біомасу (в середньому до 92,43 мкг С/г), що свідчить про активізацію та підвищення метаболічної ефективності мікроорганізмів. Вапнування, підвищуючи pH та нейтралізуючи кислотність, є ключовим драйвером цього процесу: воно стабілізує біомасу та максимізує дихання, зокрема, у варіанті 7, оскільки нейтральне середовище сприяє активності бактерій. Ця трансформація сприятлива для сої, оскільки стимулює розвиток корисних груп (азотфіксатори та стрептоміцети), водночас пригнічуючи гриби, але підвищення значень CO_2-емісії (на 20–40 % у короткостроковій перспективі) вимагає моніторингу для забезпечення сталості вмісту вуглецю у ґрунті. Таким чином, для оптимального балансу родючості (досягнення pH 5,5–6,5) та біологічної активності рекомендується поєднання вапнування з NPK на винос продукції (варіанти 4, 5 і 7) з обов'язковим урахуванням ризиків переазотування, що може інгібувати мікробну біомасу (як у варіанті 6).

Для оцінки спрямованості мікробіологічних процесів у ґрунті та більш глибокого аналізу можливих змін у структурі ґрунтового біотичного комплексу, було визначено коефіцієнти (Табл. 3): мінералізації та іммобілізації, який дає можливість охарактеризувати напруженість мінералізаційних процесів; оліготрофності, який віддзеркалює забезпеченість ґрунту легкозасвоюваними поживними речовинами та педотрофності. Ці дані відображають зміну мікробних процесів у ризосфері сої, залежно від внесених речовин, як поступовий перехід від активних копротрофних умов (з домінуванням мінералізації свіжої органіки) до іммобілізаційних, що опосередковано вказує на посилення стабілізації та гуміфікації органічних речовин.

Таблиця 3

Спрямованість мікробіологічних процесів у ґрунті в ризосфері сої

Варіант	Коефіцієнт оліготрофності	Коефіцієнт мінералізації-іммобілізації азоту	Коефіцієнт педотрофності
1	0,22	0,31	0,65
2	0,25	0,39	0,72
3	0,27	0,17	0,11
4	0,17	0,33	0,50
5	0,10	0,13	0,21
6	0,09	0,11	0,26
7	0,12	0,10	0,19
8	0,18	0,25	0,46

Так, ми виявили, що варіанти 1–3 характеризуються оліготрофним станом із вираженим переважанням іммобілізації азоту. Коефіцієнт оліготрофності коливається в межах 0,22–0,27, що вказує на менший вміст легкодоступних поживних речовин порівняно з іншими варіантами досліду, тоді як коефіцієнт мінералізації-іммобілізації становить 0,17–0,39, свідчачи про активне зв'язування

азоту в мікробній біомасі та обмежене його вивільнення в доступній для рослин формі. Коефіцієнт педотрофності у варіантах 1 та 2 перевищує 0,65, що відображає високу частку адаптованих форм мікроорганізмів. Така ситуація створює дефіцит доступного мінерального азоту в ґрунті, що є ключовим сигналом для сої: саме за таких умов рослина активно виділяє кореневі ексудати (флавоноїди, ізофлавоноїди), стимулюючи формування симбіотичних бульбочок з азотфіксувальними бактеріями *Bradyrhizobium japonicum* [13]. Це сприяє розвитку ефективного симбіозу та забезпеченню культури власним азотом, однак обмежує швидке надходження готових форм азоту з ґрунту та може знижувати короткострокову продуктивність за відсутності достатньої симбіотичної фіксації. Варіант 3 вирізняється особливо низьким коефіцієнтом педотрофності (0,11), що свідчить про суттєве пригнічення специфічних форм ґрунтових мікроорганізмів під впливом інтенсивного NPK-удобрення та можливе наближення до стресових умов існування частини мікробного угруповання.

Варіант 4 займає проміжне положення з переходом до більш евтрофного стану. Коефіцієнт оліготрофності знижується до 0,17, що вказує на поліпшення забезпеченості поживними речовинами, коефіцієнт мінералізації-іммобілізації дорівнює 0,33, відображаючи переважання іммобілізації, а коефіцієнт педотрофності становить 0,50, демонструючи помірну частку ґрунтових специфічних форм. Такий профіль забезпечує стабільне зв’язування азоту в мікробній біомасі без значних втрат, сприяє помірному гумусоутворенню та підтримує середньострокову родючість ґрунту під соєю.

Варіанти 5–8 характеризуються чітко евтрофним станом з домінуванням іммобілізаційних процесів. Коефіцієнт оліготрофності становить 0,09–0,18, що свідчить про більшу забезпеченість поживними речовинами та низьку залежність від бідних субстратів, тоді як коефіцієнт мінералізації-іммобілізації коливається в межах 0,10–0,25, вказуючи на сильне зв’язування азоту в мікробній біомасі та активне гумусоутворення. Коефіцієнт педотрофності варіює від 0,19 до 0,46, що відображає помірну частку специфічно ґрунтових форм. Такий тип процесів сприяє накопиченню органічної речовини в ґрунті, зменшенню втрат азоту через вимивання, підвищенню мікробної біомаси та формуванню довготривалої родючості. Водночас високий рівень доступного азоту в цих варіантах (особливо у варіанті 5) може пригнічувати симбіотичну азотфіксацію сої, оскільки рослина віддає перевагу легкодоступним формам азоту з ґрунту, зменшуючи витрати енергії на утримання бульбочок та азотфіксувальних бактерій. Варіанти 5 і 7 мають особливо низькі значення педотрофності (менше 0,25), що може вказувати на часткове пригнічення типових для ґрунту мікроорганізмів під високим азотним навантаженням, тоді як варіанти 6 і 8 демонструють більш збалансований стан з педотрофністю 0,26–0,46.

Таким чином, варіанти 1–3 з помірним розвитком оліготрофних груп та сильною іммобілізацією створюють сприятливі умови для розвитку симбіотичної азотфіксації соєю, оскільки дефіцит доступного азоту стимулює рослину до активної взаємодії із бульбочковими бактеріями *Bradyrhizobium japonicum*, однак обмежують швидке забезпечення культури мінеральним азотом. Варіант 4 є перехідним і збалансованим. Варіанти 5–8 з сильною евтрофністю та іммобілізацією, які, своєю чергою, служать чинником накопичення органіки, збільшення мікробної біомаси та забезпечення довготривалої родючості, але також можуть послаблювати симбіотичну азотфіксацію через надлишок доступного азоту. Найбільш виражені евтрофні профілі спостерігаються у варіантах 5, 6 та 7, що робить їх перспективними для інтенсивних технологій вирощування сої за умови контролю балансу поживних речовин і моніторингу ефективності симбіозу.

Порівняно із типовим оліготрофним станом (коефіцієнт оліготрофності >1, що свідчить про адаптованість мікробного ценозу до низької доступності поживних речовин та переважання розкладання стійких форм органіки; коефіцієнт мінералізації-іммобілізації ≈0,7, що вказує на помірну мінералізацію з активним використанням гумусу для підтримки угруповання), дані таблиці описують значно менш стресові, але більш динамічні умови, характерні для удобрених агроценозів.

У таких системах коефіцієнт оліготрофності знижується до 0,09–0,27 (нижче 1), що забезпечує швидкий старт копротрофних процесів і перехід до евтрофного стану з високою забезпеченістю поживними речовинами, на відміну від оліготрофної стратегії «виживання» в умовах низької забезпеченості поживними речовинами.

Оптимальними, стосовно екологічно орієнтованого землеробства, є варіанти 5–8, де коефіцієнт оліготрофності становить 0,09–0,18; коефіцієнт мінералізації-іммобілізації – 0,10–0,25; та коефіцієнт педотрофності – 0,19–0,46. Ці показники відображають сильну евтрофність, домінування іммобілізаційних процесів і помірну частку ґрунтово-специфічних форм. Такий баланс сприяє накопиченню органічної речовини, зменшенню втрат азоту через вимивання, збільшенню мікробної біомаси та формуванню більш довготривалої родючості ґрунту із мінімальними екологічними ризиками, зокрема нижчою інтенсивністю емісії CO_2 порівняно з варіантами з активною мінералізацією. Це може сприяти підвищенню врожайності сої завдяки посиленню діяльності целюлозоруйнівних мікроорганізмів (розклад стійкої органіки) та підтримці азотфіксаторів, зберігаючи при цьому стабільність мікробіоценозу.

У ситуаціях оліготрофної стійкості на бідних ґрунтах під посівами сої (коефіцієнт оліготрофності >1 та мінералізації ≈ 0,7) ключовим завданням є інтеграція меліоративних заходів (наприклад, внесення доломітового борошна) з регулярним моніторингом коефіцієнта педотрофності. Якщо цей показник падає нижче 0,25–0,30, рекомендується негайне застосування органічних добрив для відновлення частки ґрунтово-адаптованих форм. Такий персоналізований підхід, що враховує поточний мікробний стан ґрунту, забезпечує стабільність мікробіоценозу та підвищує екологічну ефективність вирощування культури.

Ефективність персоналізованих агротехнологій ґрунтується на фундаментальних механізмах реакції мікробного ценозу на зовнішнє втручання, що підтверджується порівнянням з глобальними дослідженнями. Зокрема, робота A. Y. Srour et al. (2020), присвячена довготривалому впливу обробітку ґрунту та NPK-добрив на мікробні угруповання в ротації кукурудза-соя на нейтральних ґрунтах, демонструє аналогічні тенденції [14]. У цьому дослідженні також спостерігається стимулюючий ефект NPK на корисні бактеріальні групи (оліготрофи, амоніфікатори), які сприяють трофічним зрушенням від копротрофних до евтрофно-іммобілізаційних процесів, поліпшують цикли азоту та часто демонструють здатність до пригнічення грибкових патогенів.

Цей спільний напрям трансформацій мікробного співтовариства, зафіксований у нашому багаторічному експерименті, не лише підтверджує власні емпіричні дані про зростання мікробної біомаси та метаболічної активності, але й розкриває ширший механізм дії. Вапнування в поєднанні з мінеральними макро- та мікродобривами посилює стійкість мікробіому сої, знижує фітопатогенні загрози та сприяє тривалому підтриманню родючості ґрунту через активацію ключових екосистемних процесів – гумусоутворення та збалансованого циклу вуглецю.

Така подібність трансформацій мікробіоценозу (зсув у бік бактеріально-евтрофного типу і зменшенням оліготрофних груп) набуває особливої ваги, оскільки незалежні багаторічні польові спостереження інших дослідників (зокрема, результати тривалих експериментів з вапнуванням і застосуванням NPK-добрив у різних типах ґрунтів) валідують наші короткострокові висновки щодо потенціалу мінеральних добрив для оптимізації мікробних угруповань у бобових агроценозах, де симбіотична азотфіксація відіграє ключову роль.

Результати свідчать про залежність спрямованості мікробіологічних процесів у ґрунті від застосованих агрохімічних заходів. У різних варіантах удобрення спостерігається перехід мікробного співтовариства від помірно оліготрофного до евтрофного стану з переважанням іммобілізаційних процесів.

Цей напрям трансформацій узгоджується з даними незалежних багаторічних польових досліджень, які також демонструють позитивний вплив комбінованого застосування вапнування та мінеральних добрив на структуру і функціонування мікробіоценозу.

Загалом, інтегроване використання агрохімічних засобів сприяє підвищенню стійкості мікробіому, активізації процесів гумусоутворення та підтриманню довготривалої родючості ґрунту в агроценозах сої, де важливу роль відіграє симбіотична азотфіксація.

4. Обговорення: аналіз результатів дослідження

Здобуті результати експерименту демонструють високу репрезентативність та корелюють із сучасними науковими тенденціями щодо впливу інтегрованих агрономічних заходів (вапнування + збалансоване мінеральне удобрення) на функціонування ґрунтового мікробіому в кислих дерново-підзолистих ґрунтах під посівами сої. Це обґрунтовує використання комплексної методики «NPK-вапнування» як ефективного методу оптимізації живлення сої на кислих ґрунтах Полісся. Підтверджений нами дефіцит рухомого фосфору та калію узгоджується із висновками А. О. Христенка та ін. [15]. Проте наше дослідження доповнює ці відомості мікробіологічними показниками: зростання кількості амоніфікаторів до 18,53 млн КУО/г свідчить про те, що система «NPK-вапнування» активізує внутрішні ресурси ґрунту навіть без використання додаткових біопрепаратів.

Зіставлення наших результатів із науковою працею С. В. Рєзніка [16] ілюструє ідентичний вектор біологічних трансформацій у мікробіоценозі посівів сої – перехід від процесів агресивної деструкції органіки (копротрофний тип) до фази біологічної стабілізації. Попри певні відмінності в об’єктах дослідження (типові чорноземи проти дерново-підзолистих кислих ґрунтів) та варіативність коефіцієнта мінералізації (Кмін), обидві роботи солідарні в питанні домінантної ролі бактеріального компонента для забезпечення резистентності агросистем. Наше дослідження деталізує цей механізм, впроваджуючи чітко визначені параметри педотрофності та функціональної активності азотфіксаторів, що фактично доповнює регіональні аналітичні дані з Лісостепу універсальними екологічними індикаторами.

Визначений в нашому дослідженні ефект комплексної дії факторів на вдосконалення мікробіоценозу сої отримує обґрунтування у базовій ідеї, запропонованій G. Agegnehu et al. [17]. Ці автори доводять, що застосування вапна слугує незамінним засобом для усунення надмірної кислотності, тим самим формуючи умови для тих явищ, які ми зафіксували в експериментах. Зокрема, згадана публікація констатує зростання біодоступності елементів P, Ca та Mg у ґрунтовому розчині, поряд з потужним активуванням мікробіологічних перетворень, насамперед азотфіксації та мінералізації органічних сполук, що узгоджується з нашими спостереженнями щодо стимуляції цих процесів у мікробіоценозі сої. Орієнтуючись на інформацію з [17], можна зробити висновок, що подібний сприятливий вплив на ґрунтове середовище може компенсувати шкідлива дія мобільного алюмінію, типова для кислих ґрунтів, проте ця проблема вимагає спеціалізованих подальших досліджень у контексті згаданих умов. Крім того, базуючись на теоретичних обчисленнях та глобальному практичному досвіді, ці меліоративні практики закладають основу для можливого збільшення продуктивності культури в діапазоні від 29 до 46 %.

Суттєвим аспектом є те, що вапнування запускає значну трофічну трансформацію мікробної спільноти: з одного боку, це призводить до витіснення ацидофільних груп більш ефективними та корисними асоціаціями мікроорганізмів, а з іншого — до створення стійкого біоценозу, пристосованого до нейтрального значення pH.

Водночас ми повністю поділяємо застереження зарубіжних науковців стосовно потреби в регулярному контролі параметрів pH та динаміки мікробіоти. Такий підхід є вкрай необхідним для уникнення екологічних загроз, які потенційно можуть з'явитися через можливе перевищення рекомендованих доз меліорантів чи мінеральних азотних добрив.

Аспект стабілізації мікробного середовища, виявлений у результатах нашого дослідження, гармонійно узгоджується з теоретичними положеннями,

викладеними в огляді А. С. Левішко та П. М. Маменко [13]. Ці науковці трактують застосування біопрепаратів як потужний і ефективний напрям у вдосконаленні процесів живлення рослин, однак, подібно до наших висновків, вони підкреслюють, що ефективність роботи азотфіксаторів (зокрема, *Rhizobium* та *Azotobacter*) і фосформобілізаторів суворо обмежується рівнем pH у ґрунті. Особливо критичним є те, що за низьких значень pH формування симбіозу сої з бульбочковими бактеріями *Bradyrhizobium japonicum* практично не відбувається або кількість утворених бульбочок є критично малою. Це зумовлено сильним пригніченням росту бактерій, порушенням експресії nod-генів бактерій, порушенням сигнального обміну (вироблення Nod-факторів), токсичністю Al^{3+} і Mn^{2+}, а також зниженням доступності Ca^{2+}, необхідного для прикріплення та інфекції кореневих волосків. Також, нейтралізація кислотності запускає чітко визначену послідовність змін: помітне зростання популяції олігонітрофільних мікроорганізмів супроводжується паралельним стримуванням розвитку ацидофільних видів грибів. Ключовим елементом, що об'єднує наші погляди, слугує визнання протилежного, антагоністичного ефекту від надмірних доз мінерального азоту на функціонування симбіотичних мікроорганізмів. Саме це обґрунтовує впровадження нами підходу з точним, прецизійним дозуванням NPK як фундаментальної основи, яка в перспективі дозволить реалізувати синергетичний ефект у поєднанні з біологічними агентами.

Підбиваючи підсумки, здійснений нами порівняльний огляд підтверджує значну надійність і наукову оригінальність здобутих даних. Вони не тільки віддзеркалюють і повторюють ключові глобальні та регіональні тенденції в аграрній науці, але й суттєво доповнюють їх детальними, конкретними кількісними показниками, пристосованими до специфіки Поліського регіону з його кислими ґрунтами. Такий підхід закладає міцну платформу для подальшої інтенсифікації систем рослинництва, де пріоритетним акцентом є максимальна активація природних біологічних механізмів. Водночас, сформований нами сприятливий мікробіологічний фон є необхідним фундаментом для подальшого обов'язкового впровадження спеціалізованих мікробних препаратів, оскільки саме їх поєднання з оптимізованим живленням дозволить повною мірою реалізувати потенціал агроценозу. Це робить наші рекомендації не лише доступними для локальних господарств на першому етапі, а й визначає чітку стратегію підвищення врожайності через системне застосування біоагентів у майбутньому.

5. Висновки

Проведене дослідження показало, що об'єднане застосування вапнування з NPK істотно впливає на структуру й функціональну активність мікробних угруповань ризосфери сої. Зафіксовано тенденцію до зростання чисельності корисних екологічно й агрономічно значущих груп мікроорганізмів (амоніфікаторів, нітротрофів, стрептоміцетів) на тлі зменшення частки мікроміцетів, у тому числі потенційно фітопатогенних. Збільшення мікробної біомаси у 1,5–1,6 раза та стабілізація значень мікробного дихання свідчать про посилення процесів стабілізації органічної речовини й підвищення біологічної стійкості ґрунту.

У варіантах із помірною оліготрофією та високим рівнем іммобілізації азоту формуються сприятливі умови для розвитку симбіотичної азотфіксації сої з *Bradyrhizobium japonicum*. Обмежена доступність мінерального азоту стимулює активізацію симбіотичних взаємодій, тоді як оптимізація кислотно-лужного режиму ґрунту є критично важливою умовою формування ефективного бульбочкового апарату та стабільної фіксації атмосферного азоту.

Отримані результати узгоджуються з сучасними світовими уявленнями про ключову роль нейтралізації ґрунтової кислотності в активації процесів азотфіксації та підвищенні біодоступності елементів живлення. Реалізація таких агрохімічних прийомів має потенціал для суттєвого зростання продуктивності сої, за умови системного контролю показників pH і стану мікробіоти з метою запобігання розвитку антагоністичних взаємодій у ризосфері.

Найвищу ефективність продемонстрували варіанти 5 (NPK на винос продукції) та 7 (вапнування + NPK), які забезпечили оптимальний кислотно-лужний баланс ґрунту та високу метаболічну активність мікробного комплексу. Запропоновані підходи формують наукове підґрунтя для екологічної інтенсифікації землеробства, що базується на активації природних регуляторних механізмів і створює синергію з подальшим застосуванням біологічних препаратів. Використання показників мікробіоти як функціональних індикаторів дозволяє об'єктивно верифікувати ефективність агротехнологій і забезпечити довготривалу стабільність агроекосистем.

Список використаних джерел

1. Shemetun K., Balaev A., Tonkha O., Pikovska O. Microbiological assessment of sod-medium podzolic soil using various elements of biologisation. *Plant and Soil Science.* 2022. Vol. 13. Iss. 2. P. 52-58. https://doi.org/10.31548/agr.13(2).2022.52-58

2. Wenyika P., Enesi R. O., Gorim L. Y., Dyck M. Effects of liming on soil biota and related processes in agroecosystems: a review. *Discover Soil*. 2025. Vol. 2. Article 37 https://doi.org/10.1007/s44378-025-00063-2

3. Polishchuk V., Klymenko T., Stotska S., Pototska S. Soil microbiological activity in winter rye crops under different fertilisation systems and biopreparations. *Scientific Horizons*. 2025. Vol. 28. Iss. 10. P. 77-84. https://doi.org/10.48077/scihor10.2025.77

4. Господаренко М. Г. Система застосування добрив : підручник. Київ: ТОВ «ТРОПЕА», 2022. 376 с.

5. Андреюк К. І., Іутинська Г. О., Антипчук А. Ф., Валагурова В. О., Пономаренко С. П. Функціонування мікробних ценозів ґрунту в умовах антропогенного навантаження. Київ: Обереги, 2001. 240 с.

6. Волкогон В. В., Надкернична О. В., Токмакова Л.М. та ін. Експериментальна ґрунтова мікробіологія / за ред. В. В. Волкогона. Київ: Аграрна Наука. 2010. 464 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Boykaya/0035982.d jvu

7. Наукові засади інноваційної системи оцінювання та повоєнного відновлення екологічного стану гідродефіцитних, галогенних, гідроморфних і кислих ґрунтів : монографія; за ред. М. А. Захарової. Київ: Аграрна наука, 2026. 224 с. https://doi.org/10.31073/978-540-671-6

8. Гудзь, С. О., Сківка, Л. М. Особливості формування еубактеріального комплексу ризосфери пшениці озимої (*Triticum durum*) за різних систем удобрення. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Біологія.* 2020. Т. 81. № 2. С. 31–36. https://doi.org/10.17721/1728_2748.2020.81.31-36

9. Дем'янюк О. С. Екологічні основи функціонування мікробіоценозів ґрунту агроекосистем в умовах змін клімату : дис. канд. с.-г. наук / Ін-т агроекології і природокористування НААН України. 2020. URL: https://agroeco.org.ua/wp-content/uploads/pdf/dissertation/ecology/demianiyk/dis_demianijuk.pdf

10. Малиновська І. М., Сорока О. П., Пташнік М. М., Кургак В. Г. Вплив режимів використання та удобрення спонтанно відновлюваного травостою на перебіг ґрунтових мікробіологічних процесів. *Сільськогосподарська мікробіологія.* 2021. Т. 33. С. 55–61. https://doi.org/10.35868/1997-3004.33.55-61

11. Paes da Costa D., da Silva, T. das G. E., Araujo A. S. F., Pereira A. P. A., Mendes L. W., Borges W. S., … Medeiros A. V. (2024). Soil fertility impact on recruitment and diversity of the soil microbiome in sub-humid tropical pastures in Northeastern Brazil. *Scientific Reports.* 2024. Vol. 14. Iss. 1. Article 3919. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54221-7

12. Bargaz A., Lyamlouli K., Chtouki M., Zeroual Y., Dhiba D. Soil microbial resources for improving fertilizers efficiency in an integrated plant nutrient management system. *Frontiers in Microbiol*ogy. 2018. Vol. 9. Article 1606. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01606

13. Левішко А. С., Маменко П. М. Мікробні добрива та шляхи оптимізації ефективності їх застосування у рослинництві. *Агроекологічний журнал.* 2025. № 2. С. 109-122. https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2025.333832

14. Srour A. Y., Ammar H. A., Subedi A., Pimentel M., Cook R. L., Bond J., Fakhoury A. M. Microbial Communities associated with long-term tillage and fertility treatments in a corn-soybean cropping system. *Frontiers in Microbiology.* 2020. *Vol.* 11. Article 1363. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01363

15. Христенко А. О., Лісовий М. В., Волошенюк О. П. Рівень трофності орних ґрунтів України та перспективні напрями оптимізації живлення сільськогосподарських культур у сучасних умовах (експертний аналіз). *Агрохімія і ґрунтознавство:* міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІҐА ім. О. Н. Соколовського". Харків, 2025. Вип. 98. С. 69–83. https://doi.org/10.31073/acss98-05

16. Резнік С. В. Вплив різних систем землеробства на еколого-трофічні угруповання мікроорганізмів чорноземів типових в умовах Лівобережного лісостепу України. *Сільськогосподарська мікробіологія.* 2021. Т. 33. С. 62–71. https://doi.org/10.35868/1997-3004.33.62-71

17. Agegnehu G., Amede T., Erkossa T., Yirga C., Henry C., Tyler R., … Sileshi G. W. Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B. Soil & Plant Science.* 2021. Vol. 71. Iss. 9. P. 852–869. https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239

UDC: 631.427.2:635.655

The effect of integrated application for fertilizers and ameliorants on the microbiocenosis of acidic sod-podzolic soil within the soybean rhizosphere

A. S. Levishko[1, a,✉], I. I. Gumeniuk[1, b], P. M. Mamenko[1 c], O. Yu. Kolodiazhnyi[1, d], L. A. Yashchenko[2, e], G. F. Rovna[2, f]

[1]Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS, *Kyiv, Ukraine*
[2]Institute of Agriculture of Western Polissia of NAAS, *Shubkiv v., Rivne region, Ukraine*

✉ alodua2@gmail.com

ORCID: [a] 0000-0003-4037-1730, [b] 0000-0002-6692-0171, [c] 0009-0001-9945-8462, [d] 0000-0001-5359-1738, [e] 0000-0003-1407-0133, [f] 0000-0002-7599-5650

Received 24.02.2026; Revised 03.06.2026; Accepted 08.06.2026; Available online 30.06.2026

Abstract

The article presents the results of a study of the impact of integrated agrochemical land reclamation of acidic (pH=4.09) sod-podzolic sandy loam soil (Albic Arenosols) on the structure and functional activity of soil microbiocenosis in the soybean rhizosphere. The study was conducted in 2024–2025 at the experimental field of the Institute of Agriculture of Western Polissya NAAS, in the Rivne region. The field experiment program included 8 treatments combined liming with dolomite flour or calcium carbonate in doses equivalent to 1.0–1.5 units of hydrolytic acidity with differentiated application of NPK fertilizer and two-time foliar feeding with micronutrients. Integrated agromelioration increased soil solution pH to 5.48–6.20 and reduced hydrolytic acidity by 2–3 times. These changes created favorable conditions for the intensification of microbiological processes: the abundance of ammonifying bacteria increased 3.7-fold, reaching a maximum of 18.53 million CFU/g; streptomycetes were activated; and the population of micromycetes decreased 2.8-fold. Organic matter decomposition shifted from a predominantly fungal pathway to a more energy-efficient bacterial pathway. Microbial biomass reached its maximum value of 105.56 μg C/g under the combined application of dolomite flour and moderate fertilizer rates, which was associated with the stabilization of CO_2 emissions. The highest efficiency was observed in treatments based on liming with dolomite flour at a rate equivalent to 1.5 units of hydrolytic acidity combined with micronutrient fertilizers. These treatments promoted the formation of a eutrophic microbiocenosis with a low oligotrophy coefficient of 0.09–0.18 and high metabolic activity. The results demonstrate that integrated agrochemical amelioration can serve as a basis for the ecologization of agriculture on acidic soils, allowing high soybean productivity to be combined with the preservation of humus balance and biodiversity.

Keywords**:** soil; soybean; liming; NPK fertilizers; microbiocenosis; nitrogen fixation; agroecosystem.

Cite**:** Levishko, A. S., Gumeniuk, I. I., Mamenko, P. M., Kolodiazhnyi, O. Yu., Yashchenko, L. A., & Rovna, G. F. The effect of integrated application for fertilizers and ameliorants on the microbiocenosis of acidic sod-podzolic soil within the soybean rhizosphere. *AgroChemistry and Soil Science, 100*, 59–72. https://doi.org/10.31073/acss100-05 [in Ukrainian].

This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

References

1. Shemetun, K., Balaev, A., Tonkha, O., & Pikovska, O. (2022). Microbiological assessment of sod-medium podzolic soil using various elements of biologisation. *Plant and Soil Science*, *13*(2), 52–58. https://doi.org/10.31548/agr.13(2).2022.52-58

2. Wenyika, P., Enesi, R. O., Gorim, L. Y., & Dyck M. (2025). Effects of liming on soil biota and related processes in agroecosystems: a review. *Discover Soil 2*, 37. https://doi.org/10.1007/s44378-025-00063-2

3. Polishchuk, V., Klymenko, T., Stotska, S., & Pototska, S. (2025). Soil microbiological activity in winter rye crops under different fertilisation systems and biopreparations. *Scientific Horizons*, *28*(10), 77–84. https://doi.org/10.48077/ scihor10.2025.77

4. Hospodarenko, H. M. (2022). Systema zastosuvannia dobryv [System of fertilizer application]. Kyiv: Tropea. [in Ukrainian].

5. Andreiuk, K. I., Iutynska, H. O., Antypchuk, A. F., Valahurova, V. O., & Ponomarenko, S. P. (2001). *Functioning of microbial communities in soil under anthropogenic stress*. Kyiv: Oberegy [in Ukrainian].

6. Volkogon, V. V., Nadkernychna, O. V. Tokmakova L. M. Melnychuk, T. M., Chaikovska, L. O., Nadkrenychnyi, S. P., … Didovych, S. V. (2010). *Experimental soil microbiology*, edited by V. V. Volokhon. Kyiv: Agrarna Nauka [in Ukrainian].

7. Zakharova M. A. (Ed.). (2026). *Scientific principles of an innovative system for assessing and post-war restoration of the ecological state of hydrodeficient, halogenous, hydromorphic and acidic soils: monograph*. Kyiv: Agrarna Nauka, https://doi.org/10.31073/978-540-671-6 [in Ukrainian].

8. Gudz, S. O., & Skivka, L. M. (2020). Peculiarities of the formation of the eubacterial complex of the rhizosphere of winter wheat (Triticum durum) under different fertilization systems. *Bulletin of the Taras Shevchenko National University*. *Biology*, *81*(2), 31–36. https://doi.org/10.17721/1728_2748.2020.81.31-36 [in Ukrainian].

9. Dem'yanyuk, O. S. (2020). Ecological foundations of the functioning of soil microbiocenoses of agroecosystems under climate change (Candidate thesis). Institute of Agroecology and Environmental Management of the NAAS of Ukraine. Kyiv. Retrieved from https://agroeco.org.ua/wp-content/uploads/pdf/dissertation/ecology/demianiyk/dis_demianijuk.pdf [in Ukrainian].

10. Malynovska, I. M., Soroka, O. P., Ptashnik, M. M., & Kurhak, V. H. (2021). Influence of regimes of use and fertilization of spontaneously renewable sward on the course of soil microbiological processes. *Agricultural Microbiology*, *33*, 55–61. https://doi.org/10.35868/1997-3004.33.55-61 [in Ukrainian].

11. Paes da Costa, D., da Silva, T. das G. E., Araujo, A. S. F., Pereira, A. P. A., Mendes, L. W., Borges, W. S., … Medeiros, A. V. (2024). Soil fertility impact on recruitment and diversity of the soil microbiome in sub-humid tropical pastures in Northeastern Brazil. *Scientific Reports, 14*(1), 3919. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54221-7

12. Bargaz, A., Lyamlouli, K., Chtouki, M., Zeroual, Y., & Dhiba, D. (2018). Soil microbial resources for improving fertilizers efficiency in an integrated plant nutrient management system. *Frontiers in Microbiology*, *9*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01606

13. Levishko, A. S., & Mamenko, P. M. (2025). Microbial fertilizers and ways to optimize their effectiveness in crop production. *Agroecological Journal*, *2*, 109–122. https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2025.333832 [in Ukrainian].

14. Srour, A. Y., Ammar, H. A., Subedi, A., Pimentel, M., Cook, R.L., Bond, J., & Fakhoury, A. M. (2020). Microbial Communities associated with long-term tillage and fertility treatments in a corn-soybean cropping system. *Frontiers in Microbiology*, *11*, 1363. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01363

15. Khristenko, A. O., Lisovyi, M. V., & Volosheniuk, O. P. (2025). Trophic level of arable soils of Ukraine and promising directions for optimizing nutrition of agricultural crops in modern conditions (expert analysis). *AgroChemistry and Soil Science*, *98*, 69–83. https://doi.org/10.31073/acss98-05 [in Ukrainian].

16. Reznik, S. V. (2021). The influence of different farming systems on the ecological and trophic communities of microorganisms typical for chernozems in the conditions of the Left Bank forest-steppe of Ukraine. *Agricultural microbiology*, *33*, 62–71. https://doi.org/10.35868/1997-3004.33.62-71 [in Ukrainian].

17. Agegnehu, G., Amede, T., Erkossa, T., Yirga, C., Henry, C., Tyler, R., & Sileshi, G. W. (2021). Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B*. Soil & *Plant Science*, *71*(9), 852–869. https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239