

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ МІКРОБІОЛОГІЇ
ТА АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

**ОПТИМІЗАЦІЯ БІОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ТРАНСФОРМАЦІЇ СПОЛУК ФОСФОРУ
В ЧОРНОЗЕМІ ВИЛУЖЕНОМУ**

(науково-практичні рекомендації)

Чернігів
2025

УДК 579.64:631.416.1:631.445.4:631.82
О-62

Оптимізація біологічних процесів трансформації сполук фосфору в чорноземі вилуженому (науково-практичні рекомендації) / І. М. Пищур., І. О. Глибовець, Д. Ю. Москаленко-Олещенко. Чернігів : видавець Агеєв В. О., 2025. 27 с.

ISBN 978-617-95517-4-1

У рекомендаціях на прикладі вирощування картоплі та ячменю ярого в ланці сівозміни наведено обґрунтування оптимізації фосфорного живлення рослин у чорноземі вилуженому за різних систем удобрення сільськогосподарських культур і рівнів забезпечення ґрунту свіжою органічною речовиною. Запропоновано модель оптимізації процесу фосфорного живлення рослин залежно від норм фосфорних добрив та органічної речовини.

Призначені для наукових працівників, спеціалістів сільського господарства, викладачів і студентів.

УДК 579.64:631.416.1:631.445.4:631.82

Рецензенти: доктор с.-г. наук, професор, академік НААН Волкогон В. В.,
доктор с.-г. наук, с. н. с. Козар С. Ф.

Рекомендації розроблено за результатами науково-дослідної роботи, проведеної за завданням 08.00.01.07.П «Дослідження впливу мінеральних добрив та органічної речовини різного походження на мікробіологічні процеси трансформації сполук фосфору при вирощуванні картоплі та ячменю ярого на чорноземі вилуженому» (ПНД НААН 8 «Сільськогосподарська мікробіологія»).

Рекомендовано до друку вченою радою Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН (протокол № 13 від 17.11.2025 р.) і координаційно-методичною радою Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН — головної установи з виконання ПНД 8 «Сільськогосподарська мікробіологія» (протокол № 3 від 26.11.2025 р.).

© Національна академія аграрних наук України

© Інститут сільськогосподарської мікробіології

ISBN 978-617-95517-4-1

та агропромислового виробництва, 2025

ЗМІСТ

Вступ	4
РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи біологічної трансформації сполук фосфору	5
РОЗДІЛ 2. Роль мікроорганізмів у солюбілізації фосфатів	6
РОЗДІЛ 3. Результати експериментів і їхнє практичне значення	7
3.1. Розвиток фосфатсолюбілізуювальних мікроорганізмів	7
3.2. Фосфатазна активність	12
3.3. Рухомість фосфатів	12
3.4. Урожайність і засвоєння фосфору	17
РОЗДІЛ 4. Практичні рекомендації для виробництва	20
4.1. Алгоритм ухвалення рішень (узагальнено)	20
4.2. Приклади оптимізації систем удобрення	22
4.3. Екологічні й технологічні аспекти	22
Висновки	24
Список використаної літератури	25

ВСТУП

Як відомо, ґрунти можуть містити значну кількість фосфору, але він малодоступний для засвоєння рослинами [1], оскільки як неорганічні, так і органічні сполуки фосфору є слаботорозчинними. Більшість неорганічного фосфору, присутнього в ґрунтах, зв'язана з Fe, Al та/або з Ca чи Mg. Це знижує його розчинність, що призводить до процесів осадження й адсорбції [2–3].

Вміст біологічно доступної для рослин форми фосфору в ґрунтах рідко перевищує 10 мг/100 г [1], і рослинний організм повинен мати спеціалізовані переносники й складну систему відтоку для забезпечення ефективного розподілу цього елемента між усіма частинами рослини [4]. Низька концентрація лабільного фосфору в ґрунтового розчині спричиняє суттєве обмеження росту й розвитку рослин, тому потреби рослинництва у фосфорі високі.

Мета рекомендацій — надати інформацію щодо підвищення ефективності фосфорного живлення картоплі та ячменю ярого шляхом керування біологічними процесами в ризосфері рослин. Основою є результати польових досліджень за завданням 08.00.01.07.П «Дослідження впливу мінеральних добрив та органічної речовини різного походження на мікробіологічні процеси трансформації сполук фосфору при вирощуванні картоплі та ячменю ярого на чорноземі вилуженому», де оцінювали вплив гною ВРХ, соломи, проміжного сидерату (люпину вузьколистого) та їх поєднань з мінеральними добривами на чисельність фосфатсолубілізуювальних мікроорганізмів, фосфатазну активність, рухомість фосфатів, урожайність культур та винос фосфору з урожаєм і побічною продукцією.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БІОЛОГІЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ СПОЛУК ФОСФОРУ

Фосфор є одним із ключових елементів мінерального живлення рослин, необхідним для енергетичного обміну, синтезу нуклеїнових кислот, білків і фітогормонів. У ґрунті він переважно перебуває у малоторозчинних мінеральних і органічних формах, тому лише незначна частина цього елемента доступна для засвоєння рослинами. Доступність фосфору залежить від реакції ґрунтового розчину, гранулометричного складу, вмісту оксидів Fe, Al і Ca, кількості органічної речовини й мікробіологічної активності. За оптимальної кислотності рН 6,0–6,5 спостерігається найвища рухомість ортофосфатів, тоді як у кислому або лужному середовищі вони фіксуються у важкорозчинні сполуки. На чорноземах вилужених, де домінують кальцієві форми фосфору, ефективність мінеральних добрив без органічних компонентів істотно знижується [5].

Біологічна трансформація фосфору зумовлена діяльністю мікроорганізмів, що мінералізують органічні фосфати й розчиняють мінеральні. Фосфатмобілізувальні бактерії з родів *Bacillus*, *Pseudomonas*, а також гриби *Aspergillus* і *Penicillium* продукують органічні кислоти (цитратну, глюконову, оксалатну), які переводять фосфати кальцію, заліза й алюмінію у доступні для рослин форми. Важливу роль відіграють ферменти — кислі та лужні фосфатази, що мінералізують органічні сполуки фосфору, забезпечуючи безперервне поповнення ґрунтового розчину ортофосфатами. На активність цих ферментів впливають температура, вологість, а також співвідношення вуглецю та азоту в ґрунті [6].

Крім того, симбіотичні гриби утворюють арбускулярну мікоризу, гіфи якої проникають за межі ризосфери й збільшують площу поглинання фосфору рослиною. За розвитку мікоризи доступність фосфору підвищується на 20–60 %, особливо в умовах його дефіциту. Органічні добрива, сидерати й солома є

важливим джерелом вуглецю для мікроорганізмів, що стимулює їхній розвиток й активізує процеси трансформації фосфатів. Поєднання органічних речовин із помірними нормами мінеральних добрив забезпечує збалансоване живлення рослин, поліпшує структуру ґрунту та зменшує ризик фіксації фосфору у вигляді важкорозчинних форм [7].

Управління цими біологічними процесами через активацію фосфатаз, оптимізацію кислотності, використання мікоризних інокулянтів і біопрепаратів дозволяє істотно підвищити ступені засвоєння рослинами фосфору з ґрунту та з добрив. Отже, застосування органічних джерел вуглецю в поєднанні з помірними нормами мінеральних добрив є ефективною стратегією для підвищення продуктивності культур і раціонального використання фосфорних ресурсів.

РОЗДІЛ 2. РОЛЬ МІКРООРГАНІЗМІВ У СОЛЮБІЛІЗАЦІЇ ФОСФАТІВ

Фосфатсолюбілізувальні бактерії, передусім представники родів *Bacillus* і *Pseudomonas*, а також ґрунтові гриби *Aspergillus* і *Penicillium* відіграють провідну роль у перетворенні важкорозчинних сполук фосфору в доступні для рослин форми. Вони виділяють органічні кислоти (цитратну, глюконову, оксалатну), які розчиняють фосфати кальцію, заліза й алюмінію, а також ферменти — фосфатази, що гідролізують органічні ефіри фосфору. Активна солюбілізація фосфатів відбувається переважно в ризосфері рослин, де мікроорганізми використовують кореневі виділення як джерело вуглецю та енергії [8].

Мікроорганізми не лише забезпечують рослини доступним фосфором, а й продукують фітогормони, вітаміни, амінокислоти, які стимулюють ріст і розвиток культур. Їхні метаболіти (антибіотики, сидерофори, літичні ферменти) також захищають корені від фітопатогенів, створюючи сприятливе середовище в ризо-

сфері. Внесення органічних добрив — соломи, гною, сидератів — активізує мікробні угруповання, підвищуючи фосфатазну активність у ґрунті, як порівняти з контролем без добрив [9].

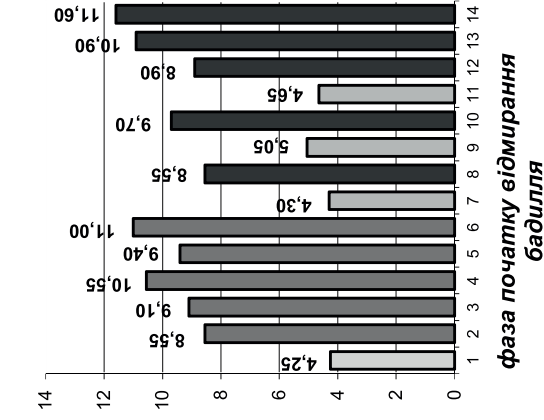
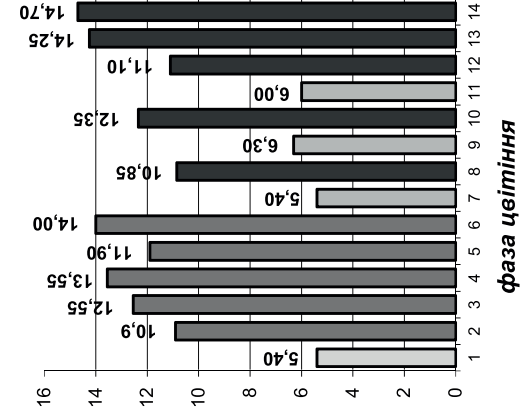
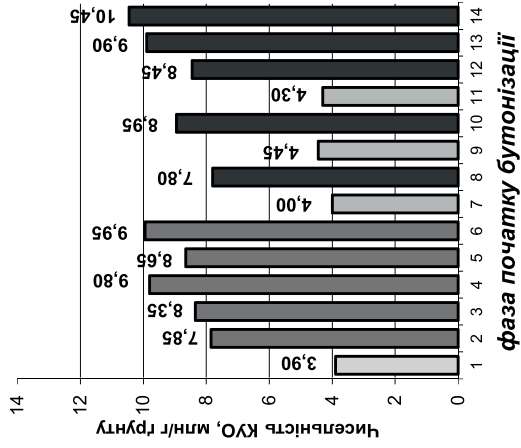
Системне поєднання органічних і мінеральних добрив створює умови для сталого живлення рослин фосфором протягом вегетації. Відомо, що на фоні органо-мінерального удобрення врожайність культур зростає більш істотно, ніж при застосуванні лише мінеральних туків, що опосередковано підтверджує роль мікробіоти в оптимізації фосфорного живлення рослин. Це також сприяє оздоровленню ґрунту, відновленню його біологічної активності й родючості [10].

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ І ЇХНЄ ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

3.1. Розвиток фосфатсолюбілізувальних мікроорганізмів

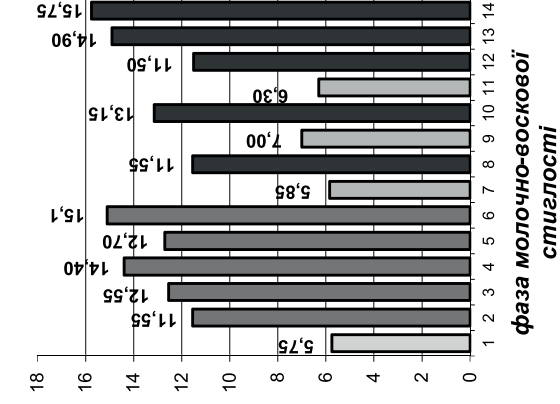
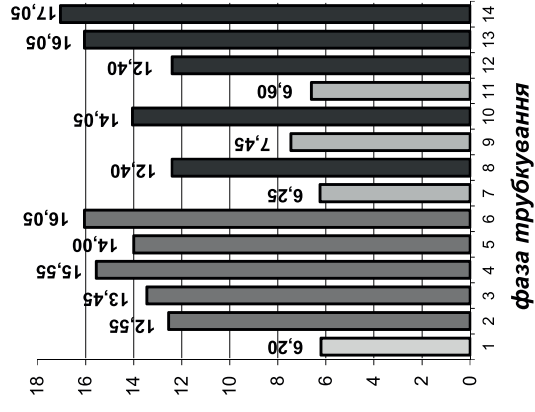
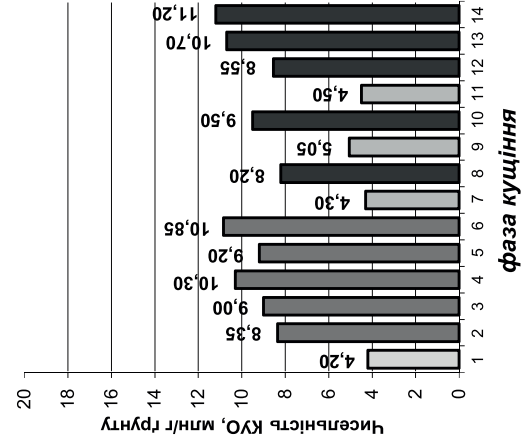
За умов польового стаціонарного дослідження при вирощуванні картоплі в ґрунті вивчали пряму дію на досліджувані процеси як органічних, так і мінеральних добрив; ячменю — першого року післядію органічних добрив і пряму дію мінеральних. Внесення в ґрунт органічної речовини (солома + сидерат, гній) супроводжується інтенсивною мікробною мінералізацією вуглецевмісних сполук, що забезпечує мікроорганізми енергією й елементами живлення, внаслідок чого підвищується чисельність мікроорганізмів, що розчиняють органо- і кальційфосфати, у 2–3 рази щодо контролю. Мінеральні добрива без органічних не забезпечували істотного приросту чисельності представників цієї групи мікроорганізмів (рис. 1–4).

Отримані результати підтверджують доцільність поєднання органічних і мінеральних джерел живлення для інтенсифікації розвитку мікроорганізмів й активізації біологічних процесів солюбілізації фосфатів.



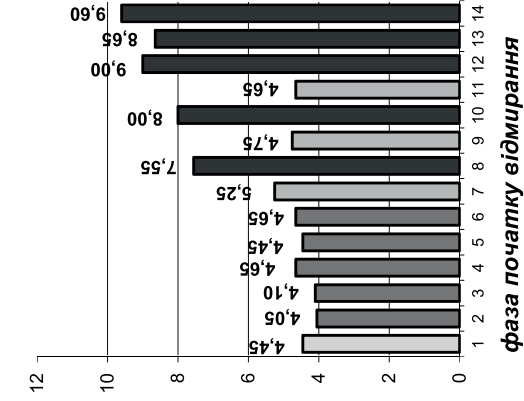
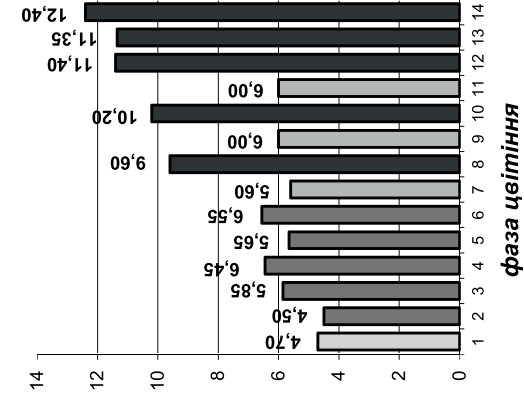
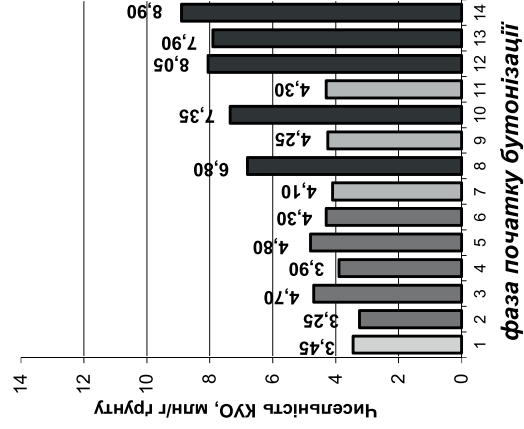
Примітка. **1.** Без добрив, контроль. **2.** Солома. **3.** Сидерат. **4.** Гній. **5.** Солома + сидерат. **6.** Гній + сидерат. **7.** $N_{40}P_{40}K_{40}$. **8.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат. **9.** $N_{80}P_{80}K_{80}$. **10.** $N_{80}P_{80}K_{80}$ + солома + сидерат. **11.** $N_{120}P_{120}K_{120}$. **12.** $N_{120}P_{120}K_{120}$ + солома + сидерат. **13.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + гній. **14.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + гній + сидерат.

Рисунок 1 — Вплив гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного сидерату, застосованих окремо та в поєднанні з мінеральними добривами, на чисельність бактерій, які гідролізують органічний фосфор в ризосферному ґрунті рослин картоплі сорту Беллароза (середнє за 2024–2025 рр.).



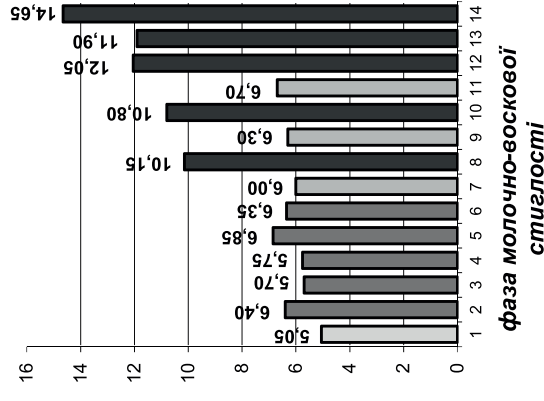
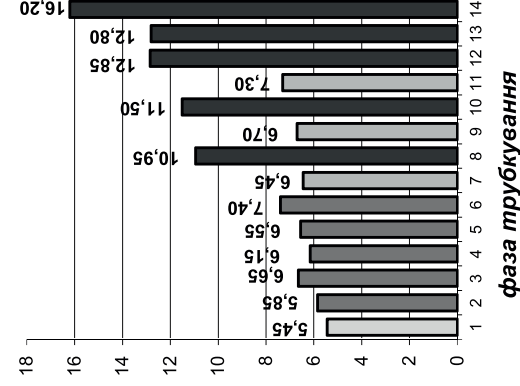
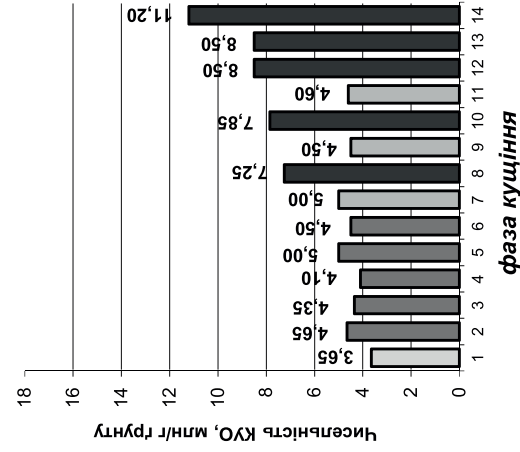
Примітка: **1.** Без добрив, контроль. **2.** Солома. **3.** Сидерат. **4.** Гній. **5.** Солома + сидерат. **6.** Гній + сидерат. **7.** $N_{30}P_{30}K_{30}$. **8.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома + сидерат. **9.** $N_{60}P_{60}K_{60}$. **10.** $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат. **11.** $N_{90}P_{90}K_{90}$. **12.** $N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома + сидерат. **13.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + гній. **14.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + гній + сидерат.

Рисунок 2 — Післядія гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного сидерату окремо та в поєднанні з прямою дією мінеральних добрив на чисельність бактерій, які гідролізують органічний фосфор в ризосферному ґрунті рослин ячменю сорту Гося (середнє за 2024–2025 рр.).



Примітка. **1.** Без добрив, контроль. **2.** Солома. **3.** Сидерат. **4.** Гній. **5.** Солома + сидерат. **6.** Гній + сидерат. **7.** $N_{40}P_{40}K_{40}$. **8.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат. **9.** $N_{80}P_{80}K_{80}$. **10.** $N_{80}P_{80}K_{80}$ + солома + сидерат. **11.** $N_{120}P_{120}K_{120}$. **12.** $N_{120}P_{120}K_{120}$ + солома + сидерат. **13.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + гній. **14.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + гній + сидерат.

Рисунок 3 — Вплив гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату, застосованих окремо та в поєднанні з мінеральними добривами, на чисельність бактерій, які розчиняють кальційфосфати в ризосферному ґрунті рослин картоплі сорту Беллароза (середнє за 2024–2025 рр.).



Примітка: **1.** Без добрив, контроль. **2.** Солома. **3.** Сидерат. **4.** Гній. **5.** Солома + сидерат. **6.** Гній + сидерат. **7.** $N_{30}P_{30}K_{30}$. **8.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома + сидерат. **9.** $N_{60}P_{60}K_{60}$. **10.** $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат. **11.** $N_{90}P_{90}K_{90}$. **12.** $N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома + сидерат. **13.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + гній. **14.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + гній + сидерат.

Рисунок 4 — Післядія гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та в поєднанні з прямою дією мінеральних добрив на чисельність бактерій, які розчиняють кальційфосфати в ризосферному ґрунті рослин ячменю сорту Гося (середнє за 2024–2025 рр.).

3.2. Фосфатазна активність

Фосфатазна активність ризосферного ґрунту рослин картоплі була найвищою на початку бутонізації; для ячменю — у фазу кущіння. Органічні добрива підвищували її активність приблизно у 2 рази, тоді як мінеральні добрива пригнічували її на 20–40 % відповідно до норм їх застосування (рис. 5–6).

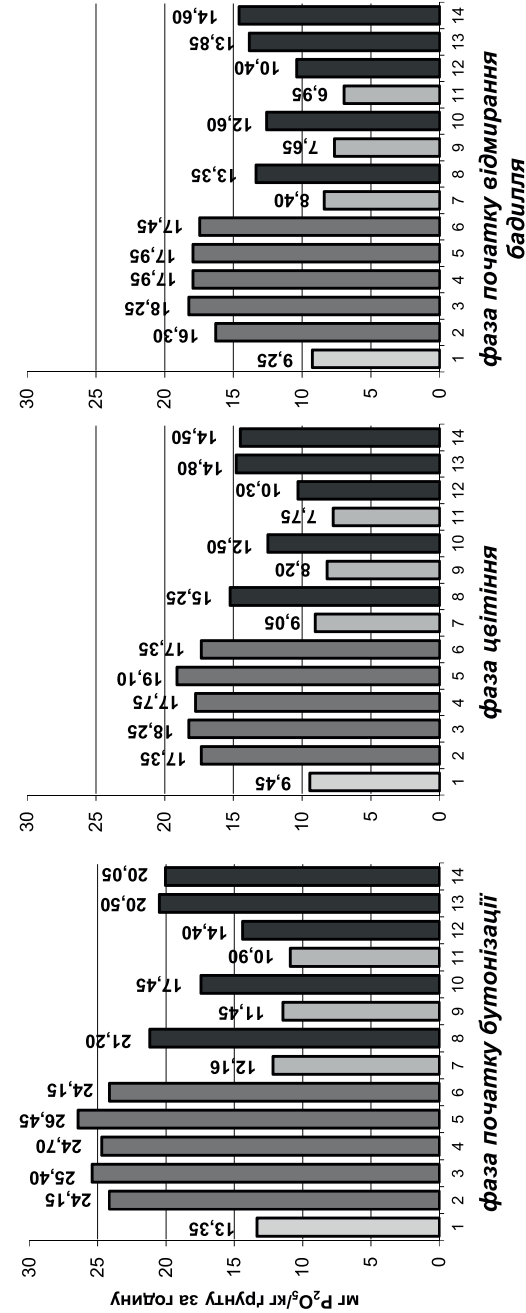
Рівень фосфатазної активності є своєрідним індикатором біологічного стану ґрунту. Підтримання її на високому рівні забезпечує сталу трансформацію органічного фосфору в доступні для рослин форми.

3.3. Рухомість фосфатів

За умов стаціонарного польового дослідження рухомість фосфатів була найвищою у варіантах, де вносили мінеральні добрива. Чим вищою була норма мінеральних добрив, тим більшою — рухомість фосфатів. Найвищу рухомість фосфатів спостерігали у початковій фазі органогенезу картоплі та ячменю. Показники поступово зменшувалися в наступні фази. Це, імовірно, пов'язано з тим, що частина рухомого фосфору засвоювалася рослинами, а частина фіксувалася ґрунтом.

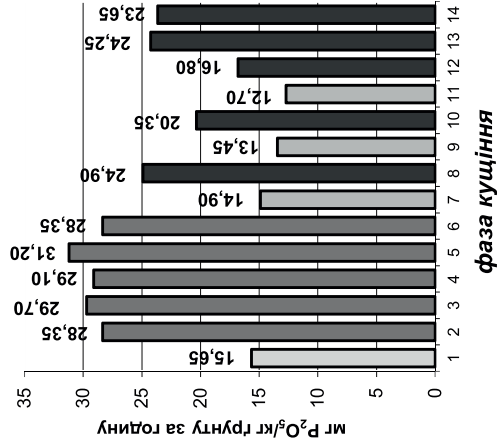
Комбінації (мінеральні добрива + органічні добрива) збільшували частку рухомого фосфору приблизно на 10–12 % (рис. 7–8).

Підвищення рухомості фосфатів відбувається завдяки утворенню органічних кислот, активізації фосфатсолубілізуючих мікроорганізмів, зростанню фосфатазної активності, покращенню структури та вологоутримувальної здатності ґрунту, зниженню сорбції фосфору оксидами Fe та Al та підсиленню кореневої ексудації. У ризосфері рослин формується хімічно й біологічно сприятливе середовище, в якому внесений фосфор переходить у доступні для рослин форми.

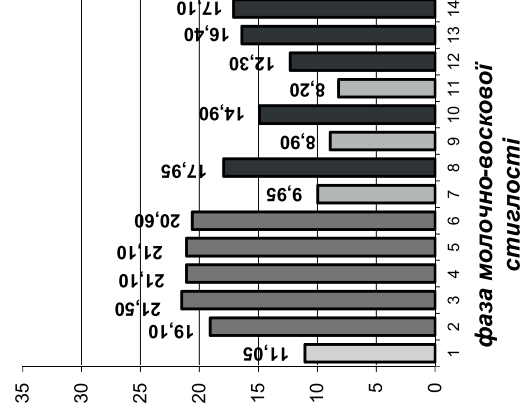
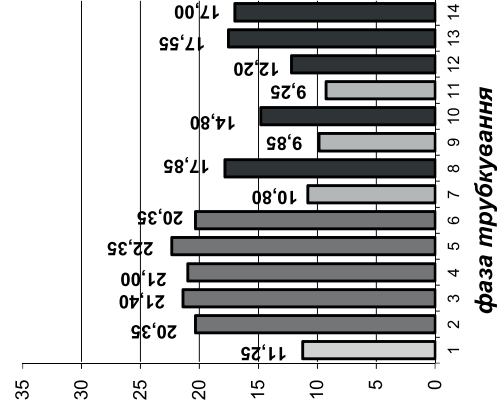


Примітка. 1. Без добрив, контроль. 2. Солома. 3. Сидерат. 4. Гній. 5. Солома + сидерат. 6. Гній + сидерат. 7. N₄₀P₄₀K₄₀. 8. N₄₀P₄₀K₄₀ + солома + сидерат. 9. N₈₀P₈₀K₈₀. 10. N₈₀P₈₀K₈₀ + солома + сидерат. 11. N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀. 12. N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀ + солома + сидерат. 13. N₄₀P₄₀K₄₀ + гній. 14. N₄₀P₄₀K₄₀ + гній + сидерат.

Рисунок 5 — Вплив гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату, застосованих окремо та в поєднанні з мінеральними добривами, на фосфатазну активність у ризосферному ґрунті рослин картоплі сорту Беллароза (середнє за 2024–2025 рр.).

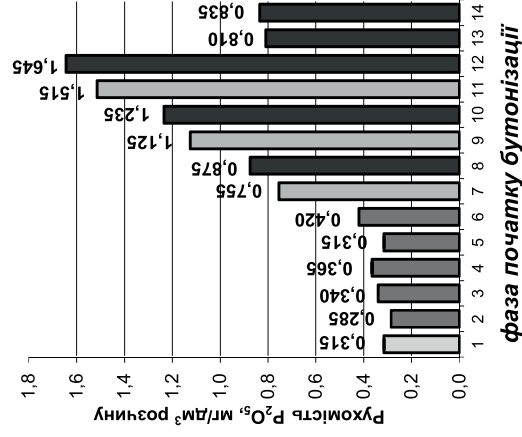


14

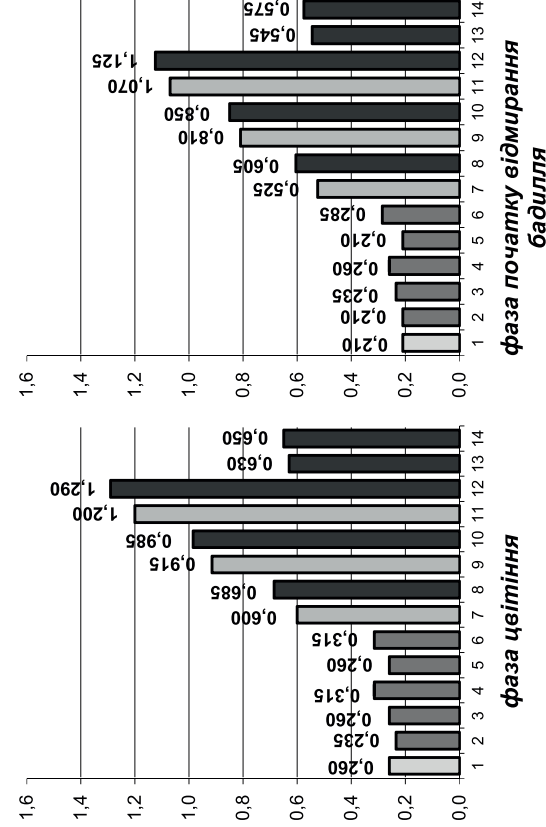


Примітка: **1.** Без добрив, контроль. **2.** Солома. **3.** Сидерат. **4.** Гній. **5.** Солома + сидерат. **6.** Гній + сидерат. **7.** $N_{30}P_{30}K_{30}$. **8.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома + сидерат. **9.** $N_{60}P_{60}K_{60}$. **10.** $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат. **11.** $N_{90}P_{90}K_{90}$. **12.** $N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома + сидерат. **13.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + гній. **14.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + гній + сидерат.

Рисунок 6 — Післядія гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та в поєднанні з прямою дією мінеральних добрив на фосфатизу активність у ризосферному ґрунті рослин ячменю сорту Гося (середнє за 2024–2025 рр.).

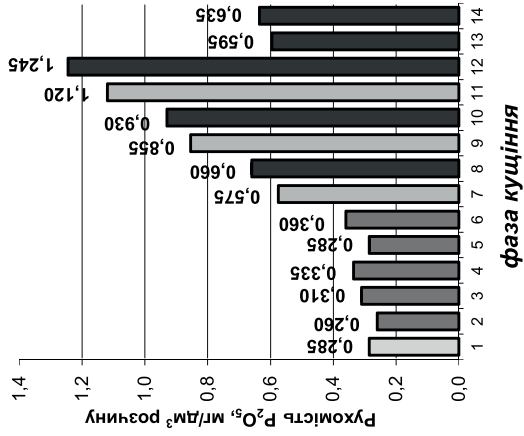


15

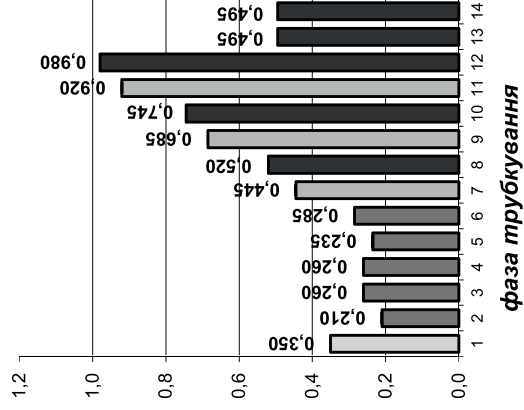


Примітка: **1.** Без добрив, контроль. **2.** Солома. **3.** Сидерат. **4.** Гній. **5.** Солома + сидерат. **6.** Гній + сидерат. **7.** $N_{40}P_{40}K_{40}$. **8.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат. **9.** $N_{80}P_{80}K_{80}$. **10.** $N_{80}P_{80}K_{80}$ + солома + сидерат. **11.** $N_{120}P_{120}K_{120}$. **12.** $N_{120}P_{120}K_{120}$ + солома + сидерат. **13.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + гній. **14.** $N_{40}P_{40}K_{40}$ + гній + сидерат.

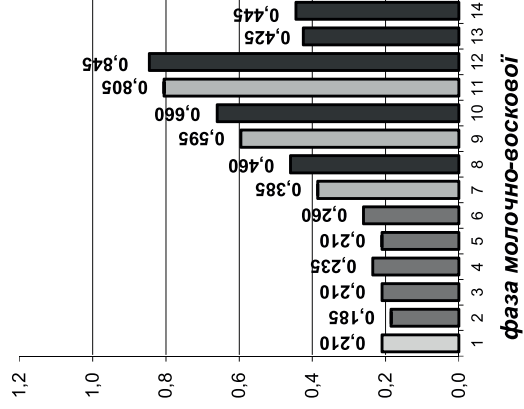
Рисунок 7 — Вплив гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та в поєднанні з мінеральними добривами на ступінь рухомості фосфатів (за методом Карпінського і Зам'ятіної) у ризосферному ґрунті рослин картоплі сорту Беллароза (середнє за 2024–2025 рр.).



фаза куціння



фаза трубкування



фаза молочно-воскової стиглості

Примітка: **1.** Без добрив, контроль. **2.** Солома. **3.** Сидерат. **4.** Гній. **5.** Солома + сидерат. **6.** Гній + сидерат. **7.** $N_{30}P_{30}K_{30}$. **8.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома + сидерат. **9.** $N_{60}P_{60}K_{60}$. **10.** $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат. **11.** $N_{90}P_{90}K_{90}$. **12.** $N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома + сидерат. **13.** $N_{30}P_{30}K_{30}$ + гній. **14.** $N_{60}P_{60}K_{60}$ + гній + сидерат.

Рисунок 8 — Післядія гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та в поєднанні з прямою дією мінеральних добрив на ступінь рухомості фосфатів (за методом Карпінського і Зам'ятіної) у ризосферному ґрунті рослин ячменю сорту Гося (середнє за 2024–2025 рр.).

3.4. Урожайність культур і засвоєння фосфору

Урожайність картоплі зростала відповідно до інтенсифікації удобрення: від 16,26 т/га (контроль) до 38,94 т/га ($N_{120}P_{120}K_{120}$ + солома + сидерат) (табл. 1). Підвищення норм мінеральних добрив від $N_{40}P_{40}K_{40}$ до $N_{120}P_{120}K_{120}$ супроводжується значним приростом урожайності, однак максимальні показники досягаються за орґано-мінеральних систем (NPK + солома + сидерат, гній + NPK). Привертає увагу те, що у варіанті «гній + $N_{40}P_{40}K_{40}$ » урожайність була на рівні варіанта з $N_{120}P_{120}K_{120}$ без додаткового забезпечення ґрунту орґанічною речовиною, що свідчить про можливість зниження мінерального навантаження без зниження врожайності.

Таблиця 1 — Вплив удобрення на урожайність картоплі

Варіанти дослідів	Урожайність, т/га (середнє)	Приріст до контролю	
		т/га	%
Без добрив, контроль	16,26	–	–
Солома	18,41	2,15	13,2
Сидерат	20,70	4,44	27,3
Гній	28,84	12,58	77,4
Солома + сидерат	22,35	6,09	37,5
Гній + сидерат	33,33	17,07	105,0
$N_{40}P_{40}K_{40}$	23,83	7,57	46,6
$N_{40}P_{40}K_{40}$ + солома + сидерат	29,72	13,46	82,8
$N_{80}P_{80}K_{80}$	31,30	15,04	92,5
$N_{80}P_{80}K_{80}$ + солома + сидерат	35,50	19,24	118,3
$N_{120}P_{120}K_{120}$	36,28	20,02	123,1
$N_{120}P_{120}K_{120}$ + солома + сидерат	38,94	22,68	139,5
Гній + $N_{40}P_{40}K_{40}$	36,31	20,05	123,3
Гній + $N_{40}P_{40}K_{40}$ + сидерат	36,93	20,67	127,1
HIP_{05}	0,66		

Урожайність зерна ячменю ярого також зростала відповідно до інтенсифікації удобрення: від 2,64 т/га (контроль) до 5,47 т/га ($N_{90}P_{90}K_{90}$ + післядія соломи + післядія сидерату) (табл. 2). Післядія соломи й сидерату на мінеральному фоні підвищує ефективність використання NPK і сприяє формуванню урожайності ячменю ярого на рівні **4,2–5,5 т/га**, що є високим показником для умов досліду.

Таблиця 2 — Вплив удобрення на урожайність ячменю ярого

Варіанти досліду	Урожайність, т/га (середнє)	Приріст до контролю	
		т/га	%
Без добрив, контроль	2,64	–	–
Солома*	2,75	0,11	4,2
Сидерат*	3,05	0,41	15,5
Гній*	3,52	0,88	33,3
Солома* + сидерат*	3,11	0,47	17,8
Гній* + сидерат*	3,74	1,10	41,7
$N_{30}P_{30}K_{30}$	3,89	1,25	47,3
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома* + сидерат*	4,21	1,57	59,5
$N_{60}P_{60}K_{60}$	4,45	1,81	68,6
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома* + сидерат*	4,91	2,27	86,0
$N_{90}P_{90}K_{90}$	5,17	2,53	95,8
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома* + сидерат*	5,47	2,83	107,2
Гній* + $N_{30}P_{30}K_{30}$	4,65	2,01	76,1
Гній* + $N_{30}P_{30}K_{30}$ + сидерат*	4,91	2,27	86,0
NP_{05}	0,24		

Примітка: *) — першого року післядія органічних добрив.

Поєднання джерел органічної речовини з мінеральними добривами забезпечує найвищу продуктивність картоплі та ячменю ярого, що вказує на ключову роль мікробіологічної активності

ґрунту й збалансованого живлення в підвищенні реалізації потенціалу культури.

Винос P_2O_5 із ґрунту рослинами розраховували, зважаючи на вміст фосфору в урожаї та в побічній продукції. Кількість побічної продукції розраховували через коефіцієнти відношення побічної продукції до основної, наведені в методиці [11]. Коефіцієнт відношення побічної продукції до основної для ячменю ярого становить 1,23, а для картоплі — 0,45. Для розрахунку виносу фосфору з побічною продукцією для ячменю враховували вміст фосфору у фазу молочно-воскової стиглості, а для картоплі — у фазу початку відмирання бадилля. Для розрахунку виносу фосфору з ґрунту зерном ячменю брали до уваги вміст фосфору в зерні з польовою вологістю, яка становила 9,2 %. Вологість бульб картоплі становила 84,69 %.

На фоні 40 т/га гною та $N_{40}P_{40}K_{40}$ для картоплі відзначено додатково засвоєний фосфор із добрив та з ґрунту $\approx 15,3$ кг/га. Оптимальною нормою удобрення картоплі є також внесення $N_{80}P_{80}K_{80}$ у поєднанні з соломою (5 т/га) і біомасою люпину вузьколистого (13 т/га надземної маси), що створює умови додаткового засвоєння фосфору на рівні $\approx 3,7$ кг/га (табл. 3).

Для ячменю найефективнішим було поєднання сидерату й соломи (5 т/га) з $N_{90}P_{90}K_{90}$. За таких умов додатково засвоюється фосфор із добрив і ґрунту на рівні $\approx 5,2$ кг/га. В інших варіантах приріст виносу P_2O_5 з мінеральних добрив по фоні органічних добрив був незначним. Отже, підвищення засвоєності фосфору рослинами ячменю ярого відзначено у всіх варіантах (табл. 4).

Підвищення рухомості фосфатів свідчить про ефективність біологічних механізмів солюбілізації фосфатів. Це дає змогу скоротити застосування фосфорних добрив і підтримувати рівень доступного фосфору в ґрунті природним шляхом.

Отримані дані підтверджують ефективність органо-мінеральних систем удобрення для стабільного підвищення врожайності й покращення якості продукції.

Таблиця 3 — Вплив гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату, застосованих окремо та у поєднанні з мінеральними добривами, на внос P_2O_5 з урожаєм та побічною продукцією картоплі (середнє за 2024–2025 рр.)

Варіанти дослідів	Внос P_2O_5 , кг/га	Зростання вносу P_2O_5 до контролю, кг/га
Без добрив, контроль	37,8	—
$N_{40}P_{40}K_{40}$	60,3	22,5
$N_{80}P_{80}K_{80}$	74,7	36,9
$N_{120}P_{120}K_{120}$	92,7	54,9
Солома (С) + сидерат (Сд)	52,1	14,3
$N_{40}P_{40}K_{40}$ + С + Сд	72,5	34,7
$N_{80}P_{80}K_{80}$ + С + Сд	92,7	54,9
$N_{120}P_{120}K_{120}$ + С + Сд	102,7	64,9
Гній	52,1	14,3
Гній + $N_{40}P_{40}K_{40}$	89,9	52,1
Гній + Сд	78,2	40,4
Гній + $N_{40}P_{40}K_{40}$ + Сд	90,8	53,0

Збалансоване живлення з урахуванням біологічної мобілізації фосфору забезпечує не лише економію мінеральних ресурсів, а й підвищення екологічної стійкості агроecosystem.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА

4.1. Алгоритм ухвалення рішень (узагальнено)

1. Оцінити забезпеченість ґрунту рухомим фосфором і наявність чи відсутність факторів, які впливають на фосфорне живлення рослин. Доступність фосфору в чорноземі вилуженому визначається комплексом хімічних, фізичних і біологічних факторів: кислотністю (оптимум рН 6,2–6,5), вмістом гумусу, інтенсивною фосфатною фіксацією оксидами Fe та Al, наявністю карбонатів у нижніх горизонтах, структурою та вологістю ґрунту,

Таблиця 4 — Вплив післядії гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та в поєднанні з прямою дією мінеральних добрив на внос P_2O_5 з урожаєм та побічною продукцією ячменю ярого (середнє за 2024–2025 рр.)

Варіанти дослідів	Внос P_2O_5 , кг/га	Зростання вносу P_2O_5 до контролю, кг/га
Без добрив, контроль	25,6	—
$N_{30}P_{30}K_{30}$	37,8	12,2
$N_{60}P_{60}K_{60}$	44,9	19,3
$N_{90}P_{90}K_{90}$	50,4	24,8
Солома (С) + сидерат (Сд)	27,3	1,7
$N_{30}P_{30}K_{30}$ + С + Сд	40,4	14,8
$N_{60}P_{60}K_{60}$ + С + Сд	48,2	22,6
$N_{90}P_{90}K_{90}$ + С + Сд	57,3	31,7
Гній	32,5	6,9
Гній + $N_{30}P_{30}K_{30}$	45,2	19,6
Гній + Сд	34,6	9,0
Гній + $N_{30}P_{30}K_{30}$ + Сд	47,8	22,2

активністю фосфатсолубілізуювальних мікроорганізмів і мікоризи, характером системи удобрення, температурою та агротехнікою. Висока сорбційна здатність чорнозему вилуженого та наявність гідроксидів Fe/Al є основними обмежувальними чинниками доступності фосфору для рослин. Застосування органічних добрив, біопрепаратів і локального внесення фосфору суттєво підвищує його доступність для рослин.

2. Сформувати органічний фон: солома 5 т/га + сидеральна біомаса; гній (за наявності) — до 40 т/га.

3. Застосувати помірні норми мінеральних добрив з урахуванням того, що додаткове фосфорне живлення надійде з ґрунтових резервів завдяки активізації мікробіологічних процесів.

4. За можливості доповнити систему мікробними препаратами.

5. Моніторити стан посівів і коригувати норми за результатами.

4.2. Приклади оптимізації систем удобрення

Картопля:

– органічний фон: солома 5 т/га + сидерат (за можливості — гній 40 т/га);

– мінеральне живлення: $N_{80}P_{80}K_{80}$. (по фону солома + сидерат), $N_{40}P_{40}K_{40}$ (по фону гною);

– очікуваний ефект: вищий коефіцієнт використання фосфору, стабільний приріст урожайності.

Ячмінь ярий:

– органічний фон: післядія соломи 5 т/га та сидерату (післядія гною, 40 т/га);

– мінеральне живлення: $N_{60-90}P_{60-90}K_{60-90}$;

– очікуваний ефект: вищий коефіцієнт використання фосфору, стабільний приріст урожайності.

4.3. Екологічні й технологічні аспекти

Органо-мінеральні системи удобрення знижують ризики фіксації фосфору у важкодоступні сполуки та його вимивання в ґрунтові води, що особливо важливо для чорноземів вилужених. Завдяки поступовій мінералізації органічних добрив відбувається рівномірне надходження поживних речовин протягом усього вегетаційного періоду. Це створює сприятливі умови для стабільного живлення рослин, підвищення ефективності добрив і зменшення потреби в мінеральних туках. Одночасно активізується мікробіота ґрунту, підвищується вміст новоутвореної органічної речовини й поліпшуються водно-фізичні властивості орного шару.

Органо-мінеральні системи сприяють формуванню стійких агроecosystem, де природні біологічні процеси в ґрунті зберігаються навіть за інтенсивного землеробства. Зменшення обсягів внесення фосфорних добрив дозволяє скоротити витрати на 15–20 % і мінімізувати антропогенне навантаження на екосистему. У виробничій практиці це означає перехід до технологій збалансованого живлення, що поєднують високу врожайність з екологічною безпекою сільськогосподарського виробництва.

ВИСНОВКИ

1. Для забезпечення розвитку фосфатсолюбілізувальних мікроорганізмів і максимальної фосфатазної активності варто застосовувати комбіновані системи удобрення, які поєднують мінеральні добрива з органічною речовиною (солома + сидерат, гній + сидерат або гній).

2. У зв'язку з дефіцитом гною ВРХ в Україні як альтернативу треба використовувати солому й покривні культури (наприклад, проміжні сидерати) як ефективні джерела органічної речовини, що підсилюють біологічну мобілізацію кальцій- та органофосфатів, покращують структуру ґрунту й підвищують доступність фосфору для рослин на 10–12 %.

3. Варто уникати застосування надмірних норм мінеральних добрив, які пригнічують фосфатазну активність ґрунту та порушують біологічну рівновагу ризосфери.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Носко Б. С. Сучасні проблеми фосфору в землеробстві і шляхи їх розв'язання. *Вісник аграрної науки*. 2017. 6. С. 5–11.

2. Gyaneshwar P., Naresh Kumar G., Parekh L. J., Poole P. S. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant Soil*. 2002. 245. P. 83–93. doi: 10.1023/A:10206639162593

3. Igual J. M., Valverde A., Cervantes E., Velázquez E. Phosphate solubilizing bacteria as inoculants for agriculture: use of updated molecular techniques in their study. *Agronomie*. 2001. 21. P. 561–568.

4. Schachtman D. P., Reid R. J., Ayling S. M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiol*. 1998. 116. P. 447–453. doi: 10.1104/pp.116.2.447

5. Penn C. J., Camberato J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*. 2019. Vol. 9, № 6. Art. 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>

6. Pan L., Cai B. Phosphate-solubilizing bacteria: advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. *Microorganisms*. 2023. Vol. 11, № 12. Art. 2904. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122904>

7. Hou L., Zhang X., Feng G. et al. Arbuscular mycorrhizal enhancement of phosphorus uptake and yields of maize under high planting density in the black soil region of China. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Art. 1100. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80074-x>

8. da Silva L. I., Pereira M. C., de Carvalho C. A. et al. Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, № 2. Art. 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>

9. Pizarro-Tobias P., Ramos J.-L., Duque E., Roca A. Plant growth-stimulating rhizobacteria capable of producing L-amino acids. *Environmental Microbiology Reports*. 2020. Vol. 12, № 6. P. 667–671. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12887>

10. Luo Y., Liang J., Zhou C. The combination of mineral fertilizer with organic fertilizer improved soil phosphorus availability. *All Life*. 2024. Vol. 17, № 1. Art. 2370421. <https://doi.org/10.1080/26895293.2024.2370421>

11. Балюк С. А., Греков В. О., Лісовий М. В., Комариста А. В. Розрахунок балансу гумусу і поживних речовин у землеробстві України на різних рівнях управління. Харків : КП «Міська друкарня», 2011. 30 с. ISBN 978-617-619-035-6

Наукове видання

Оптимізація біологічних процесів трансформації сполук фосфору в чорноземі вилуженому

(науково-практичні рекомендації)

І. М. Пищур

І. О. Глибовець

Д. Ю. Москаленко-Олещенко

Комп'ютерна верстка та макетування *В. О. Агеєв*

Коректура *О. В. Ільчук*

Підписано до друку 19.12.2025 р. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура Arial.
Умовн. друк. арк. 1,63. Обл.-вид. арк. 1,12.
Зам. № 25283-03. Наклад 50 прим.

Видавець та виготовлювач: ФОП Агеєв В. О.
Свід. про внесення до держ. реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК, № 8282 від 02.05.2025.
Запис в єдиному держ. реєстрі № 201035000000182294 від 01.08.2022.
Україна, 14005, м. Чернігів, вул. В'ячеслава Чорновола, 4, к. 15.
<http://siver-druk.com.ua> e-mail: siverdruk11@gmail.com