

<https://doi.org/10.35868/1997-3004.42.83-93>

УДК 631.417.2:631.81:631.461.5:633.16(477.51)

МІКРОБІОЛОГІЧНА ТРАНСФОРМАЦІЯ СПОЛУК ФОСФОРУ ЗА ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ ЯЧМЕНЮ ЯРОГО

І. М. Пищур, <https://orcid.org/0009-0000-6719-8427>,

І. О. Глибовець, <https://orcid.org/0009-0002-0513-801X>

Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН
вул. Шевченка, 97; м. Чернігів, 14030, Україна; e-mail: Pyschur@ukr.net

Мета. Дослідити особливості мікробіологічної трансформації сполук фосфору в кореневій зоні рослин ячменю ярого за післядії гною ВРХ, пшеничної соломи й біомаси люпинового сидерату окремо та в поєднанні з прямою дією мінеральних добрив при вирощуванні культури на чорноземі вилуженому. **Методи.** Польовий стаціонарний дослід у ланці сівозміни картопля — ячмінь — горох — пшениця озима; мікробіологічні (визначення чисельності бактерій, що розчиняють органо- і кальційзв'язані форми фосфатів, Al- і Fe-фосфати), біохімічні (активність фосфатаз за методом Геллера-Гінзбург), агрохімічні (ступінь рухомості фосфатів за методом Карпінського-Зам'ятіної, вміст фосфору в сухій речовині рослин), статистичні. **Результати.** Післядія соломи, сидерату й гною зумовлювала зростання чисельності фосфатсолубілізівних мікроорганізмів у ризосферному ґрунті ячменю у 2,0–3,1 раза та підвищення фосфатазної активності удвічі від контролю, тоді як тривалентне застосування лише мінеральних добрив істотно не стимулювало розвиток цих груп мікробіоти і в окремих випадках пригнічувало ферментативну активність. Комбіновані органо-мінеральні системи сприяли посиленню мобілізації фосфору, збільшенню частки рухомих фосфатів у ризосфері, внаслідок чого зростала урожайність зерна з 2,64 до 5,47 т/га та винос P_2O_5 . Встановлено, що внесення $N_{90}P_{90}K_{90}$ по фоні першого року післядії соломи й сидерату забезпечує максимальну реалізацію потенціалу культури завдяки синергії мікробіологічних і агрохімічних механізмів мобілізації фосфору. **Висновки.** Поєднання мінеральних добрив із післядією органічної речовини різного походження є ефективним способом підтримання високого рівня фосфатазної активності, активізації фосфатсолубілізівних мікроорганізмів, зростання рухомості фосфатів, оптимізації фосфорного живлення й підвищення продуктивності ячменю ярого на чорноземі вилуженому. Отримані результати свідчать про можливість заміщення частини мінеральних добрив органічними ресурсами без зниження врожайності та з поліпшенням біологічної активності ґрунту.

Ключові слова: органічні субстрати, продуктивність ячменю, рухомість фосфатів, солубілізація фосфатів, фосфатазна активність, фосфатсолубілізівні мікроорганізми.

Вступ. Фосфор — один із ключових макроелементів, що контролює ріст, розвиток і продуктивність сільськогосподарських культур. Проте значна частина внесених фосфорних добрив в ґрунті переходить у малодоступні форми: зв'язується з оксидами Fe/Al або кальцієм, що суттєво знижує ефективність його використання рослинами [1]. У сучасному агровиробництві культивування

зернових, зокрема ячменю ярого, на чорноземах вилужених стикається з викликами не лише щодо адекватного фосфорного живлення, а й щодо активізації ґрунтових мікробіологічних процесів, наслідком яких є солубілізація фосфору. На фоні інтенсифікації удобрення підвищуються ризики фосфорної іммобілізації, зниження фосфатазної активності мікробіоти і, як наслідок, зменшення

засвоєння фосфору рослинами. Водночас поєднання органічної речовини з мінеральними добривами розглядається як перспективна стратегія підвищення рухомості фосфатів, активації ризосферної мікробіоти й зростання продуктивності сільськогосподарських культур [2]. Отже, актуальним є системне дослідження впливу органічних і мінеральних добрив на мікробіологічні процеси трансформації сполук фосфору та їхнє значення у фосфорному живленні ячменю на чорноземі вилуженому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Низка досліджень демонструє, що комбіноване застосування мінеральних і органічних добрив створює сприятливі умови для підвищення рухомості фосфатів і активності мікроорганізмів, що беруть участь у кругообігу фосфору. Наприклад, Luo et al. [2] показали, що варіанти з поєднанням мінеральних добрив і органічної речовини забезпечили зростання лабільних фракцій фосфору в ґрунті на 320 %, як порівняти з контролем. До того ж мікробіологічна активність (зокрема генів, пов'язаних із фосфатозвільненням і мінералізацією) значно змінилася у бік збільшення [1]. В оглядовій статті Zhu et al. [3] підкреслюють значимість мікроорганізмів як основних агентів розчинення неорганічних та органічних сполук фосфору у ризосфері рослин. Ще один фактор — специфіка культур: дослідження на ячмені показали, що ефективність засвоєння фосфору значною мірою залежить від розчинності внесеного фосфорного добрива ($H_2O + NaHCO_3$ -фракції) і обмежена високою часткою кальційзв'язаних фосфорних сполук [4]. У контексті чорноземів вилужених, які мають високу здатність до фіксації фосфору, застосування додаткових органічних ресурсів (солома, сидерат, гній) може бути ключовим для активації ризосферної мікробіоти й збільшення доступності фосфору для рослин. Останні мета-аналізи підтверджують позитивний вплив органічних добрив на формування загальної мікробної біомаси, покращення структури мікробних угруповань і підвищення активності ферментів фосфорного циклу [5].

Фосфатазна активність ґрунту розглядається як інформативний показник інтенсивності мінералізації органічних сполук фосфору й потенційної здатності ґрунту мобілізувати

фосфор у системі «ґрунт-рослина», причому її рівень чутливо реагує на систему удобрення. У польових дослідженнях органічне удобрення зазвичай підвищує активність кислої та/або лужної фосфатази і покращує доступність фосфору для рослин [6]. Узагальнення сучасних даних також підтверджує, що фосфатазна активність істотно змінюється під впливом землекористування й агрозаходів, відображаючи перебудову процесів фосфорного циклу в ґрунті [7], що узгоджується з вітчизняними результатами для чорноземів за біологізації землеробства [8]. Проте недостатньо досліджень, які б визначали вплив різних видів органічної речовини та мінеральних добрив на розвиток й активність фосфатсолубілізівних мікроорганізмів у ризосфері культурних рослин, зокрема і ячменю ярого.

У зв'язку з вищезазначеним **метою** досліджень було встановити особливості мікробіологічної трансформації сполук фосфору в ризосферному ґрунті рослин ячменю ярого при вирощуванні культури на чорноземі вилуженому за впливу різних видів органічної речовини та її поєднання з мінеральними добривами.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили у польовому стаціонарному досліді Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН на чорноземі вилуженому, який містить 3,03 % гумусу, 95,2 мг/кг азоту легкогідролізованого, 226 мг/кг фосфору (за Кірсановим), 108 мг/кг обмінного калію, $pH_{\text{сол.}}$ — 5,30. У сівозміні (картопля – ячмінь ярий – горох – пшениця озима) вирощували ячмінь ярий сорту Гося, створений на Носівській селекційно-дослідній станції; сорт середньостиглий, тривалість вегетаційного періоду — 85–95 днів, рекомендований для Полісся та північного Лісостепу України, стійкий до вилягання, осипання, посухи, ураження борошністою россою та сажковими хворобами.

Дослідження процесу біологічної трансформації фосфору в кореневій зоні рослин ячменю проводили в основні фази онтогенезу: кушіння, трубкування, молочно-воскової стиглості. Також визначали урожайність зерна ячменю. Визначали ефективність різних систем удобрення культури — першого року післядію органічних добрив різного поход-

ження — пшеничної соломи (5 т/га), біомаси люпинового сидерату (13 т/га вологої надземної біомаси і приблизно стільки ж коренів) і гною ВРХ (40 т/га), а також пряму дію мінеральних добрив, зокрема за їх внесення по фону післядії органічних. Оцінювали вплив систем удобрення на мікробіологічні процеси солюбілізації фосфорних сполук, фосфатазну активність ґрунту, ступінь рухомості фосфатів і забезпеченість рослин фосфором. Дослід закладено у 2009 р., відповідно, вплив досліджуваних чинників на ґрунтові процеси, зокрема й біологічні, має системний характер. Схему досліду наведено в таблицях. Повторність — чотириразова.

Чисельність мікроорганізмів, що мінералізують органічні та розчиняють мінеральні форми фосфатів, визначали за загальноприйнятими мікробіологічними методами. Облік ґрунтових бактерій, здатних до розчинення важкорозчинних фосфатів (із катіонами Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), проводили шляхом мікробіологічного посіву розведень ґрунтової суспензії на живильне середовище Муромцева з $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ — 5 г/дм³, AlPO_4 — 2,376 г/дм³, FePO_4 — 1,215 г/дм³ відповідно. Чисельність бактерій, що гідролізують органічні форми фосфатів, визначали на живильному середовищі Муромцева з $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_2\text{PO}_4\text{Ca}$ — 6,0 г/дм³. Враховували колонії, навколо яких утворювалися зони просвітлення [9].

Активність фосфатази в ризосферному ґрунті визначали за методом Геллера і Гінзбург — стандартним методом для оцінювання потенціалу біохімічної мобілізації органічних фосфатів у ґрунті [9].

Ступінь рухомості фосфатів у ризосферному ґрунті рослин ячменю оцінювали за методом Карпінського і Зам'ятіної [10].

Використані методи досліджень (метод Геллера-Гінзбург, живильне середовище Муромцева, метод екстракції Карпінського-Зам'ятіної) є загальноприйнятими й широко застосовуються у вітчизняній ґрунтовій мікробіології й агрохімії. Зазначені методики забезпечують отримання репрезентативних і відтворюваних результатів і відповідають завданням дослідження. У перспективі доцільним є зіставлення отриманих даних із результатами, одержаними за міжнародними протоколами, з метою гармонізації методичних підходів.

Для визначення вмісту фосфору в надземній біомасі та зерні ячменю використовували метод Деніже у модифікації Буватьє — чутливий фотометричний метод визначення ортофосфатів у рослинних тканинах [9].

Облік урожаю здійснювали подільською.

Винос P_2O_5 з урожаем і побічною продукцією розраховували на основі визначеного вмісту фосфору та коефіцієнтів співвідношення побічної та основної продукції, які наведено в довіднику [11].

Статистичну обробку результатів здійснювали методом дисперсійного аналізу для визначення достовірності різниць між варіантами досліду.

Результати та їх обговорення.

Особливості формування угруповань фосфатсолюбілізівних мікроорганізмів у ризосферному ґрунті рослин ячменю ярого в основні фази онтогенезу рослин. Для ячменю характерний короткий вегетаційний період, під час якого швидко засвоюються поживні речовини. У період активного росту культура потребує підвищеного рівня живлення. Молоді рослини на початковому етапі розвитку більш вимогливі до своєчасного надходження елементів живлення. Важливу роль у надходженні елементів живлення, зокрема і фосфору, відіграють ґрунтові мікроорганізми.

Залежно від фаз розвитку чіткої різниці за чисельністю мікроорганізмів, які гідролізують ортофосфати, в ризосфері ячменю ярого не виявлено. Відсутність вираженої фазової динаміки чисельності фосфатмобілізувальних мікроорганізмів у ризосфері ячменю ярого може бути зумовлена сукупною дією біологічних і агротехнічних чинників. Імовірно, сортові особливості ячменю ярого Гося характеризуються порівняно стабільним профілем кореневої ексудації протягом вегетації, що не призводить до різких змін трофічних умов для мікробіоти між окремими фазами розвитку. Не виключено також, що провідну роль у регуляції чисельності мікроорганізмів відіграло домінування ґрунтових факторів над фенологічними. Проте кількість мікроорганізмів, які гідролізують ортофосфати, залежала від виду добрив. Післядії органічної речовини сприяла зростанню чисельності мікроорганізмів, здатних мінералізувати ортофосфати, в 2,0–2,6 рази.

Системне застосування мінеральних добрив (без органічних) не мало значного впливу на чисельність мікроорганізмів, що мінералізують органофосфати у ризосферному ґрунті рослин (рис. 1).

Залежно від фаз розвитку чіткої різниці за чисельністю мікроорганізмів, які розчиняють кальційфосфати в ризосфері ячменю ярого, не виявлено. Встановлено, що післядія органічної речовини забезпечує підвищення чисельності мікроорганізмів, що розчиняють кальційфосфати, приблизно в 2,0–3,1 раза. На нашу думку, органічні субстрати забезпечують енергетичну базу для розвитку зазначених мікроорганізмів, стимулюють утворення органічних кислот і синтез фосфатаз. Можливе також і зниження фіксації фосфору Ca^{2+} в ґрунті й зростання інтенсивності кореневої ексудації за цих умов. До того ж мікроорганізми, які розчиняють кальційфосфати, можуть отримати конкурентну перевагу і різко збільшити свою чисельність.

Системне внесення мінеральних добрив (без органічних) не мало значного впливу на чисельність мікроорганізмів, що розчиняють кальційфосфати (рис. 2).

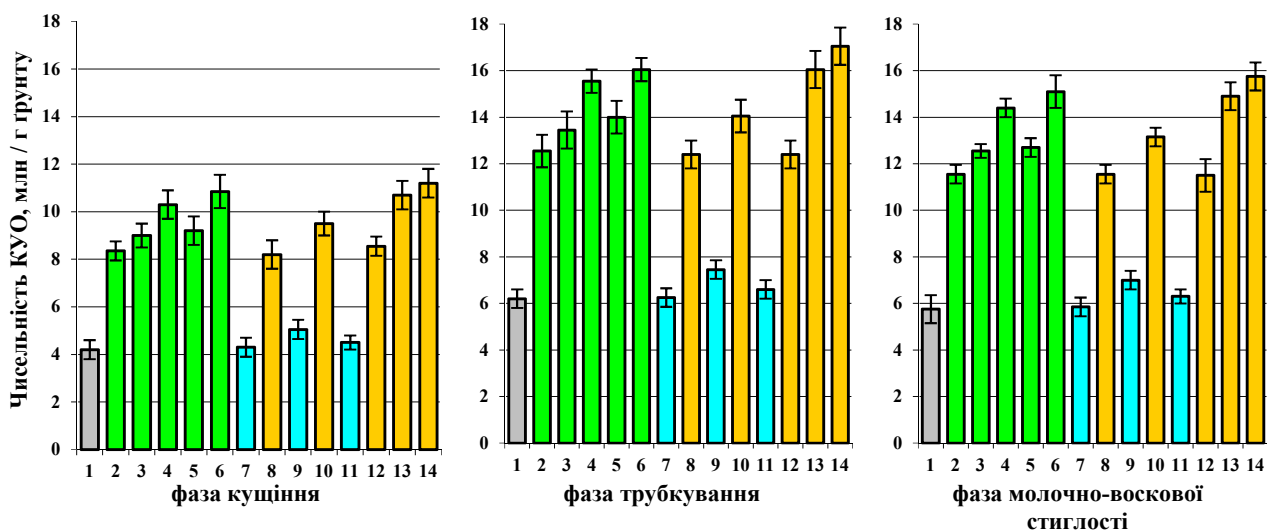
При дослідженні чисельності бактерій, які розчиняють алюмінійфосфати та залізофосфати у ризосферному ґрунті рослин ячменю, не виявлено значної різниці між варіантами. Загалом чисельність зазначеної групи мікроорганізмів коливалася в межах від

3,1 млн КУО / г сухого ґрунту до 5,5 млн КУО / г сухого ґрунту. Вірогідно, це пов'язано з тим, що алюмінійфосфати та залізофосфати є важкорозчинними, а в ґрунті достатньо інших сполук фосфору, які більш доступні для мобілізації мікроорганізмами.

Отримані результати підтверджують доцільність поєднання органічних і мінеральних джерел живлення для активізації біологічних процесів солюбілізації фосфатів. Це забезпечує можливість зменшення потреби у фосфорних добривах без зниження врожайності культури.

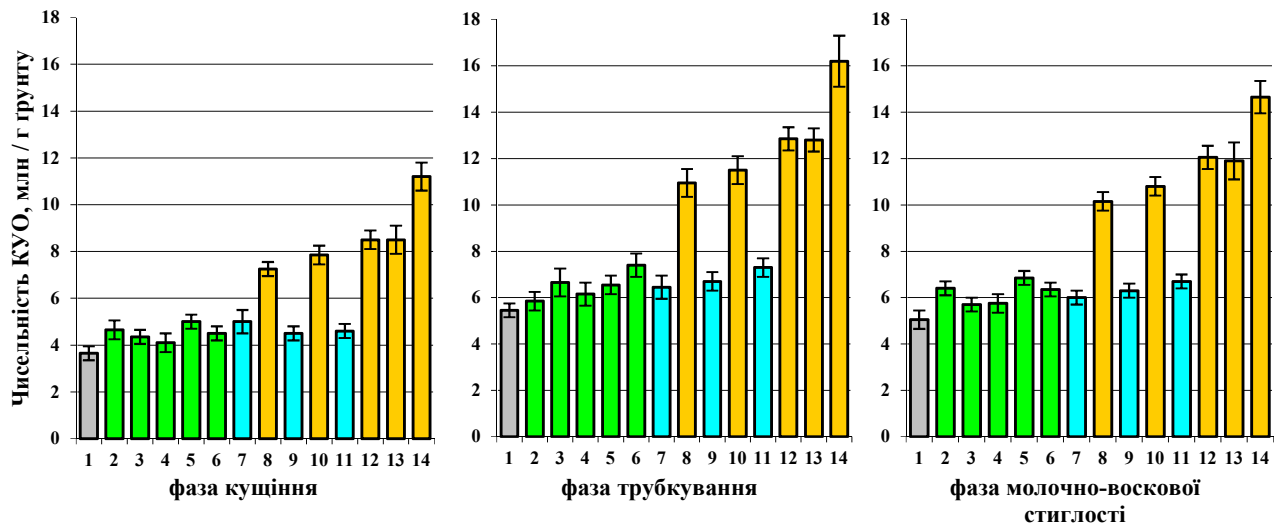
Фосфатазна активність ризосферного ґрунту рослин ячменю в основні фази онтогенезу. Фосфатазна активність ризосферного ґрунту рослин ячменю ярого була найвищою у фазу кушіння. У фазі трубкування та у фазі молочно-воскової стиглості активність була практично однаковою та приблизно в 1,5 раза меншою, ніж у фазу кушіння.

Післядія органічної речовини забезпечувала підвищення фосфатазної активності ризосферного ґрунту приблизно у 2 рази. Застосування мінеральних добрив у порівнянні з контролем зумовлювало зниження фосфатазної активності на 20–40 %, причому ступінь її пригнічення зростав зі збільшенням норм добрив (рис. 3). Імовірною причиною цього є надлишок доступного мінерального фосфору, що зменшує потребу рослин і мікроорганізмів у синтезі фосфатаз. Встановлено



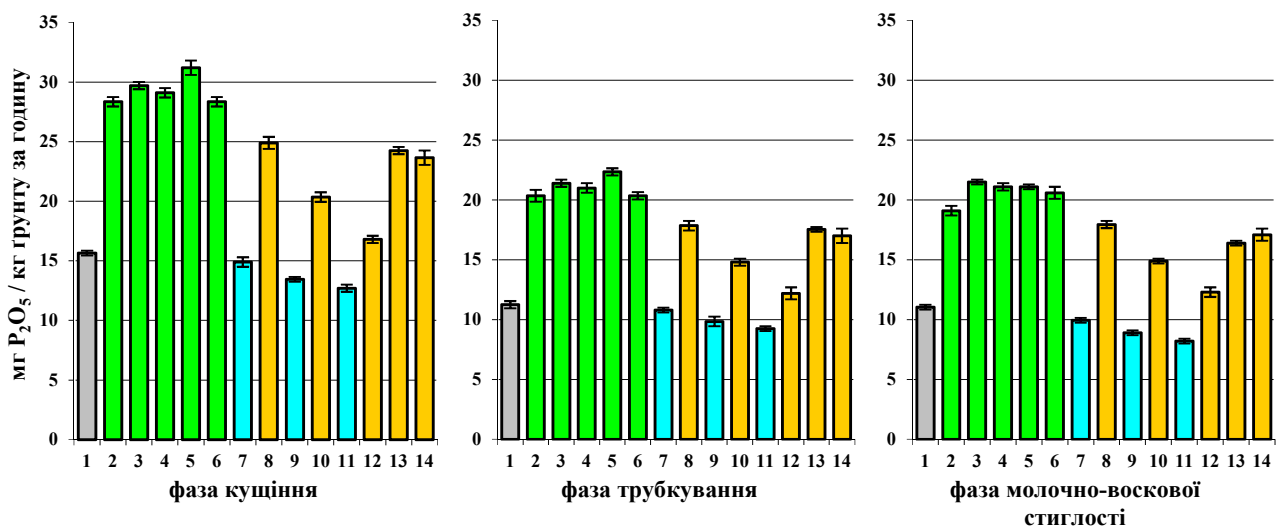
1. Без добрив, контроль. 2. Солома. 3. Сидерат. 4. Гній. 5. Солома + сидерат. 6. Гній + сидерат. 7. $N_{30}P_{30}K_{30}$. 8. $N_{30}P_{30}K_{30}$ + солома + сидерат. 9. $N_{60}P_{60}K_{60}$. 10. $N_{60}P_{60}K_{60}$ + солома + сидерат. 11. $N_{90}P_{90}K_{90}$. 12. $N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома + сидерат.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

Рис. 1. Вплив післядії гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного лютинового сидерату та прямої дії мінеральних добрив на чисельність бактерій, які розчиняють органофосфати у ризосферному ґрунті рослин ячменю ярого сорту Гося (середнє за 2024–2025 рр.).



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. $N_{30}P_{30}K_{30}$ + сидерат + гній.

Рис. 2. Вплив післядії ґною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та у поєднанні з мінеральними добривами на чисельність бактерій, які розчиняють кальційфосфати у ризосферному ґрунті рослин ячменю ярого сорту Гося (середнє за 2024–2025 рр.).



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.

Рис. 3. Вплив післядії ґною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та у поєднанні з мінеральними добривами на фосфатазну активність у ризосферному ґрунті рослин ячменю ярого сорту Гося (середнє за 2024–2025 рр.).

позитивний зв'язок між чисельністю фосфатомобілізуючих мікроорганізмів і фосфатазною активністю ґрунту за внесення органічної речовини, тоді як за застосування мінеральних добрив фосфатазна активність знижувалася незалежно від чисельності мікробіоти, що свідчить про регуляцію фермен-

тативної активності рівнем доступного фосфору в ґрунті.

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

чає можливість оптимізувати норми мінеральних добрив без зниження урожайності, зберігаючи біологічну рівновагу ґрунтового середовища.

Ступінь рухомості фосфатів у ризосфері рослин ячменю ярого в основні фази онтогенезу рослин. Доступність фосфору в ґрунті для рослин визначається складною взаємодією фізико-хімічних, біологічних та агротехнічних чинників. У більшості ґрунтів лише 0,1–0,3 % загального вмісту фосфору перебуває в рухомій, доступній для рослин формі, переважно у вигляді ортофосфатів ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}), тоді як основна частина міститься у малорозчинних мінеральних або органічних сполуках [12]. Керування чинниками, що впливають на розчинність фосфатів (через регулювання рН, внесення органічних речовин, використання мікоризи та інших фосфатсолубілізівних мікроорганізмів) дає змогу підвищити ефективність використання фосфору рослинами й зменшити його втрати з агроecosистеми.

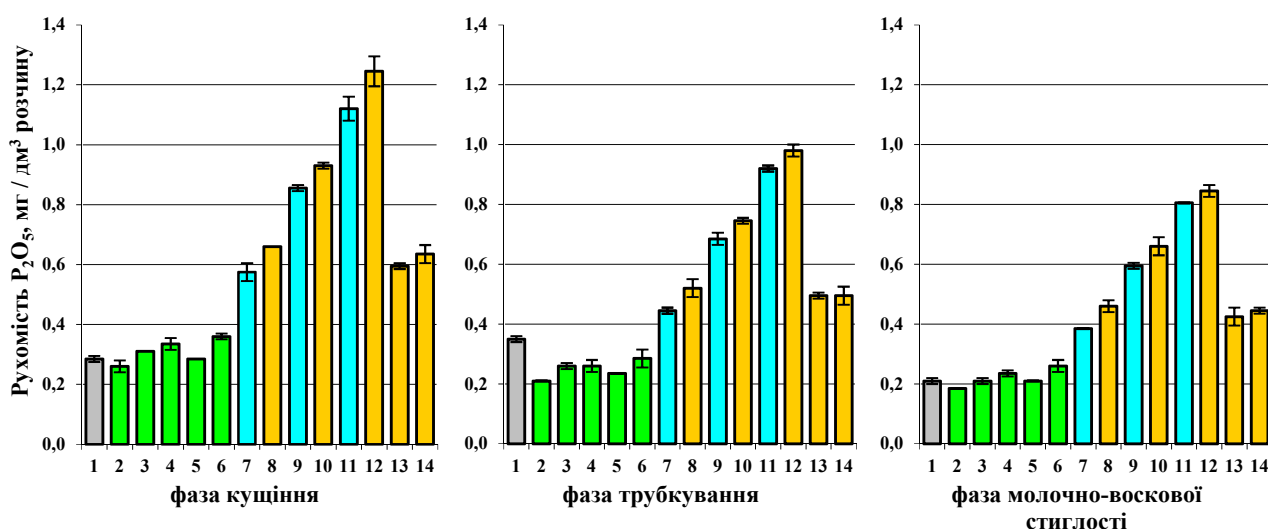
За своїми морфо-біологічними ознаками ярий ячмінь є досить вимогливим до родючості ґрунту. Водночас рослина має недостатньо розвинену кореневу систему, що характеризується низькою здатністю засвоювати важкодоступні сполуки фосфору. У зв'язку з цим для нормального росту й розвитку

рослин у ґрунті має міститися достатня кількість рухомого фосфору.

В умовах досліду рухомість фосфатів була найвищою у варіантах, де системно вносили мінеральні добрива. Чим більшою була норма мінеральних добрив, тим вищою була рухомість фосфатів. Найвищу рухомість фосфатів відзначено у фазу кушіння (рис. 4). Показники поступово зменшувалися у фазу трубкування та фазу молочно-воскової стиглості. Це, імовірно, пов'язано з тим, що частина рухомого фосфору засвоювалася рослинами, а частина фіксувалася ґрунтом.

Варто зазначити, що рухомість фосфатів із мінеральних добрив у ризосфері рослин ячменю ярого помітно підвищувалася (до 12 %) при застосуванні туків по фонах післядії органічних добрив. Вірогідно, це відбувалося завдяки утворенню органічних кислот, активізації фосфатсолубілізівних мікроорганізмів, зростанню фосфатазної активності, покращенню структури ґрунту та його вологотримувальної здатності, зниженню сорбції фосфору оксидами Fe та Al і підсиленню кореневої ексудації.

Динаміка вмісту фосфору в рослинах і зерні ячменю. Маючи слаборозвинену кореневу систему, ячмінь досить вимогливий до родючості ґрунту. Для одержання високих і сталих урожаїв важливим є забезпечення



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.

Рис. 4. Вплив післядії гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та у поєднанні з мінеральними добривами на ступінь рухомості фосфатів у ризосферному ґрунті рослин ячменю ярого (середнє за 2024–2025 рр.).

його в достатній кількості доступними елементами живлення, зокрема азотом, фосфором і калієм [13]. За даними Цехеновича [14], найінтенсивніше надходження основних елементів живлення у рослин ячменю ярого відбувається протягом досить короткого проміжку часу — від фази кущіння до колосіння (26–28 днів). За цей період рослини споживають 61–64 % фосфору. До фази колосіння фосфору споживається 90 % від загального виносу його врожаєм. Проте це залежить від біологічних особливостей сортів, наявних запасів поживних речовин у ґрунті, попередників тощо [15; 16].

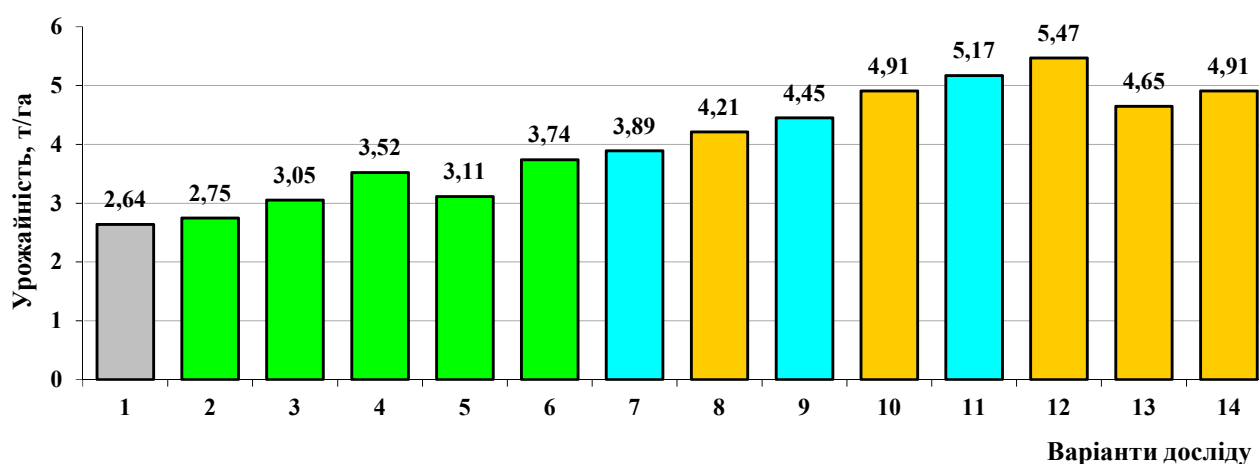
Вміст фосфору в сухій біомасі ячменю ярого змінюється протягом онтогенезу внаслідок різної потреби рослини на окремих етапах розвитку, ефекту «розбавлення» біомаси, зміни інтенсивності поглинання фосфору з ґрунту та активного перерозподілу елемента в бік генеративних органів. У ранні фази (проростання-кущення) концентрація фосфору максимальна, у період трубкування та колосіння — зменшується, а під час наливу зерна більша частина фосфору мігрує в колос і накопичується в зерні.

У досліді вміст фосфору в рослинах ячменю мав тенденцію до збільшення при зростанні норми удобрення. У фазу кущіння показники змінювалися від 0,2 % до 0,22 %, у фазу трубкування — від 0,14 % до 0,16 %, у фазу молочно-воскової стиглості — від 0,1 % до 0,12 %, у зерні — від 0,27 % до 0,3 %.

Отримані результати щодо вмісту фосфору у вегетативній масі та зерні ячменю є співставними з даними, наведеними в літературних джерелах. Установлено тенденцію до зниження концентрації фосфору у вегетативній масі від ранніх до пізніших фаз онтогенезу. Виявлені відмінності, імовірно, зумовлені ґрунтовими умовами вирощування, сортовими особливостями культури й метеорологічними умовами вегетаційного періоду, які визначають інтенсивність поглинання й ремобілізації фосфору з вегетативних органів у генеративні [17].

Урожайність зерна ячменю ярого та винос фосфору з ґрунту. Урожайність культури зростала відповідно до інтенсифікації удобрення: від 2,64 т/га (контроль) до 5,47 т/га ($N_{90}P_{90}K_{90}$ + солома + сидерат). Поєднання післядії органічної речовини з мінеральними добривами забезпечувало найвищу продуктивність ячменю ярого, що вказує на ключову роль мікробіологічної активності ґрунту та збалансованого живлення в підвищенні реалізації потенціалу культури (рис. 5).

Для розрахунку виносу фосфору з побічною продукцією враховували вміст фосфору у фазу молочно-воскової стиглості. Для розрахунку виносу фосфору з ґрунту зерном ячменю брали до уваги вміст фосфору у зерні з польовою вологістю 9,2 %. З урожайністю зерна ячменю тісно корелює винос P_2O_5 із ґрунту з урожаєм і побічною продукцією — від 25,6 кг/га у контролі без удобрення до



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.

Рис. 5. Вплив післядії гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та у поєднанні з мінеральними добривами на урожайність зерна ячменю ярого сорту Гося (середнє за 2024–2025 рр.), $НІР_{05} = 0,24$ т/га.

57,3 кг/га у тому ж варіанті N₉₀P₉₀K₉₀ + солома + сидерат.

Встановлено, що застосування N₉₀P₉₀K₉₀ по фоні першого року післядії соломи із сидератом забезпечило винос P₂O₅ на рівні 30,0 кг/га, що вище на 5,2 кг/га за показник виносу при внесенні цієї ж норми добрив у чистому вигляді (24,8 кг/га). В інших варіантах збільшення виносу P₂O₅ з мінеральних добрив, застосованих по фоні післядії органічних добрив, було незначним (табл.).

Таблиця. Вплив післядії гною ВРХ, соломи й біомаси проміжного люпинового сидерату окремо та у поєднанні з мінеральними добривами на винос P₂O₅ з урожаєм і побічною продукцією ячменю ярого (середнє за 2024–2025 рр.)

Варіанти дослідів	Винос P ₂ O ₅ , кг/га	Зростання виносу P ₂ O 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

Винос P₂O₅ із урожаєм і побічною продукцією ячменю ярого зростав відповідно до інтенсифікації удобрення. З підвищенням доз NPK посилювався винос фосфору, що відображає більш активне засвоєння елемента рослинами та стимуляцію формування урожаю. Післядії соломи й сидерату самостійно зумовлювала лише незначне збільшення виносу P₂O₅ (на 1,7 кг/га), тобто органічне удобрення без мінерального супроводу проявляло помірний ефект. Натомість у поєднанні з NPK вплив органічної речовини істотно посилювався: у варіанті N₉₀P₉₀K₉₀ + солома +

сидерат винос P₂O₅ був максимальним і становив 57,3 кг/га (приріст + 31,7 кг/га щодо контролю), що свідчить про синергічну дію органічних і мінеральних добрив у мобілізації фосфору.

Післядія гною виявилася значно сильнішою, як порівняти з післядією соломи й сидерату (6,9 проти 1,7 кг/га приросту виносу P₂O₅). За варіанту гній + N₃₀P₃₀K₃₀ винос фосфору досягав 45,2 кг/га, що є співставним із показником варіанта N₆₀P₆₀K₆₀. Поєднання гній + N₃₀P₃₀K₃₀ + сидерат забезпечувало винос 47,8 кг/га P₂O₅, що наближається до рівня варіанта N₆₀P₆₀K₆₀ + солома + сидерат.

Узагальнюючи результати, можна відзначити такі закономірності:

- органічні добрива підсилюють ефект мінерального удобрення, особливо за застосування підвищених доз NPK;

- післядія гною є більш вираженою, ніж післядія соломи й сидерату, що пов'язано з більшим запасом легкодоступних органічних сполук вуглецю та фосфору;

- внесення органічної речовини сприяє посиленню мобілізації фосфору в ґрунті, що проявляється у додатковому прирості виносу P₂O₅ урожаєм.

Висновки. Встановлено, що поєднання органічних і мінеральних добрив на чорноземі вилуженому ефективно активізує біологічні процеси трансформації сполук фосфору й сприяє підвищенню продуктивності ячменю ярого. Основний позитивний ефект органічно-мінерального удобрення зумовлений стимуляцією фосфатмобілізуювальних мікроорганізмів, які забезпечують гідроліз органічних і кальційзв'язаних форм фосфору за рахунок ферментативної активності й утворення органічних кислот. Мобілізація фосфатів, зв'язаних з алюмінієм і залізом, за умов дослідів була менш вираженою, що обмежує їхній внесок у фосфорне живлення ячменю ярого на досліджуваному ґрунті. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оцінку тривалості післядії органічної речовини (соломи, сидерату, гною) на активність фосфатмобілізуювальних мікроорганізмів і доступність фосфору для рослин у сівозміні.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Yang W., Jiang Y., Zhang J., Wang W, Liu X., Jin Y. ... Zhu Y. Organic materials promote soil phosphorus cycling: Metagenomic analysis. *Agrono-*

- my. 2025. Vol. 15, № 7. 1693. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071693>
2. Luo Y., Liang J., Zhou C. The combination of mineral fertilizer with organic fertilizer improved soil phosphorus availability. *All Life*. 2024. Vol. 17, № 1. 2370421. <https://doi.org/10.1080/26895293.2024.2370421>
 3. Zhu Y., Xing Y., Li Y., Jia J., Ying Y., Shi W. The role of phosphate-solubilizing microbial interactions in phosphorus activation and utilization in plant-soil systems: a review. *Plants (Basel)*. 2024. Vol. 13, № 19. 2686. <https://doi.org/10.3390/plants13192686>
 4. Brod E., Falk A., Krogstad T., Haraldsen T. K., Emmanue Frossard E., Astrid Oberson A. Phosphorus uptake by barley following secondary resource application. *Frontiers in Nutrition*. 2016. Vol. 3. 12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2016.00012>
 5. Wang J., Zhang G., Yu C. A meta-analysis of the effects of organic and inorganic fertilizers on the soil microbial community. *Journal of Resources and Ecology*. 2020. Vol. 11, № 3. P. 298–303. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764X.2020.03.007>
 6. Rocabruna P. C., Domene X., Matteazzi A., Figl U., Fundneider A., Fernandez-Martinez M. ... Peratoner G. Effect of organic fertilisation on soil phosphatase activity, phosphorus availability and forage yield in mountain permanent meadows. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2024. Vol. 368. 109006. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109006>
 7. Janes-Bassett V., Blackwell M., Blair G., Davies J., Haygarth P., Mezeli M., Stewart G. A meta-analysis of phosphatase activity in agricultural settings in response to phosphorus deficiency. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022. Vol. 165. 108537. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108537>
 8. Карабач К. С., Козак В. М. Фосфатазна активність чорнозему типового за застосування мінімізації обробітку ґрунту та біологізації землеробства. *Вісник аграрної науки*. 2014, № 8. С. 14–17.
 9. Експериментальна ґрунтова мікробіологія: монографія / В. В. Волкогон, О. В. Надкернична, Л. М. Токмакова та ін.; за наук. ред. В. В. Волкогона. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.
 10. ДСТУ 4727:2007. Якість ґрунту. Визначення рухомих сполук фосфору за методом Карпінського-Зам'ятіної в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н. Соколовського. [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 9 с.
 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.
 12. Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*. 2001. Vol. 237, № 2. P. 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>.
 13. Лісовий М. В. Підвищення ефективності мінеральних добрив. Київ : Урожай, 1991. 120 с.
 14. Цехенович Ю. В. Биологический вынос основных элементов питания ячменя при различных уровнях применения удобрений. *Известия БССР. Серия сельскохозяйственных наук*. 1991. № 1. С. 56–59.
 15. Daniela T., Marcel B., Ioan V. Studies regarding dynamics of water and nutrients absorption in winter barley and wheat. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2014. Vol. 57. P. 367–371.
 16. Csajbók J., Pepó P., Kutasy E. Photosynthetic and agronomic traits of winter barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. *Agronomy*. 2020. Vol. 10, № 12. 1999. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121999>
 17. Bolland M. D. A., Brennan R. F. Critical phosphorus concentrations for oats, barley, triticale, and narrow-leaf lupin. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2005. Vol. 36, № 9. P. 1177–1186. <https://doi.org/10.1081/CSS-200056891>

Отримано: 29.08.2025

Прийнято до друку: 08.10.2025

Опубліковано онлайн: 29.12.2025

MICROBIOLOGICAL TRANSFORMATION OF PHOSPHORUS COMPOUNDS IN ORGANIC-MINERAL FERTILIZATION OF SPRING BARLEY

I. M. Pyschur, <https://orcid.org/0009-0000-6719-8427>,

I. O. Glybovets, <https://orcid.org/0009-0002-0513-801X>

Institute of Agricultural Microbiology and Agroindustrial Manufacture, NAAS, Chernihiv
e-mail: Pyschur@ukr.net

Objective. To research the peculiarities of microbiological transformation of phosphorus compounds in the root zone of spring barley plants after the application of cattle manure, wheat straw, and lupine green manure biomass separately and in combination with the direct action of mineral fertilizers when growing crops on leached black soil. **Methods.** A field stationary experiment in the crop rotation cycle potato – barley – peas – winter wheat; microbiological (determination of the number of bacteria that dissolve organic and calcium-bound forms of phosphates, Al- and Fe-phosphates), biochemical (phosphatase activity according to the Heller–Ginzburg method), agrochemical (degree of phosphate mobility according to the Karpinsky-Zamyatina method, phosphorus content in dry plant matter), and statistical. **Results.** The aftereffect of straw, green manure, and manure caused a 2.0–3.1-times increase in the number of phosphate-solubilizing microorganisms in the rhizosphere soil of barley and a double increase in phosphatase activity compared to the control, while the long-term systematic application of mineral fertilizers alone did not significantly stimulate the development of these groups of microbiota and, in some cases, inhibited enzymatic activity. Combined organic-mineral systems contributed to increased phosphorus mobilization and an increase in the proportion of mobile phosphates in the rhizosphere, resulting in an increase in grain yield from 2.64 to 5.47 t/ha and P₂O₅ removal. It has been established that the application of N₉₀P₉₀K₉₀ against the background of the first year of straw and green manure after-effects ensures the maximum realization of the crop's potential due to the synergy of microbiological and agrochemical mechanisms of phosphorus mobilization. **Conclusions.** The combination of mineral fertilizers with the aftereffect of organic matter of various origins is an effective way to maintain a high level of phosphatase activity, activate phosphate-solubilizing microorganisms, increase phosphate mobility, optimize phosphorus nutrition, and increase the productivity of spring barley on leached black soil. The results obtained indicate the possibility of replacing part of mineral fertilizers with organic resources without reducing yield and with improving soil biological activity.

Key words: organic substrates, barley productivity, phosphate mobility, phosphate solubilization, phosphatase activity, phosphate-solubilizing microorganisms.

REFERENCES

1. Yang, W., Jiang, Y., Zhang, J., Wang, W., Liu, X., Jin, Y. ... Zhu, Y. (2025). Organic materials promote soil phosphorus cycling: Metagenomic analysis. *Agronomy*, 15(7), 1693. <https://doi.org/10.3390/agronomy15071693>
2. Luo, Y., Liang, J., & Zhou, C. (2024). The combination of mineral fertilizer with organic fertilizer improved soil phosphorus availability. *All Life*, 17(1), 2370421. <https://doi.org/10.1080/26895293.2024.2370421>
3. Zhu, Y., Xing, Y., Li, Y., Jia, J., Ying, Y., & Shi, W. (2024). The role of phosphate-solubilizing microbial interactions in phosphorus activation and utilization in plant-soil systems: A review. *Plants (Basel)*, 13(19), 2686. <https://doi.org/10.3390/plants13192686>
4. Brod, E., Falk, A., Krogstad, T., Haraldsen, T. K., Frossard, E., & Oberson, A. (2016). Phosphorus uptake by barley following secondary resource application. *Frontiers in Nutrition*, 3, 12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2016.00012>
5. Wang, J., Zhang, G., & Yu, C. (2020). A meta-analysis of the effects of organic and inorganic fertilizers on the soil microbial community. *Journal of Resources and Ecology*, 11(3), 298–303. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764X.2020.03.007>
6. Rocabrana, P. C., Domène, X., Matteazzi, A., Figl, U., Fundneider, A., Fernández-Martínez, M.,

- ... Peratoner, G. (2024). Effect of organic fertilisation on soil phosphatase activity, phosphorus availability and forage yield in mountain permanent meadows. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 368, 109006. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109006>
7. Janes-Bassett, V., Blackwell, M. S. A., Blair, G., Davies, J., Haygarth, P. M., Mezeli, M. M., & Stewart, G. (2022). A meta-analysis of phosphatase activity in agricultural settings in response to phosphorus deficiency. *Soil Biology and Biochemistry*, 165, 108537. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108537>
8. Karabach, K. S., & Kozak, V. M. (2014). Fosfatazna aktivnist chornozemu tipovoho za zas-tosuvannia minimizatsii obrobittu gruntu ta biolo-hizatsii zemlerobstva [Phosphatase activity of typical chernozem under reduced tillage and biologiza-tion of agriculture]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 8, 14–17 [in Ukrainian].
9. Volkogon, V. V. (Ed.). (2010). *Ekspyrymentalna gruntova mikrobiolohiia: Monohrafiia* [Expe-riental soil microbiology: Monograph]. Kyiv: Ah-rarna nauka [in Ukrainian].
10. DSTU 4727:2007 (2008). Yakist gruntu. Vyznachennia rukhomykh spoluk fosforu za meto-dom Karpinskoho-Zam'iatinoi v modyfikatsii NNTS IHA im. O. N. Sokolovskoho [Soil quality. Deter-mination of mobile phosphorus compounds by the Karpinsky-Zamyatina method in the modification of NSC ISSA named after O. N. Sokolovsky]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].
11. Baliuk, S. A., Hrekov, V. O., Lisovyi, M. V., & Komarysta, A. V. (2011). *Rozrakhunok balansu humusu i pozhyvnykh rehovyn u zemlerobstvi Ukrainy na riznykh rivniakh upravlinnia* [Calcula-tion of the balance of humus and nutrients in agricul-ture of Ukraine at different management levels]. Kharkiv: KP "Mis'ka drukarnia" (ISBN 978-617-619-035-6) [in Ukrainian].
12. Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237(2), 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>
13. Lisovyi, M. V. (1991). *Pidvyschennia efe-ktyvnosti mineralnykh dobryv* [Improving the effi-ciency of mineral fertilizers]. Kyiv: Urozhai [in Uk-rainian].
14. Tsekhenovich, Yu. V. (1991). Biologiches-kii vynos osnovnykh elementov pitaniia iachmenia pri razlichnykh urovniakh primeneniia udobrenii [Biological removal of major nutrients in barley at different fertilizer application levels]. *Izvestiia BSSR. Serii sel'skokhoziaistvennykh nauk — News of the BSSR. Agricultural Sciences Series*, 1, 56–59 [in Russian].
15. Daniela, T., Marcel, B., & Ioan, V. (2014). Studies regarding dynamics of water and nutrients absorption in winter barley and wheat. *Scientific Pa-pers. Series A. Agronomy*, 57, 367–371.
16. Csajbók, J., Pepó, P., & Kutasy, E. (2020). Photosynthetic and agronomic traits of winter barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. *Agronomy*, 10(12), 1999. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121999>
17. Bolland, M. D. A., & Brennan, R. F. (2005). Critical phosphorus concentrations for oats, barley, triticale, and narrow-leaf lupin. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(9), 1177–1186. <https://doi.org/10.1081/CSS-200056891>

Received: 29.08.2025

Accepted: 08.10.2025

Published online: 29.12.2025