

## МІКРОБІОЛОГІЧНА ТРАНСФОРМАЦІЯ ФОСФОРУ В КОРЕНЕВІЙ ЗОНІ РОСЛИН СОНЯШНИКУ ЗА ДІЇ *VACILLUS SP. 2473* ТА РІЗНОГО СТУПЕНЯ УДОБРЕННЯ КУЛЬТУРИ

Л. М. Токмакова, А. О. Трепач, І. М. Пищур

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

**Мета.** Дослідити особливості мікробіологічної трансформації сполук Фосфору в кореневій зоні рослин соняшнику за дії *Vacillus sp. 2473* та різного ступеня удобрення культури. **Методи.** Польового дослідження; мікробіологічні (облік бактерій, здатних розчиняти нерозчинні комплекси фосфатів із катіонами  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  та гідролізувати органічні фосфати у ризосферному ґрунті рослин соняшнику); біохімічні (визначення фосфатазної активності ґрунту); хімічні (визначення вмісту фосфору в ґрунті та в рослинах); статистичні. **Результати.** В умовах польового дослідження на чорноземі вилуженому встановлено, що протягом вегетаційного періоду соняшнику в ґрунті за інтродукції в агроценоз *Vacillus sp. 2473* зростає чисельність бактерій, здатних до розчинення нерозчинних комплексів фосфатів із катіонами  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  та бактерій, що гідролізують органічні форми фосфатів, як порівняти з показниками контрольних варіантів. Фосфатазна активність протягом вегетації рослин зростає та досягає найвищих значень у фазу досягання насіння. Найнижчі показники вмісту фосфору в ризосферному ґрунті рослин соняшнику відзначено за передпосівної інокуляції *Vacillus sp. 2473*. Вміст  $\text{P}_2\text{O}_5$  знижувався у фазу 7–8 листків від  $0,25 \text{ мг } \text{P}_2\text{O}_5/\text{дм}^3$  ґрунтового розчину (у контролі) до  $0,21 \text{ мг } \text{P}_2\text{O}_5/\text{дм}^3$  за дії інокулянта, у фазу цвітіння — від  $0,42 \text{ мг } \text{P}_2\text{O}_5/\text{дм}^3$  до  $0,31 \text{ мг } \text{P}_2\text{O}_5/\text{дм}^3$ , у фазу досягання насіння — від  $0,24 \text{ мг } \text{P}_2\text{O}_5/\text{дм}^3$  до  $0,21 \text{ мг } \text{P}_2\text{O}_5/\text{дм}^3$  відповідно, що свідчить про підсилення засвоєння фосфору бактеризованими рослинами. Оптимальним агрофоном, враховуючи вплив добрив на розвиток фосфатмобілізуювальних мікроорганізмів, є застосування мінеральних добрив у нормі, що не перевищує  $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ . **Висновки.** За впливу фосфатмобілізуювальної бактерії *Vacillus sp. 2473* активізуються процеси трансформації Фосфору в кореневій зоні рослин соняшнику, на що вказує підвищення чисельності фосфатмобілізуювальних бактерій, фосфатазної активності та ступеня рухомості фосфатів у ризосферному ґрунті рослин. Внаслідок цього підсилюється засвоєння рослинами Фосфору, що підтверджується підвищенням виносу його з урожаєм культури від  $47,3 \text{ кг/га}$  до  $74,8 \text{ кг/га}$ , водночас ефективність фосфорного живлення рослин складає  $53,8 \%$  (по фоні  $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ ).

Ключові слова: інокуляція, ґрунтові мікроорганізми, мінеральні добрива, сполуки фосфору в ґрунті, соняшник, чорнозем вилужений.

**Вступ.** Соняшник як основна олійна культура в Україні займає близько 70 % посівних площ під всі олійні культури. Його особливість — потреба в інтенсивному мінеральному живленні, тож рослини вимогливі до запасів поживних речовин у ґрунті. Це потребує удосконалення наявних технологій вирощування культури. Для інтенсифікації ко-

реневого живлення сільськогосподарських культур сьогодні пропонується низка заходів, серед яких перспективним вважається застосування біологічних препаратів на основі агрономічно корисних мікроорганізмів [1; 2]. У зв'язку з цим актуальним є пошук нових штамів мікроорганізмів, здатних до розчинення важкодоступних сполук Фосфору

в ґрунті та синтезу біологічно активних речовин [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Провідну роль у трансформації фосфоровмісних сполук ґрунту відіграють мікроорганізми, які внаслідок своєї життєдіяльності здатні виділяти органічні кислоти і ферменти, і, перебуваючи у тісній взаємодії з рослинами та іншими мікроорганізмами, можуть збільшувати вміст розчинних сполук Фосфору в ризосферному ґрунті, тим самим покращувати фосфорне живлення рослин [4; 5]. У колообігу фосфору в природі мобілізація важкорозчинних сполук цього елемента ґрунтовими мікроорганізмами — одна з найважливіших ланок. Її реалізацію забезпечують представники різних видів бактерій і мікроемітетів. За даними Ванерґеє зі співавт. [6], активними фосфатмобілізаторами є представники родів *Bacillus* і *Pseudomonas*. Продукуючи органічні кислоти, ферменти і діоксид Карбону ( $\text{CO}_2$ ), вони активно трансформують фосфоровмісні сполуки [7; 8]. Окрім того, фосфатмобілізувальні мікроорганізми синтезують метаболіти, які беруть участь у стимулюванні ростових процесів (фітогормони, вітаміни, амінокислоти тощо) та захисті від фітопатогенів (антибіотики, літичні ферменти, сидерофори тощо) [9].

Застосування мікробних препаратів, створених на основі активних штамів фосфатмобілізувальних мікроорганізмів, у сільськогосподарському виробництві може стати незамінною складовою оптимізації фосфорного живлення рослин, підвищення його продуктивності та покращення якості продукції.

У зв'язку з цим **метою** наших досліджень було визначення ролі фосфатмобілізувальної бактерії *Bacillus* sp. 2473 у процесах трансформації Фосфору ґрунту та добрив у кореневій зоні рослин сояшнику та дослідження умов ефективного поєднання бактеризації з мінеральними добривами.

**Матеріали та методи.** Дослідження проводили в 2021–2023 рр. на базі дослідного поля Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН відповідно до загальноприйнятих методик. Ґрунт дослідного поля — чорнозем вилужений з  $\text{pH}_{\text{сол}}$  — 5,30 та вмістом поживних елементів у кількості 2,12 % гумусу, 95,2 мг/кг азоту легкогідролізованого, 226 мг/кг

фосфору, 108 мг/кг обмінного калію. Схема досліду з сояшником гібриду Кадет передбачала такі варіанти:

Без бактеризації

- 1) контроль (без добрив);
- 2)  $\text{N}_{30}\text{P}_{30}\text{K}_{30}$ ;
- 3)  $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$ ;
- 4)  $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ ;
- 5)  $\text{N}_{120}\text{P}_{120}\text{K}_{120}$ .

Бактеризація насіння *Bacillus* sp. 2473:

6–10 — аналогічні до 1–5 варіанти удобрення.

Площа дослідної ділянки становила 50,4 м<sup>2</sup>, повторність досліду — триразова.

Бактеризацію насіння сояшника здійснювали за використання *Bacillus* sp. 2473 з розрахунку 0,5 млн клітин на насінину. *Bacillus* sp. 2473 виділений Л. Токмаковою із сірого підзолистого супіщаного ґрунту (м. Луцьк, Україна). Штам проявляє здатність перетворювати важкорозчинні органічні і неорганічні сполуки Фосфору в доступну для засвоєння рослинами форму та продукує біологічно активні речовини.

Мінеральні добрива (нітроамофоску) вносили під передпосівну культивуацію згідно зі схемою досліду.

Титр клітин бактерій у бактеріальних суспензіях визначали за використання камери Горяєва [10], облік життєздатності *Bacillus* sp. 2473 — на середовищі МПА. Ґрунтові зразки відбирали з кореневої зони рослин сояшнику в основні фази органогенезу: ріст стебла, цвітіння, розвиток плодів [11]. Визначення вологості ґрунту проводили гравіметричним методом згідно з ДСТУ ISO 11465 [12]. Чисельність бактерій, які можуть розчиняти мінеральні та органічні фосфати, визначали шляхом мікробіологічного посіву водних розведень ґрунтової суспензії на живильні середовища Муромцева з додаванням  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  — 5 г/дм<sup>3</sup> ( $\text{P}_2\text{O}_5$  229 мг/100 см<sup>3</sup>),  $\text{AlPO}_4$  — 2,376 г/дм<sup>3</sup> ( $\text{P}_2\text{O}_5$  959 мг/100 см<sup>3</sup>),  $\text{FePO}_4$  — 1,215 г/дм<sup>3</sup> ( $\text{P}_2\text{O}_5$  74 мг/100 см<sup>3</sup>); кальцій гліцерофосфату ( $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_2\text{PO}_4\text{Ca}$ ) — 6,0 г/дм<sup>3</sup> ( $\text{P}_2\text{O}_5$  203 мг/100 см<sup>3</sup>) відповідно, з подальшим підрахунком колоній бактерій, навколо яких утворюються зони просвітлення. Фосфатазну активність визначали за методом І. Т. Геллер і К. Е. Гінзбург, вміст Фосфору в рослинах та насінні сояшнику — методом Деніже в модифікації Буватьє [11], винос Фосфору з урожаєм зерна та листо-

стеблової маси соняшнику розраховували за методом Чирікова [13], ступінь рухомості фосфатів ґрунту — за методом Карпінського і Зам'ятіної [14; 15].

Статистичну обробку отриманих даних проводили за використання комп'ютерних програм Microsoft Excel та Origin 8. Статистично вірогідною вважали різницю середніх показників за рівня значимості  $p < 0,05$ .

**Результати та їх обговорення.** Активна мобілізація Фосфору з нерозчинних його сполук відбувається у ризосфері рослин, де завдяки корневим виділенням формується велике угруповання гетеротрофних бактерій. Останні утворюють у процесі дихання  $\text{CO}_2$  (як і самі корені), продукують органічні кислоти та ферменти, що сприяє розчиненню фосфатів. Стійкість фосфорних сполук до мікробного розкладання залежить від їхнього хімічного складу, зокрема від катіонів, з якими зв'язаний фосфат-іон. Так, бактеріальні метаболіти легко мобілізують фосфат Мангану, фосфати Кальцію та Алюмінію розчиняють, але слабше, а фосфат Заліза до таких речовин надзвичайно стійкий [16].

Для реалізації потенціалу урожайності сільськогосподарських культур оптимальне живлення рослин, у т. ч. і фосфорне, — надзвичайно важлива умова, виконання якої безпосередньо залежить від вмісту і складу поживних речовин у ґрунті та їх доступності для рослин. Для посилення мобілізації фосфатів у ґрунті поля, коли відомо про їх хімічний склад, важливим є формування специфічних мікробних угруповань у кореневій зоні рослин. Ефективний спосіб корекції складу і функцій природних угруповань мікроорганізмів — застосування мікробних препаратів відповідної дії шляхом бактеризації насіння сільськогосподарських культур [17]. Інокулянти, крім безпосереднього розчинення ґрунтових фосфатів, ініціюють посилений розвиток кореневої системи рослин, завдяки чому корені здатні проникати у глибші горизонти ґрунту та залучати звідти фосфати, які за інших умов не можуть бути використані рослинами. Така особливість робить інокульовані рослини своєрідною біологічною помпою, здатною повертати фосфати у верхні шари ґрунту, що особливо важливо, оскільки для сполук фосфору характерна тенденція поступово з роками переміщатися у нижні горизонти ґрунтового профілю. Крім того,

фосфатмобілізувальні бактерії часто проявляють фітостимулювальні властивості та антагонізм до фітопатогенів [18]. Отримані нами результати свідчать, що бактеризація сприяє активному розвитку мікроорганізмів, які гідролізують мінеральні сполуки Фосфору та органічні фосфати ґрунту. Щодо бактерій, які мінералізують фосфати Кальцію, їх чисельність зростає за внесення добрив у невеликих кількостях (рис. 1 а). Високі норми добрив —  $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$  і вище — не забезпечують позитивного ефекту, тому їх застосування з цієї позиції недоцільне. На фоні бактеризації чисельність цієї групи бактерій суттєво вища за відповідні контролю по всіх варіантах дослідів і, наприклад, у фазу 7–8 листків становить від 17,3 (контроль без добрив) до 27,7 млн КУО/г ґрунту (*Bacillus* sp. 2473).

Чисельність бактерій, які розчиняють фосфати Al, у кореневій зоні рослин соняшнику починає зростати лише у фазу цвітіння (рис. 1 б). Імовірно, на початкових етапах розвитку рослин ґрунт насичений більш доступним для засвоєння фосфатом Ca з добрив, а в ризосферній зоні домінують бактерії, що його розчиняють, тому у додатковому розчиненні фосфату Алюмінію немає необхідності. В подальшому як внесення добрив, так і бактеризація сприяють підвищенню кількості бактерій цієї групи. Причиною може бути кращий ріст і розвиток рослин, що сприяє збільшенню об'єму кореневої системи та кількості корневих виділень, якими живляться ґрунтові бактерії. Подібна ситуація спостерігалася за визначення чисельності бактерій, які розчиняють фосфати Fe, у ризосферному ґрунті рослин соняшнику (рис. 1 в).

Значну частину мікробоценозу кореневої зони рослин соняшнику становлять бактерії, які мобілізують органофосфати. Оскільки *Bacillus* sp. 2473 (за попередніми дослідженнями) активно розчиняє гліцерофосфат Кальцію та продукує фосфатазу, логічним є збільшення у кореневій зоні інокульованих рослин соняшнику чисельності бактерій, що мобілізують Фосфор з органічних фосфатів (рис. 1 г). Зокрема, у фазу цвітіння їх кількість сягала 38,3 млн КУО/г ґрунту за контрольного показника на рівні 27,2 млн КУО/г ґрунту.

Оцінюючи вплив удобрення на формування угруповання фосфатмобілізувальних бактерій, треба відзначити зростання їх

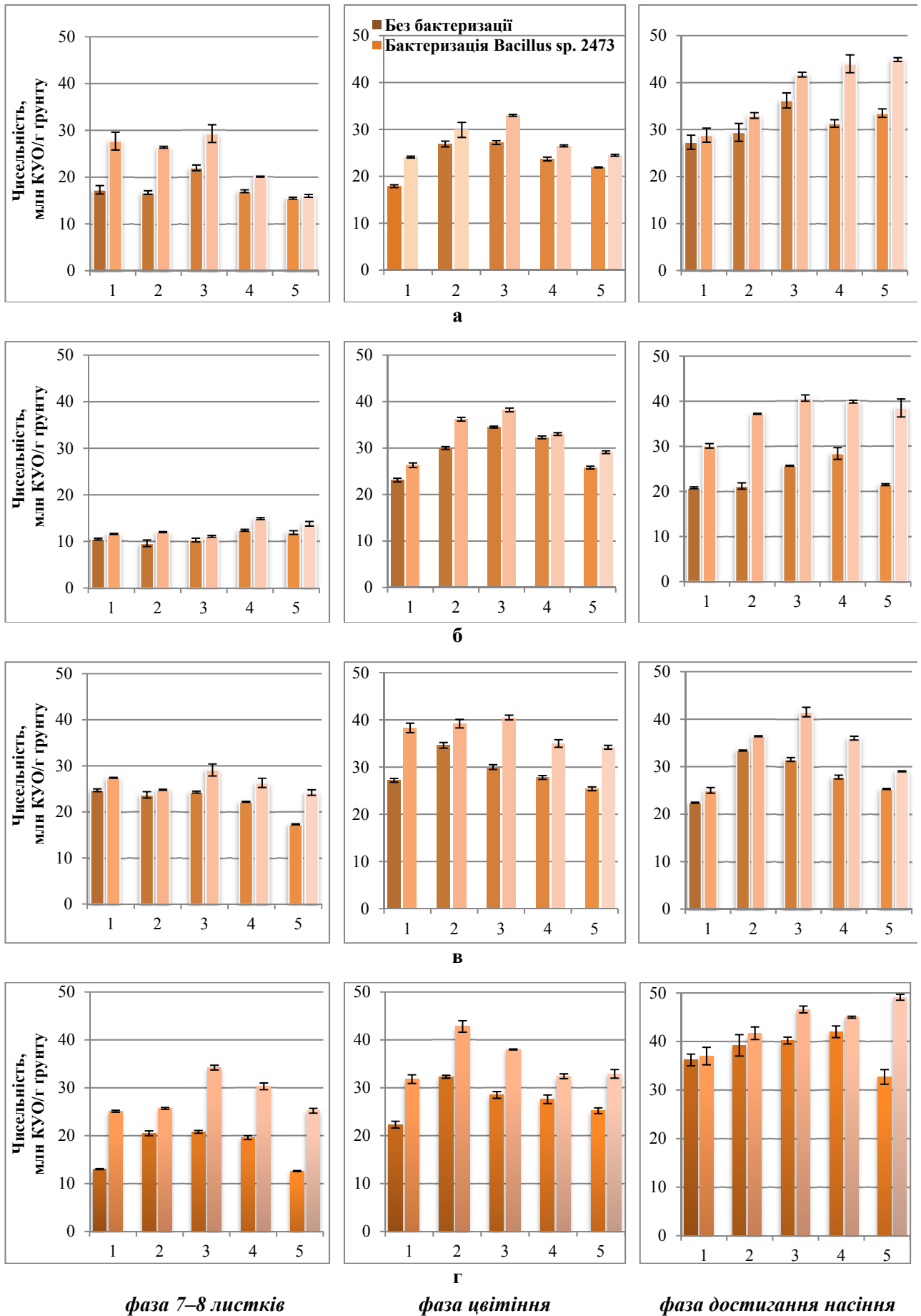


Рис. 1. Вплив бактеризації та добрив на чисельність бактерій, які розчиняють фосфати Ca (а), Al (б), Fe (в), орґанофосфати (г) у ризосферному ґрунті рослин соняшнику: 1. Контроль (без добрив). 2. N<sub>30</sub>P<sub>30</sub>K<sub>30</sub>. 3. N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub>. 4. N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>. 5. N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>120</sub>.

чисельності проти показників контрольного варіанту. Взагалі, за дією добрив на розвиток мікроорганізмів цієї групи оптимальним є застосування мінеральних добрив у нормі, що не перевищує  $N_{90}P_{90}K_{90}$ . Підвищення норми мінеральних добрив вище від зазначеної демонструє тенденцію до негативної дії на розвиток цих мікроорганізмів.

Фосфор органічних сполук не здатний проникнути в клітину, тому не може безпосередньо засвоюватися живими організмами. Спочатку орґанофосфати мають бути мінералізовані шляхом гідролітичного розщеплення в присутності каталізатора — фермента фосфатази. У цьому процесі можуть брати участь до 70–80 % ґрунтових мікроорганізмів, які секретують або вивільняють після відмирання фосфатази з більшою чи меншою субстратною специфічністю [7; 19]. За коливанням рівня фосфатазної активності можна прогнозувати спрямованість процесів біохімічної мобілізації Фосфору в ґрунті, оскільки дослідники відзначають існування кореляційних зв'язків між цими процесами [20], також активність фосфатази вважається чутливим індикатором для оцінки рівня деградації ґрунту в природних екосистемах [21]. У підсумку вивчення цього показника в ризосферному ґрунті рослин соняшнику за дії фосфатмобілізувальної бактерії *Bacillus* sp. 2473

на фоні різних норм мінеральних добрив виявлено, що фосфатазна активність протягом вегетації рослин зростає та досягає найвищих значень у фазу досягання насіння (рис. 2). Вірогідним поясненням є збіднення на рухомі фосфати ґрунту кореневої зони, оскільки до цього періоду рослини соняшнику поглинають основну кількість необхідного фосфору. Це може слугувати пусковим механізмом для активізації процесів мікробного розчинення менш доступних ґрунтових фосфатів, зокрема й органічних форм, що відбувається за участі фосфатаз.

Рівень доступності Фосфору для рослин може бути різним навіть за однакового запасу його рухомих форм у ґрунті. Тому фосфатний стан ґрунту зручніше оцінювати за фактором «інтенсивності» — ступенем рухомості розчинних фосфатів, оскільки він відображає забезпеченість рослин доступним Фосфором [14]. Внаслідок підвищення ступеня рухомості, фосфати швидше засвоюються рослинами соняшнику з кореневої зони, а вираженням цього процесу є зниження вмісту рухомих форм Фосфору в ризосферному ґрунті. У наших дослідженнях суттєво нижчий вміст  $P_2O_5$  у ґрунті відзначали у варіантах з інокуляцією фосфатмобілізувальними бактеріями *Bacillus* sp. 2473 (рис. 3). Так, за бактеризації без фону удобрення

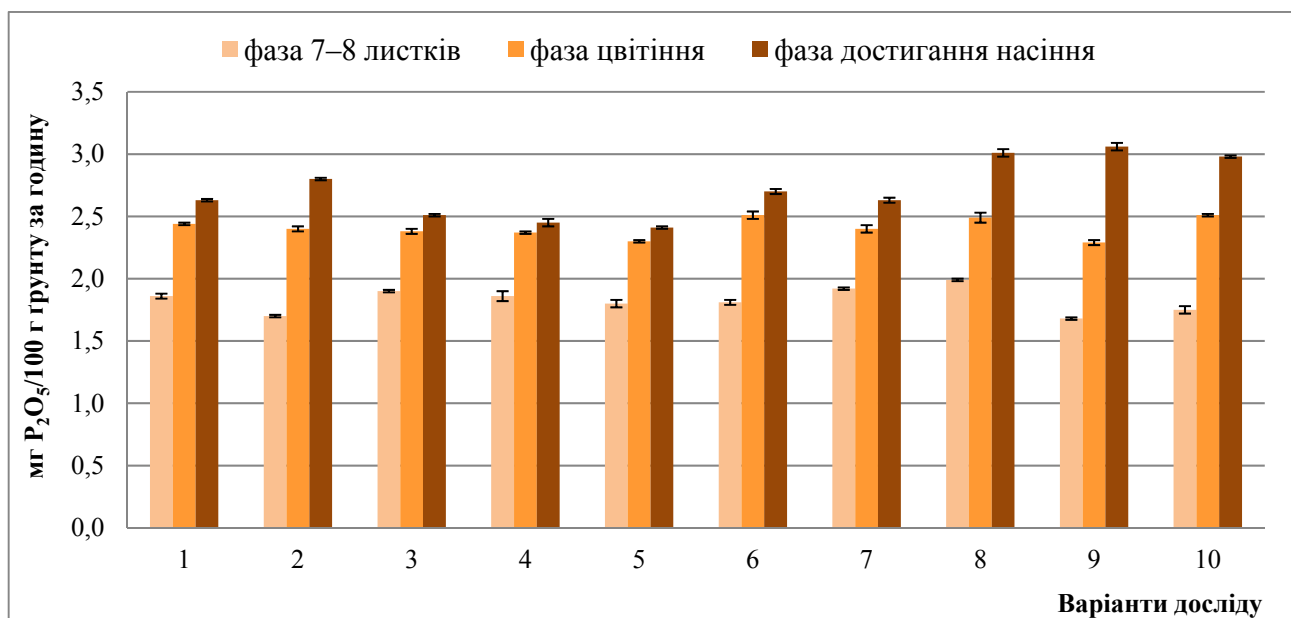


Рис. 2. Загальна фосфатазна активність у ризосферному ґрунті рослин соняшнику гібриду Кадет за впливу *Bacillus* sp. 2473 та добрив.

**Примітка:** тут і в рис. 3 і 4: 1–5 — без бактеризації: 1) контроль (без добрив); 2)  $N_{30}P_{30}K_{30}$ ; 3)  $N_{60}P_{60}K_{60}$ ; 4)  $N_{90}P_{90}K_{90}$ ; 5)  $N_{120}P_{120}K_{120}$ . 6–10 — аналогічні варіанти, але з бактеризацією насіння *Bacillus* sp. 2473.

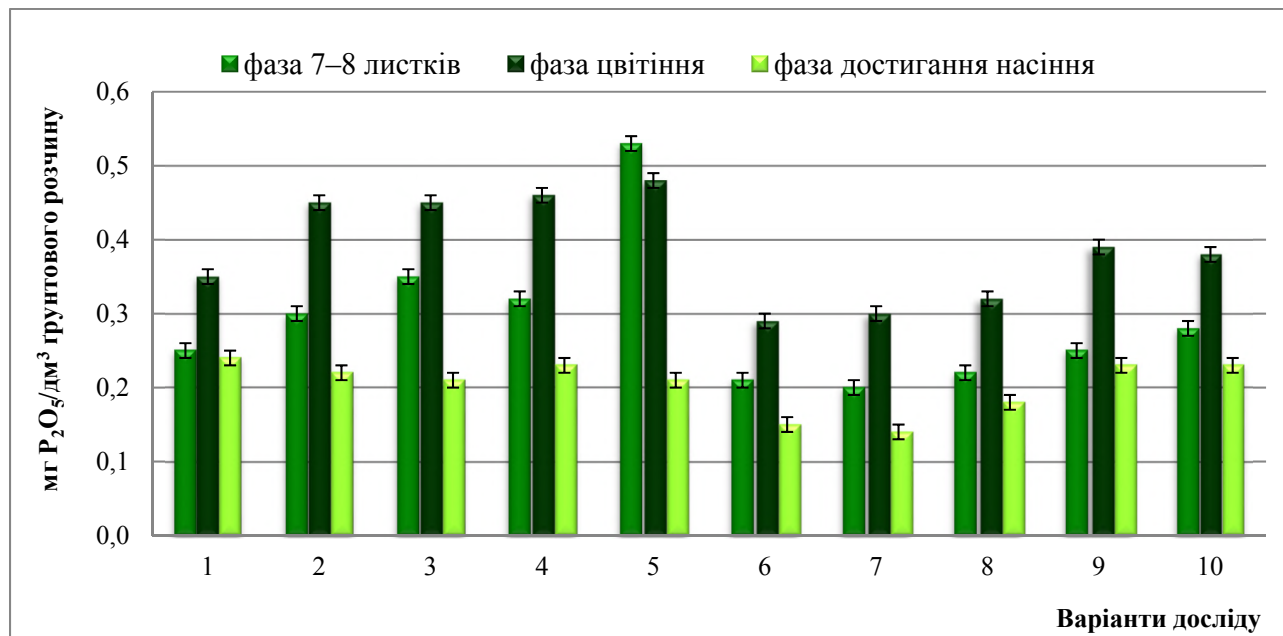


Рис. 3. Ступінь рухомості фосфатів у ризосферному ґрунті рослин соняшнику гібриду Кадет за дії *Bacillus sp.* 2473 та добрив.

вміст фосфору в ризосферному ґрунті рослин становив у фазу 7–8 листків 0,25 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/дм<sup>3</sup>, як порівняти з 0,21 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/дм<sup>3</sup> ґрунтового розчину в контрольному варіанті. У фазу цвітіння показники в цих варіантах сягали відповідно 0,42 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/дм<sup>3</sup> та 0,31 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/дм<sup>3</sup>, а у фазу досягання насіння — 0,24 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/дм<sup>3</sup> та 0,21 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/дм<sup>3</sup>.

Застосування бактеризації також позитивно позначилося на ступені рухомості фосфатів по фонах удобрення. Це свідчить про підвищення засвоєння фосфатів з добрив інокульованими рослинами соняшнику та поліпшення фосфорного живлення рослин.

Вміст макроелементів (Фосфору і Нітрогену) у зерні соняшнику за дії *Bacillus sp.* характеризує вплив досліджуваних факторів — бактеризації та удобрення — на мінеральне живлення рослин. Зокрема, ці дані є показником засвоєння поживних елементів з добрив, що особливо важливо, оскільки зазвичай рослини здатні засвоїти з них лише невелику частку, решта переходить у недоступну форму.

Роль Фосфору в процесах метаболізму Нітрогену в рослині відома. Зокрема, за участі цього елементу відбувається синтез амінокислот та відновлення нітратів до аміаку. Нестача Фосфору негативно позначається на синтезі органічних кислот у рослині, що призводить до погіршення засвоєння Нітрогену,

порушується синтез білка та зменшується його вміст у рослинах, уповільнюється ріст і дозрівання рослин. Внаслідок цих процесів знижується урожай та суттєво погіршується його якість [22].

Отримані результати демонструють, що з кожною додатковою дозою добрив відсоток Фосфору у насінні соняшнику зростає і становить від 1,36 % (контроль) до 1,68 % за застосування N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>120</sub> (табл. 1). Бактеризація *Bacillus sp.* 2473 підвищує ці показники по кожному з варіантів, причому ефективність використання добрив зростає, наприклад, вміст Фосфору в насінні за внесення N<sub>60</sub>P<sub>60</sub>K<sub>60</sub> сумісно з бактеризацією такий же, як і за дії N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub> без інокулянта.

Застосування *Bacillus sp.* 2473 позитивно вплинуло на вміст Нітрогену у продукції та зумовило його підвищення на 0,51 % до контролю. Аналогічний показник отримано за умови внесення мінеральних добрив у нормі N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>. Бактеризація по фоні удобрення сприяла накопиченню Нітрогену в насінні соняшника на 0,99 % більше, ніж у контролі (N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>120</sub>).

Подібну ситуацію спостерігали стосовно вмісту сирого протеїну в насінні досліджуваної культури. Накопичення білка в інокульованих рослинах на 2,80 % перевищувало контрольний показник, а на фоні добрив зросло на 5,5 %, сягаючи рівня 22,9 % (по фоні N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>120</sub>).

Таблиця 1. Вміст Фосфору, Нітрогену та сирого протеїну в насінні соняшнику за впливу *Bacillus sp. 2473* та мінеральних добрив

Варіанти дослідів	Вміст Фосфору, %	Вміст Нітрогену, %	Вміст сирого протеїну, %
Без бактеризації			
Контроль (без добрив)	1,36 ± 0,03	3,17 ± 0,03	17,4 ± 0,02
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	1,37 ± 0,02	3,36 ± 0,02	18,5 ± 0,01
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1,43 ± 0,02	3,43 ± 0,05	18,9 ± 0,03
N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1,57 ± 0,01	3,68 ± 0,01	20,2 ± 0,01
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	1,68 ± 0,03	3,54 ± 0,06	19,5 ± 0,03
Бактеризація <i>Bacillus sp. 2473</i>			
Контроль (без добрив)	1,47 ± 0,01	3,68 ± 0,03	20,2 ± 0,02
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	1,50 ± 0,01	4,12 ± 0,03	22,7 ± 0,02
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	1,61 ± 0,03	4,02 ± 0,01	22,1 ± 0,01
N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	1,78 ± 0,01	3,95 ± 0,01	21,7 ± 0,01
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	1,81 ± 0,03	4,16 ± 0,03	22,9 ± 0,01

Отже, застосування бактеризації насіння соняшнику гібриду Кадет *Bacillus sp. 2473* у вирощуванні культури за мінерального удобрення позитивно діє на засвоєння Нітрогену та накопичення білка у насінні, тобто сприяє покращенню якості продукції цієї культури.

Додаткове надходження Фосфору в інокеровані рослини соняшнику пов'язане зі збільшенням його виносу з ґрунту з урожаєм (рис. 4). Так, винос Фосфору насінням збільшувався від 24,5 кг/га у контролі до 40,3 кг/га, листостебловою масою — від 7,6 кг/га у контролі до 10,1 кг/га на висо-

ких фонах удобрення. Застосування *Bacillus sp. 2473* забезпечило зростання виносу Фосфору від 36,8 кг/га (насіння) до 60,5 кг/га та від 10,5 кг/га до 14,3 кг/га (листо-стеблова маса) і сприяло значному підвищенню значень цього показника по кожному з варіантів дослідів. Загальний винос Фосфору з урожаєм соняшнику за застосування добрив становив від 32,1 кг/га (у контролі) до 50,4 кг/га (табл. 2). Внесення N<sub>120</sub>P<sub>120</sub>K<sub>120</sub> забезпечило ефективність фосфорного живлення на рівні 57,0 %, але така висока норма удобрення є недоцільною з економічної та екологічної точки зору.

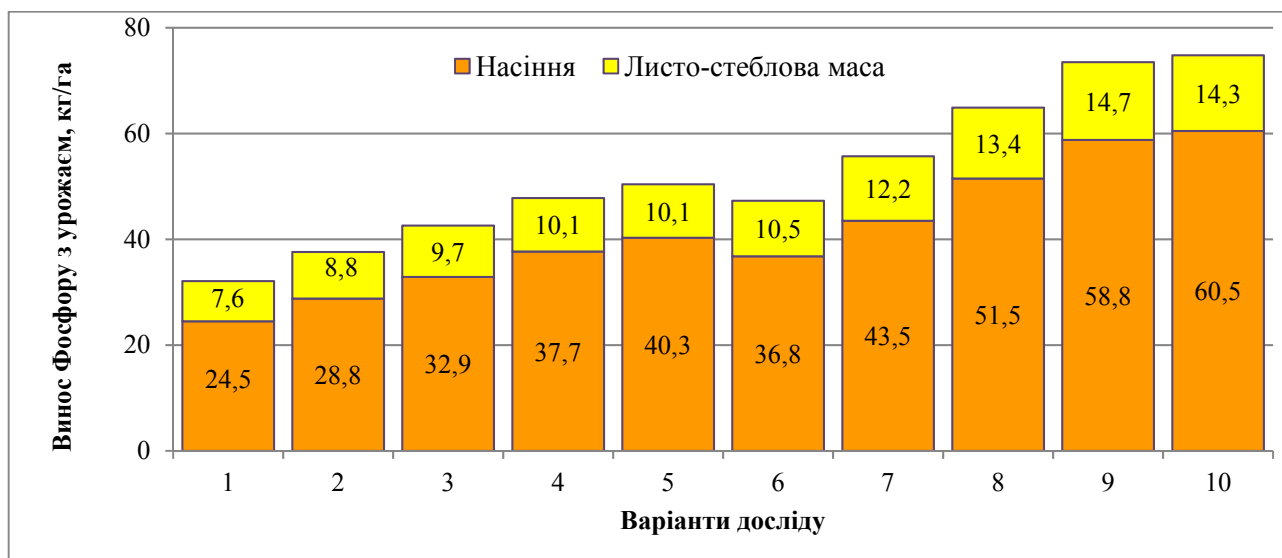


Рис. 4. Винос Фосфору насінням та побічною продукцією соняшнику за впливу *Bacillus sp. 2473* та добрив.

Таблиця 2. Загальний винос Фосфору з урожаєм соняшнику за впливу *Bacillus sp.* 2473 та добрив

Варіанти дослідів	Загальний винос Фосфору з урожаєм, кг/га	Ефективність фосфорного живлення*			
		за дії кожної наступної дози добрив		за дії бактеризації	
		кг/га	%	кг/га	%
Без бактеризації					
Контроль (без добрив)	32,1	–	–	–	–
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	37,6	5,5	17,1	–	–
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	42,6	10,5	32,7	–	–
N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	47,8	15,7	48,9	–	–
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	50,4	18,3	57,0	–	–
Бактеризація <i>Bacillus sp.</i> 2473					
Контроль (без добрив)	47,3	–	–	15,2	47,4
N <sub>30</sub> P <sub>30</sub> K <sub>30</sub>	55,7	–	–	18,1	48,1
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>60</sub>	64,9	–	–	22,3	52,3
N <sub>90</sub> P <sub>90</sub> K <sub>90</sub>	73,5	–	–	25,7	53,8
N <sub>120</sub> P <sub>120</sub> K <sub>120</sub>	74,8	–	–	24,4	48,4

**Примітка:** \* — різниця між показниками загального вносу Фосфору з урожаєм досліджуваного і контрольного варіантів.

Бактеризація також суттєво вплинула на цей показник. Найвищі значення отримано за внесення N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>, де зафіксовано зростання вносу фосфору на 53,8 % до контролю, що свідчить про найбільш ефективне використання добрив рослинами в цьому варіанті дослідів. Важливість одержаних результатів зростає з огляду на те, що оптимальне фосфорне живлення рослин сприяє пришвидшенню їхнього розвитку, а отже, дає змогу раніше отримати урожай, активізує синтез амінокислот та інші біохімічні процеси, відповідно підвищуються якісні показники продукції [14].

**Висновки.** За впливу фосфатмобілізуючої бактерії *Bacillus sp.* 2473 активізуються процеси трансформації Фосфору в кореневій зоні рослин соняшнику, на що вказує підвищення чисельності фосфатмобілізуючих бактерій, фосфатазної активності та ступеня рухомості фосфатів у ризосферному ґрунті рослин. Унаслідок цього підсилюється засвоєння рослинами Фосфору, що підтверджується підвищенням вносу його з урожаєм культури від 47,3 кг/га до 74,8 кг/га, водночас ефективність фосфорного живлення рослин складає 53,8 % (по фону N<sub>90</sub>P<sub>90</sub>K<sub>90</sub>).

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Мікробні препарати в сучасних аграрних технологіях (науково-практичні рекомендації) / за ред. В. В. Волкогона. Київ, 2015. 248 с.
2. Olanrewaju O. S., Glick B. R., Babalola O. O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2017. Vol. 33, № 11. P. 197–204. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>
3. Биорегуляция микробно-растительных систем / под ред. Г. А. Иутинской, С. П. Пономаренко. К. : Ничлава, 2010. 464 с.
4. Yazdani M., Bahmanyar M. A., Pirdashti H., Esmaili M. A. Effect of Phosphate Solubilization Microorganisms (PSM) and Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) on yield and yield components of Corn (*Zea mays* L). *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009. Vol. 49. P. 90–92.
5. Alori E. T., Glick B. R., Babalola O. O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*. 2017. Vol. 8. P. 9–17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
6. Banerjee M. R., Yesmin L., Vessey J. K., Rai M. Plant-growth-promoting rhizobacteria as biofertilizers and biopesticides. M. Rai (Ed.). *Handbook of microbial biofertilizers*. New York : Food Products Press, 2005. P. 137–181.

7. Ali Khan A., Jilani G., Akhtar M. S., Saqlan M. S., Rasheed M. Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their Role in Crop Production. *J. Agric. Biol. Sci.* 2009. Vol. 1, № 1. P. 48–58.
8. Sharma S., Kumar V., Tripathi R. B. Isolation of phosphate solubilizing microorganism (PSMs) from soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research.* 2017. Vol. 1. P. 90–95. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
9. Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A., Kopriva S. The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition-Current Knowledge and Future Directions. *Frontiers in Plant Science.* 2017. Vol. 8. P. 1–16. <https://doi.org/10.12691/wjar-7-2-5>
10. Руководство к практическим занятиям по микробиологии / под ред. Н. С. Егорова. Москва, 1983. 215 с.
11. Експериментальна ґрунтова мікробіологія / за ред. В. В. Волгогона. Київ, 2010. 464 с.
12. ДСТУ ISO 11465: 2001. Якість ґрунту. Визначання сухої речовини та вологості за маєю. Гравіметричний метод (ISO 11465:1993, IDT). [Чинний від 2003-01-01]. Київ : Держстандарт України, 2002. 13 с.
13. Чириков Ф. В. Агрохимия калия и фосфора. М. : Гос. изд. с.-х. литературы, 1956. 462 с.
14. Агрохімічний аналіз: підручник / за ред. М. М. Городнього. 2-ге вид. Київ, 2005. 476 с.
15. 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.
16. Bielecki R. L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1973. Vol. 24. P. 225–252.
17. Курдиш І. К. Інтродукція мікроорганізмів у агроєкосистеми. К. : Наукова думка, 2010. 256 с.
18. Kloepper J. W., Ryn C. M., Zhang S. A. Systemic resistance and promotion of plant growth of *Bacillus* sp. *Phytopathology.* 2004. Vol. 94. P. 1259–1266.
19. Ehrlich H. L. Geomicrobiology. New York, 2002. 800 p.
20. Dick W. A. Tabatai M. A. Potential uses of soil enzymes / F. B. Jr. Metting (Ed.). *Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management.* New York : Marcel Dekker, Inc., 1992. P. 95–127.
21. Gianfreda L., Raoa M., Piotrowska A., Palumbo G., Colombo C. Soil enzyme activity esa-affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. *Science of the Total Environment.* 2005. № 341. P. 265–279.
22. Сидоренко А. В. Нове бачення у вирішенні проблеми підвищення білковості зерна озимих культур. *Корми і кормовиробництво.* 2004. Вип. 53. С. 93–99.

Отримано 11.09.2023

<https://doi.org/10.35868/1997-3004.38.40-50>

UDC 579.266:631.461.7:631.847/633.854.78

## MICROBIOLOGICAL TRANSFORMATION OF PHOSPHORUS IN THE ROOT ZONE OF SUNFLOWER UNDER THE ACTION OF *BACILLUS* SP. 2473 AND DIFFERENT DEGREES OF CROP FERTILIZATION

**L. M. Tokmakova, A. O. Trepach, I. M. Pyshchur**

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

**Objective.** To study the peculiarities of the microbiological transformation of phosphorus compounds in the root zone of sunflower plants under the action of *Bacillus* sp. 2473 and different degrees of crop fertilization. **Methods.** Field experiment; microbiological (accounting for bacteria capable of dissolving insoluble phosphate complexes with  $Ca^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  and hydrolysing organic phosphates in the rhizosphere soil of sunflower plants); biochemical (determination of soil phosphatase activity); chemical (determination of phosphorus content in soil and plants); statistical.

**Results.** Under the conditions of the field experiment on leached chernozem, it was established that during the growing season of sunflower in the soil after the introduction of *Bacillus sp.* 2473 into the agrocenosis, the number of bacteria capable of dissolving insoluble complexes of phosphates with  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  and bacteria hydrolysing organic forms of phosphates increases compared to the indicators of the control variants. Phosphatase activity increases during the growing season of plants and reaches the highest values during the seed ripening phase. The lowest levels of phosphorus content in the rhizosphere soil of sunflower plants were registered after presowing inoculation with *Bacillus sp.* 2473. The content of  $\text{P}_2\text{O}_5$  decreased from 0.25 mg  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{dm}^3$  of the soil solution (in the control) to 0.21 mg  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{dm}^3$  in the phase of 7–8 leaves under the action of the inoculant; from 0.42 mg  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{dm}^3$  to 0.31 mg  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{dm}^3$  in the flowering phase; from 0.24 mg  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{dm}^3$  to 0.21 mg  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{dm}^3$  in the seed ripening phase, respectively, which indicates the strengthening of phosphorus assimilation by bacterized plants. The optimal agricultural background, taking into account the effect of fertilizers on the development of phosphate-mobilizing microorganisms, is the use of mineral fertilizers in a rate not exceeding  $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ . **Conclusion.** Under the influence of the phosphate-mobilizing bacterium *Bacillus sp.* 2473, the processes of phosphorus transformation are activated in the root zone of sunflower plants, which is indicated by an increase in the number of phosphate-mobilizing bacteria, phosphatase activity and the degree of phosphate mobility in the rhizosphere soil of plants. As a result, the assimilation of phosphorus by plants is enhanced, which is confirmed by the increase in its removal with crop yield from 47.3 kg/ha to 74.8 kg/ha, while the efficiency of phosphorus nutrition of plants is 53.8 % (against the background of  $\text{N}_{90}\text{P}_{90}\text{K}_{90}$ ).

Key words: inoculation, soil microorganisms, mineral fertilizers, phosphorus compounds in the soil, sunflower, leached chernozem.

#### REFERENCES

1. Volkohon, V. V. (Ed.) (2015). Mikrobni preparaty v suchasnykh ahrarnykh tekhnolohiiakh [Microbial preparations in modern agricultural technologies]. Kyiv [in Ukrainian].
2. Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 197–204. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>
3. Iutinskaya, G. A., Ponomarenko, S. P. (Ed.). (2010). Bioregulyatsiya mikrobnno-rastitelnykh sistem. Kyiv [in Russian].
4. Yazdani, M., Bahmanyar, M. A., Pirdashti, H., & Esmaili, M. A. (2009). Effect of Phosphate Solubilization Microorganisms (PSM) and Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) on yield and yield components of Corn (*Zea mays* L). *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 49, 90–92.
5. Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8, 9–17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
6. Banerjee, M. R., Yesmin, L., Vessey, J. K., & Rai, M. (2005). Plant-growth-promoting rhizobacteria as biofertilizers and biopesticides. *Handbook of microbial biofertilizers* (pp. 137–181). New York: Food Products Press.
7. Ali Khan, A., Jilani, G., Akhtar, M. S., Saqlan, M. S., & Rasheed, M. (2009). Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their Role in Crop Production. *J. Agric. Biol. Sci.*, 1(1), 48–58.
8. Sharma, S., Kumar, V., & Tripathi, R. B. (2017). Isolation of phosphate solubilizing microorganism (PSMs) from soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research*, 1, 90–95. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
9. Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The Role of Soil Microorganisms in Plant Mineral Nutrition—Current Knowledge and Future Directions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1–16. <https://doi.org/10.12691/wjar-7-2-5>
10. Egorov, N. S. (Ed.). (1983). Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po mikrobiologii. Prakt. posobie [Guide to practical exercises in microbiology. Practical guide]. Moskva: Izd-vo Mosk. un-ta [in Russian].
11. Volkohon, V. V. (Ed.) (2010). *Eksperymentalna gruntova mikrobiolohiia* [Experimental Soil Microbiology]. Kyiv [in Ukrainian].
12. DSTU ISO 11465:2001. Yakist gruntu. Vyznachannia sukhoi rechovyny ta volohosti za masoiu. Hravimetrychnyi metod [Soil quality. Determination of dry matter and moisture by mass. Gravimetric method], Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2001 [in Ukrainian].
13. Chirikov, F. V. (1956). *Agrokimiya kaliya i fosfora* [Agrochemistry of potassium and phosphorus]. Moskva [in Russian].

14. Horodnii, M. M. (Ed.) (2005). *Ahrokhimichniy analiz* [Agrochemical analysis]. Kyiv [in Ukrainian].
15. DSTU 4727-2007. Yakist gruntu. Vyznachennia rukhomykh spoluk fosforu za metodom Karpinskoho-Zamiatinoi v modyfikatsii NNTs IHA im. O. N. Sokolovskoho [Soil quality. Determination of mobile phosphorus compounds by the Karpinsky-Zamiatina method in the modification of the NSC IHA named after O. N. Sokolovskiy], Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2001 [in Ukrainian].
16. Bialeski, R. L. (1973). Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Ann. Rev. Plant Physiol*, 24, 225–252.
17. Kurdysh, I. K. (2010). *Introduktsiia mikroorhanizmiv u ahroekosystemy* [Introduction of microorganisms into agroecosystems]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
18. Kloepper, J. W., Ryn, C. M., & Zhang, S. A. (2004). Systemic resistance and promotion of plant growth of *Bacillus* sp. *Phytopathology*, 94, 1259–1266.
19. Ehrlich, H. L. (2002). *Geomicrobiology*. 4th ed. New York.
20. Dick, W. A., & Tabatai, M. A. (1992). Potential uses of soil enzymes. In F. B. Jr. Metting (Ed.). *Soil Microbial Ecology: Applications in Agricultural and Environmental Management*. (pp. 95–127). New York: Marcel Dekker Inc.
21. Gianfreda, L., Rago, M., Piotrowska, A., Palumbo, G., & Colombo, C. (2005). Soil enzyme activity esaffected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. *Science of the Total Environment*, 341, 265–279.
22. Sydorenko, A. V. (2004). Nove bachennia u vyrishenni problemy pidvyshchennia bilkovosti zerna ozymykh kultur [A new vision in solving the problem of increasing the protein content of winter crops]. *Kormy i kormovyrobnytstvo — Feed and feed production*, 53, 93–99 [in Ukrainian].

Received 11.09.2023