

Корисна модель належить до сільськогосподарської мікробіології, а саме стосується передпосівної обробки насіння мікроорганізмами-ендофітами культурних рослин для поліпшення фосфорного живлення і підвищення їх урожайності.

Відомо, що фосфор є найбільш обмежувальним елементом живлення для продуктивності сільськогосподарських культур після азоту [1; 2]. Він відіграє важливу роль практично у всіх основних метаболічних процесах у рослинах, зокрема, фотосинтезі, диханні, енергетичному обміні, макромолекулярному біосинтезі [3] та біологічній азотфіксації у бобових рослин [4]. Достатнє надходження фосфору на ранніх фазах розвитку рослин має важливе значення для закладання зачатків репродуктивних органів рослин. Фосфор також істотно впливає на формування кореневої системи, її розгалуження. На частку фосфору припадає від 0,05 до 0,5 % [5], за іншими даними - від 0,2 до 0,8 % маси сухої речовини рослини [6].

Хоча загальна кількість фосфору в ґрунті (50-3000 мг/кг) вважається достатньою, доступна для рослин фракція становить менше 1 % від загальної його кількості [7; 8]. Неоптимальні рівні фосфорного живлення можуть знижувати врожайність сільськогосподарських культур до 15 % [9]. Ефективність внесених хімічних фосфорних добрив, як правило, не перевищує 30 % через його фіксацію або у вигляді фосфатів заліза та алюмінію в кислих ґрунтах [10], або у вигляді фосфату кальцію в нейтральних і лужних ґрунтах [11].

Мікроорганізми мобілізують нерозчинні та фіксовані форми фосфору в ґрунті шляхом розчинення та мінералізації.

За даними Кусеу [12], чисельність грибів, що здатні вивільняти фосфор з нерозчинних сполук, становить близько 0,1-0,5 % від їх загальної популяції. Ґрунтові гриби, здатні переводити фосфор у доступну рослинам форму, мають ряд переваг над бактеріями: по-перше, мікроміцети переважно продукують більшу кількість кислот, ніж бактерії [13], по-друге, вони зазвичай не втрачають здатність розчиняти нерозчинні сполуки фосфору за багаторазового субкультивування в лабораторних умовах, як це може відбуватися з бактеріями, по-третє, гриби в ґрунтах здатні легше долати великі відстані, що важливо для посівів сільськогосподарських культур [12].

Представники роду *Penicillium* є одними з найбільш описаних на сьогодні в науковій літературі грибами, що здатні розчиняти мінеральні фосфати [14; 15]. Така здатність *in vitro* показана для низки видів роду *Penicillium*: *P. oxalicum* [16], *P. aurantiogriseum* [17], *P. expansum* [18], *P. funiculosum* [19], *P. variabile* [20], *P. italicum* [21], *P. soli* [22], *P. amtrosinense* [22], *P. olsonii* [23], *P. guanacasteme* [24]. Вивільнення фосфору відбувається за рахунок продукування органічних кислот, які можуть або безпосередньо розчиняти мінеральні фосфати в результаті аніонного обміну, або хелатувати катіони Fe^{3+} , Al^{3+} і Ca^{2+} [25].

Мінералізація органічних фосфатів ґрунту відіграє важливу роль у колообігу фосфору в системі землеробства. Фосфор у складі органічних сполук може становити 4-90 % від загального обсягу фосфору ґрунту [26]. Мінералізація органофосфатів відбувається за допомогою ферментів фосфомоноестераз, фітаз, фосфонатаз та C-P-ліаз.

Попри велику кількість досліджень, присвячених здатності пеніцилів мобілізувати фосфор органічних і неорганічних сполук, про таку активність грибів-ендофітів сої в доступній літературі трапляються тільки поодинокі відомості. Так, у статті Khan et al. [19] є згадка про те, що ендоефіт сої *P. funiculosum* LHL06 розчиняє трикальційфосфат.

Недостатньо висвітлений в літературі і вплив фосфатмобілізувальних штамів пеніцилів на рослини сої. У статті El-Azouni [21] показано, що гриби *Aspergillus niger* та *Penicillium italicum* в рідкому живильному середовищі Піковської вивільняли 490 і 275 мкг Р/мл відповідно після семи днів інкубації, а одночасне їх застосування сприяло підвищенню маси сухої речовини та збільшенню вмісту фосфору в рослинах сої проти контролю за умов вегетаційного досліджу.

Найбільш близьким аналогом корисної моделі є гриб *P. funiculosum* 20312, ізолюваний з тканин коренів рослин сої сорту Легенда. Штам *P. funiculosum* 20312 здатний вивільняти фосфор як з мінеральних, так і з органічних фосфатів *in vitro*, за передпосівної обробки сприяє підвищенню вмісту загального фосфору в надземній масі рослин сої [27].

В основу корисної моделі поставлено задачу розробки засобу поліпшення фосфорного живлення рослин сої шляхом передпосівної обробки насіння сої новим природним штамом гриба *Penicillium steckii*, здатного до ендоефітії в корені сої.

Природний штам гриба *Penicillium steckii* депонований у Депозитарії Інституту мікробіології і вірусології НАН України за реєстраційним номером IMB F-100209.

Приклади визначення ефективності передпосівної обробки насіння сої новим природним штамом гриба *Penicillium steckii* IMB F-100209.

Приклад 1.

Польові дрібноділянкові дослідження з визначення впливу нового штаму *Penicillium steckii* IMB F-100209 на урожайність сої проводили в 2023-2024 рр. на дослідній ділянці Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. Спосіб сівби широкорядний, з міжряддям 40 см. Норма висіву - 700 тис. схожих насінин на 1 га. Площа облікової ділянки - 1 м², повторність досліджу

чотириразова, розміщення ділянок рендомізоване. Ґрунт дерново-середньопідзолистий пилювато-супіщаний, що характеризувався такими агрохімічними показниками: вміст гумусу становив 1,02 %; азоту (за Корнфільдом) - 54,9 мг/кг; рухомих форм фосфору (за Кірсановим) - 110-120 мг P₂O₅, обмінного калію (за Кірсановим)-120-130 мг K₂O на 1 кг ґрунту; рН_{сол.} 5,2, рН_{вол.} 6,0. У дослідях використовували насіння сої сорту Арніка.

Для одержання спор біоагента *P. steckii* IMB F-100209 та аналога *P. funiculosum* 20312 для передпосівної обробки насіння гриби вирощували на сусловому агарі упродовж 10 діб. Насіння обробляли суспензіями спор із розрахунку 1,5 % від маси насіння). Інокуляційне навантаження становило 1×10⁵ спор на одну насінину. Схема дослідів: 1 - Контроль (змочування насіння стерильною водогінною водою із розрахунку 1,5 % від маси насіння); 2 - Обробка насіння спорами аналога *P. funiculosum* 20312; 3 - Обробка насіння спорами *P. steckii* IMB F-100209.

Як свідчать одержані результати, передпосівна обробка насіння сої штамом *P. steckii* IMB F-100209 у 2023 і 2024 роках забезпечила підвищення урожайності на 17,4 та 12,8 % проти контролю (без інокуляції) відповідно. За використання для інокуляції аналога *P. funiculosum* 20312 відповідні прирости зернової продуктивності становили 12,1 та 1 1,0 %. В середньому за 2 роки ефективність передпосівної обробки насіння сої штамом *P. steckii* IMB F-100209 перевищувала ефективність інокуляції аналогом на 3,7 в. п.

Таблиця 1

Урожайність сої сорту Арніка за передпосівної обробки насіння *P. steckii* IMB F-100209 (дрібноділянкові польові дослідів, 2023-2024 рр.)

Варіанти дослідів	Урожайність, т/га		Приріст до контролю, %		Середній приріст за 2 роки, %
	2023	2024	2023	2024	
Контроль (без інокуляції)	2,65	2,82			
Інокуляція <i>P. funiculosum</i> 20312	2,97	3,13	12,1	11,0	11,3
Інокуляція <i>P. steckii</i> IMB F-100209	3,11	3,18	17,4	12,8	15,0
HIP _{0,05}	0,26	0,20	-	-	-

Приклад 2.

Вплив нового штаму *P. steckii* IMB F-100209 на вміст загального фосфору в зерні сої визначали методом Деніже в модифікації Буватьє [60]. Мокре озолення рослинного матеріалу проводили методом В. Т. Куркаєва [60].

Як свідчать результати, наведені в табл. 2, за передпосівної інокуляції насіння сої штамом-аналогом *P. funiculosum* 20312 вміст загального фосфору в зерні становив 0,656 %, за обробки новим штамом *P. steckii* IMB F-100209-0,684 %, в той час як у контрольному варіанті (без обробки грибами) - 0, 575 %.

Таблиця 2

Вміст загального фосфору в зерні сої сорту Арніка за передпосівної обробки насіння *P. steckii* IMB F-100209

Варіанти дослідів	Вміст P ₂ O ₅ . %
Контроль (без інокуляції)	0,575±0,009
Інокуляція <i>P. funiculosum</i> 20312	0,656±0,024
Інокуляція <i>P. steckii</i> IMB F-100209	0,684±0,005
HIP _{0,05}	0,066

Отже, передпосівна обробка насіння сої новим природним штамом *P. steckii* IMB F-100209, який поліпшує фосфорне живлення рослин, сприяє підвищенню вмісту загального фосфору в зерні сої і збільшенню урожайності культури.

Джерела інформації:

1. Zornoza R., Acosta J. A., Bastida F., Dominguez S. G., Toledo D. M., Faz A. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. Soil. 2015. № 1. P. 173-185.

2. Gotz L. F., Holzschuh M. J., Vargas V. P., Teles A. P. B., Martins M. M., Pavinato P. S. Phosphate management for high soybean and maize yields in expansion areas of Brazilian Cerrado. *Agronomy*. 2023. № 13. 158.
3. Khan M. S., Zaidi A., Ahemad M., Oves M., Wani P. A. Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi-current perspective. *Arch Agron Soil Sci*. 2010. №56. P. 73-98.
4. Saber K., Nahla L. D., Chedly A. Effect of P on nodule formation and N fixation in bean. *Agron Sustain Dev*. 2005. № 25. P. 389-393.
5. Johri A. K., Oelmuller R., Dua M., Yadav V., Kumar M., Tuteja N., ... Stroud R. M. Fungal association and utilization of phosphate by plants: success, limitations, and future prospects. *Front Microbiol*. 2015. № 6. 984.
6. Sharma S. B., Sayyed R. Z., Trivedi M. H., Gobi T. A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*. 2013. № 2. 587.
7. Yadav R. S., Meena S. C., Patel S. I., Patel K. (.), Akhtar M. S., Yadav B. K., Panwar J. Bioavailability of soil P for plant nutrition. E. Lichtfouse (Ed.). *Farming for Food and Water Security*. Dordrecht: Springer, 2012. P. 177-200.
8. Weihrauch C, Opp C Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far. *Geoderma*. 2018. Vol. 325. P. 183-194.
9. Li C. K., Li Q. S., Wang Z. P., Ji G. K, Zhao H., Gao F., Li H. X. Environmental fungi and bacteria facilitate lecithin decomposition and the transformation of phosphorus to apatite. *Sci Rep*. 2019. № 9. 15291.
10. Norrish K., Rosser FL Mineral phosphate. *Soils: an Australian viewpoint*. Melbourne, CSIRO/London, UK, Australia: Academic Press, 1983. P. 335-361.
11. Lindsay W. L., Vlek P. L. G., Chien S. H. Phosphate minerals. J. B. Dixon, S. B. Weed (Eds.). *Minerals in soil environment*. 2nd edition. Madison: WI, 1989. P. 1089-1130.
12. Kucey R. M. N. Phosphate solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. *Can J Soil Sci*. 1983. № 63. P. 671-678.
13. Venkateswarlu B., Rao A. V., Raina P., Ahmad N. Evaluation of phosphorus solubilization by microorganisms isolated from arid soil. *J Indian Soc Soil Sci*. 1984. Vol. 32, Is. 2. P. 273-277.
14. da Silva L. I., Pereira M. C, de Carvalho A. M. X., Buttros V. H., Pasqual M., Doria J. Phosphorus-solubilizing microorganisms: A key to sustainable agriculture. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, № 2. 462.
15. Fu S.-F., Balasubramanian V. K., Chen C.-L, Tran T. T., Muthuramalingam J. B., Chou J.-Y. The phosphate-solubilising fungi in sustainable agriculture: unleashing the potential of fungal biofertilizers for plant growth. *Folia Microbiol*. 2024. № 69. P. 697-712.
16. Tong J., Wu H., Jiang X., Ruan C, Li W., Zhang H., ... Shi J. Dual Regulatory Role of *Penicillium oxalicum* SL2 in Soil: Phosphorus Solubilization and Pb Stabilization. *Environ Sci Technol*. 2024. Vol. 58, № 1. P. 603-616.
17. Hu J., Wang L, Zhang L, Gao H., Tian D. A Study of Phosphate Solubilizing Capacity by *Penicillium Aurantiogriseum* under Different Carbon and Nitrogen Resources. *E3S Web of Conferences*. 2022. № 350. 03002.
18. Panchal B. J., Patel S., Rajkumar S. J., Mahatma L, Singh D. Isolation and identification of phosphate solubilizing *Penicillium expansum* NAUG-B1 and their consequence on growth of brinjal. *Ecol Environ Conserv*. 2016. № 21. P. 259-267.
19. Khan A. L., Hamayun M, Kim Y.-H., Kang S.-M., Lee I.-J. Ameliorative symbiosis of endophyte (*Penicillium funiculosum* LHL06) under salt stress elevated plant growth of *Glycine max* L. *Plant Physiol Biochem*. 2011. Vol. 49, Is. 8. P. 852-861.
20. Kanse O. S., Whitelaw-Weckert M, Kadam T. A., Bhosale H. J. Phosphate solubilization by stress-tolerant soil fungus *Talaromyces funiculosus* SLS8 isolated from the Neem rhizosphere. *Ann Microbiol*. 2015. Vol. 65. P. 85-93.
21. El-Azouni I. M. Effect of phosphate solubilizing fungi on growth and nutrient uptake of soybean (*Glycine max* L.) plants. *Journal of Applied Science Research*. 2008. № 4. p. 592-598.
22. Doilom M, Guo J.-W., Phookamsak R., Mortimer P. E., Karunarathna S. C, Dong W., ... Xu J.-C. Screening of Phosphate-Solubilizing Fungi From Air and Soil in Yunnan, China: Four Novel Species in *Aspergillus*, *Gongronella*, *Penicillium*, and *Talaromyces*. *Front Microbiol*. 2020. Vol. 11.
23. Suraby E. J., Agisha V. N., Dhandapani S., Sng Y. H., Lim S. H., Naqvi N. I., ... Park B. S. Plant growth promotion under phosphate deficiency and improved phosphate acquisition by new fungal strain, *Penicillium olsonii* TLL1. *Front Microbiol*. 2023. Vol. 14.
24. Qiao H., Sun X.-R., Wu X.-Q., Li G.-E., Wang Z., Li D.-W. The phosphate-solubilizing ability of *Penicillium guanacastense* and its effects on the growth of *Pinus massoniana* in phosphate-limiting conditions. *Bio/ Open*. 2019. Vol. 8, Is. 11.
25. Omar S. A. The role of rock phosphate solubilizing fungi and vesicular arbuscular mycorrhiza (VAM) in growth of wheat plants fertilized with rock phosphate. *World J Microbiol Biotechnol*. 1998. Vol. 14. P. 211-219.

26. Khan M. S., Zaidi A., Wani P. A. Role of phosphate solubilising microorganisms in sustainable agriculture. E. Lictfouse, M. Navarrete, P. Debaeke, S. Veronique, C. Alberola (Eds.). Sustainable Agriculture. Dordrecht: Springer, 2009. P. 551-570.

27. Shakhovkina O. O., Nadkernychna O. V., Pyshchur I. M. Phosphate-mobilising properties of fungi of the genus *Penicillium* isolated from soybean histosphere. Сільськогосподарська мікробіологія. Вип. 41. С. 19-33.