

УДК 631.461.52; 633.15

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.1.9>

ЕФЕКТ ІНОКУЛЯЦІЇ НА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЗДОРОВ'Я ҐРУНТУ

Дацько О.М. – доктор філософії,
старший викладач кафедри агротехнологій та ґрунтознавства
Сумський національний аграрний університет

Бакуменко О.М. – к.с.-г.н.,
доцент кафедри захисту рослин
Сумський національний аграрний університет

Гордієнко В.В. – аспірант кафедри агротехнологій та ґрунтознавства,
Сумський національний аграрний університет

Інтенсифікація сільського господарства ставить нові вимоги до агротехнічних прийомів, зокрема використання добрив. В умовах обмеженого доступу до мінеральних добрив, альтернативою стають інокулянти з ефективними мікроорганізмами, які покращують біометричні показники рослин, підвищують врожайність та покращують здоров'я ґрунтів. У статті розглянуто вплив таких мікроорганізмів, як *Azospirillum brasilense*, *Bacillus spp.*, *Enterobacter sp.*, *Lysinibacillus fusiformis* та інших на ріст кукурудзи та її стійкість до стресових умов. Дослідження підтверджують, що використання інокулянтів сприяє підвищенню засвоєння азоту, фосфору та інших поживних речовин рослинами, а також покращує загальну врожайність культури, особливо в умовах засоленних або виснажених ґрунтів.

Однією з важливих переваг інокулянтів є здатність покращувати стан ґрунтів, зокрема підтримувати баланс мікрофлори, посилювати секвестрацію вуглецю, а також знижувати вплив осмотичного, окисдативного і температурного стресу. Застосування таких штамів, як *Bacillus subtilis* і *Bacillus pumilus*, допомагає відновлювати родючість ґрунтів і сприяє їхньому очищенню від забруднень, зокрема важкими металами. Особливо важливим є те, що інокулянти не пригнічують аборигенну мікрофлору ґрунту, а навпаки, стимулюють її розвиток, що позитивно впливає на продуктивність кукурудзи.

Також розглянуто різні методи інокуляції, які можуть мати вплив на ефективність біологічних препаратів. Зокрема, заселення ґрунтової поверхні бактеріями показало кращі результати порівняно з традиційними методами. На основі аналізу проведених досліджень робиться висновок, що інокулянти є перспективним і економічно доцільним рішенням для підвищення врожайності та підтримання здоров'я ґрунтів у контексті сталого сільського господарства.

Ключові слова: *Zea mays*, ґрунт, ефективні мікроорганізми, мікориза, урожайність, продуктивність.

Datsko O.M., Bakumenko O.M., Hordiienko V.V. Effect of inoculation on maize growth and improvement of soil health

The intensification of agriculture imposes new requirements on agronomic practices, particularly in the use of fertilizers. In conditions of limited access to mineral fertilizers, inoculants with effective microorganisms become an alternative that improves plant biometric indicators, increases yields, and enhances soil health. This article examines the impact of microorganisms such as *Azospirillum brasilense*, *Bacillus spp.*, *Enterobacter sp.*, *Lysinibacillus fusiformis*, and others on the growth of maize and its resistance to stressful conditions. Studies confirm that the use of inoculants promotes better absorption of nitrogen, phosphorus, and other nutrients by plants, and improves overall crop yield, especially in saline or depleted soils.

One of the key advantages of inoculants is their ability to improve soil conditions, particularly by maintaining microbial balance, enhancing carbon sequestration, and reducing the effects of osmotic, oxidative, and temperature stress. The application of strains like *Bacillus subtilis* and

Bacillus pumilus helps restore soil fertility and contributes to the remediation of contaminated soils, including those polluted with heavy metals. Importantly, inoculants do not suppress native soil microflora but rather stimulate its development, which positively affects maize productivity.

Various inoculation methods that may influence the effectiveness of biological products are also discussed. For instance, the inoculation of the soil surface with bacteria showed better results compared to traditional methods. Based on the analysis of conducted research, it is concluded that inoculants are a promising and economically viable solution for increasing yields and maintaining soil health in the context of sustainable agriculture.

Key words: *Zea mays*, soil, effective microorganisms, mycorrhiza, yield, productivity.

Вступ. На сьогоднішній день відбувається все більша інтенсифікація сільського господарства [1, 2]. Це призводить до того, що агротехнічні прийоми потребують постійного вдосконалення [3]. Наразі все більшої популярності набирають практики, що передбачають використання технік сталого сільського господарства [4]. Під терміном стале сільське господарство розуміють використання таких систем і методів вирощування рослин чи тварин, щоб і задовольнити потреби людства у продовольстві і, водночас, ефективно використовувати ресурси з метою їх збереження та економічної доцільності виробництва [5-7]. Зокрема, прийомами, що використовуються у такому господарстві можна назвати полікультуру – одночасне вирощування декількох культур на одній території [8]; органічне та біодинамічне землеробство [9]; мульчування [10] та ін.

Кукурудза (*Zea mays*) – одна із основних зернових культур не лише в Україні, а й світі, що використовується в харчових та технічних цілях [11]. Саме тому, задля забезпечення стабільних врожаїв необхідно використовувати оптимальну систему удобрення культури [12-14]. Однак, наразі використання звичних для інтенсивної технології мінеральних добрив суттєво обмежене внаслідок підвищення цін на них [15]. Саме тому, дещо підвищився попит на удобрювальні продукти [16], які довели свою ефективність при дослідженні їх впливу на біометричні показники кукурудзи [17-19], якість зерна [20-22] та урожайність культури [23-25].

Виклад основного матеріалу. Задля підвищення ефективності вирощування багатам вченими України та світу проводились дослідження, спрямовані на оптимізацію агротехніки та використання біодобрив під час вирощування кукурудзи [26, 27]. Зокрема, Шерстобоева et al., (2020) довели, що не лише інокуляція впливає на азотфіксуючу здатність ризосфери кукурудзи, але й попередники [28]. Так, найкращим попередником, що дозволяє підвищити цю здатність в умовах Київської області є горох. Варто відмітити, що найважливіше в інокулянті є все ж таки склад, тобто саме мікроорганізми, що в ньому містяться впливають тим чи іншим чином на досліджувані параметри культури [29]. До речі, у дослідженні Renoud et al., (2022) доведено саме цю тезу і окрім неї також і те, що в певних випадках менша норма інокулянту більш позитивно впливає на аборигенну мікрофлору, тобто не пригнічує її, а навпаки підсилює, що більш позитивно впливає на культури [30]. Не менш важливим є й метод за допомогою якого інокуляцію провели. Так, наприклад, Takahashi et al., (2024) довели, що про заселення бактерій штаму *Azospirillum* на поверхню ґрунту є більш ефективним та покращує біометричні показники кукурудзи значно краще у порівнянні із традиційним методом інокуляції [31].

Найбільш популярними ефективними мікроорганізмами, що переважно використовують у інокулянтах наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

**Ефективні мікроорганізми, що використовують
для виробництва інокулянтів**

Назва	Вплив	Посилання
<i>Azospirillum brasilense</i>	Покращення поглинання азоту рослинами; підвищення врожайності біомаси кукурудзи та зерна; покращення структури врожаю; підвищення посухостійкості кукурудзи.	[32-37]
<i>Bacillus spp.</i>	Зменшення стресу рослин на засолених ґрунтах; підвищення стресостійкості до посухи;	[38-42]
<i>Enterobacter sp.</i>	Покращення фосфорного живлення кукурудзи;	[43]
<i>Lysinibacillus fusiformis</i> , <i>Lysinibacillus sphaericus</i>	Зменшення впливу до осмотичного та оксидативного стресу внаслідок критичного зниження температури; покращує врожайність.	[44, 45]
<i>Klebsiella variicola</i>	Збільшення стресостійкості кукурудзи на засолених ґрунтах.	[46]
<i>Aspergillus flavus</i>	Негативний вплив на урожайність та якість зерна кукурудзи.	[47]
<i>Aspergillus niger</i>	Сприяє підвищенню врожайності кукурудзи; підвищує поглинання фосфору рослинами.	[48]
<i>Funneliformis mosseae</i>	Підвищує врожайність кукурудзи; покращує секвестрацію вуглецю;	[49]
<i>Kocuria rhizophila</i>	Захищає кукурудзу від стресу на засолених ґрунтах.	[50]
<i>Exophiala pisciphila</i>	Покращує засвоєваність фосфору проростками кукурудзи	[51]
<i>Funneliformis mosseae</i>	Зменшення впливу посухи на кукурудзу	[52]
<i>Metarhizium robertsii</i>	Покращує ріст кукурудзи; зменшує дію личинок чорної совки;	[53]
<i>Trichoderma guizhouense</i>	Стимулює утворення ауксинів в рослинах	[54]
<i>Stemphylium lycopersici</i>	Захищає кукурудзу від стресу на засолених ґрунтах та підвищує урожайність.	[55]

Однак, зазвичай виробляють багатокомпонентні інокулянти, а не ті, що містять лише один штам бактерій. Так, наприклад, *Azospirillum brasilense* у поєднанні із *Anabaena cylindrica* значно підвищують урожайність кукурудзи [56]. Штами *Azospirillum* у поєднанні із *Bacillus* дозволили збільшити масу сухої речовини у рослинах кукурудзи [57]. До того ж, результати, що висвітлені у роботі Vanissa et al., (2020) вказують на те, що інокуляція цими штамми дозволяє покращити розвиток кукурудзи на засолених ґрунтах та тих, що мають низьку забезпеченість фосфором [58]. За даними Tuagi et al., (2023) інокуляція комбінацією штамів *Serendipita indica*, *Rhizophagus intraradices* та *Azotobacter chroococcum* підвищує стресостійкість кукурудзи до посухи, що є особливо актуальним у сучасних умовах [59]. Водночас, Liu et al., (2022) довели, що грибні мікроорганізми *Beauveria bassiana* та *Metarhizium anisopliae* також здатні підвищити ріст кукурудзи [60].

Важливим аспектом використання інокулянтів є не лише підвищення врожайності будь-яких культур, що вирощуються із їх використанням, але й покращення здоров'я ґрунту [61, 62]. Термін здоров'я ґрунту – дуже широке поняття [63]. Деякі дослідники пояснюють його як здатність підтримувати ріст живих організмів (рослин, тварин та людей) і таким чином об'єднує їх між собою створюючи підґрунтя для їх функціонування [64]. Інші ж фокусуються на тому, що здоров'я ґрунту передбачає його здатність функціонувати як динамічна система та підтримувати стан водних ресурсів, родючості рослин та створення оптимального середовища існування для редуцентів [65, 66]. Підтримання здоров'я ґрунту передбачає дотримання практик сталого сільського господарства, однією з яких є зменшення внесення мінеральних добрив та, натомість, більшої кількості органічних [67, 68]. З цієї метою також варто використовувати препарати, що містять ефективні мікроорганізми [69, 70]. Проте, важливо розуміти, що не всі вони є дійсно дієвими, тому варто використовувати лише ті, препарати, які містять мікроорганізми, що підтвердили свою ефективність [71-73]. Наприклад, в дослідженнях Romero et al., (2024) [74] вказано, що серед багатьох груп бактерій найбільше на продуктивність впливають саме азотфіксуючі, а також мікоризні гриби [75].

Зокрема, доведено, що інтродукція *Bacillus subtilis* у регульованих дозах у ґрунтового середовище передбачає позитивну дію на ґрунт шляхом покращення секвестрації вуглецю, або ж ці бактерії здатні також виступати у ролі біоремедіаторів в ґрунтах забруднених важкими металами (Mahapatra et al., 2022) [76]. У дослідженнях Chaudhary et al., (2022) та Kumar et al., (2021) [77, 78] було доведено, що *Bacillus pumilus* здатні активно виробляти ензими на засолених ґрунтах та покращувати внаслідок цього його властивості. Актиноміцети також здатні підвищувати виробництво ензимів, що сприяє покращенню здоров'я ґрунту [79].

Висновки. Інтенсифікація сільського господарства вимагає вдосконалення агротехнічних прийомів, зокрема сталого використання добрив. Використання інокулянтів з ефективними мікроорганізмами стало перспективною альтернативою мінеральним добривам, сприяючи підвищенню врожайності кукурудзи та покращенню здоров'я ґрунтів. Дослідження показали, що такі мікроорганізми, як *Azospirillum*, *Bacillus*, і мікоризні гриби, позитивно впливають на засвоєння поживних речовин та стресостійкість рослин. Крім того, інокулянти допомагають зберігати родючість ґрунтів, підтримувати баланс мікрофлори та підвищують стійкість до екологічних стресів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Baweja, P., Kumar, S., Kumar, G. Fertilizers and Pesticides: Their Impact on Soil Health and Environment. *Soil Health*. 2020. Vol. 59. P. 265–285. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_15
2. Tilman, D. Benefits of intensive agricultural intercropping. *Nature Plants*. 2020. Vol. 6. № 6. P. 604–605. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0677-4>
3. Soto-Gómez, D., Pérez-Rodríguez, P. Sustainable agriculture through perennial grains: Wheat, rice, maize, and other species. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2022. Vol. 325. P. 107747. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107747>
4. Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., Ismail, S. Current Progress and Future Prospects of Agriculture Technology: Gateway to Sustainable Agriculture. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. № 9. P. 4883. <https://doi.org/10.3390/su13094883>
5. Lal, R. Soils and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2008. Vol. 28 № 1. P. 57–64. <https://doi.org/10.1051/agro:2007025>

6. Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Souchère, V., Alberola, C., Ménessieu, J. Agronomy for Sustainable Agriculture: A Review. *Sustainable Agriculture*. 2009. P. 1–7. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_1
7. Velten, S., Leventon, J., Jager, N., Newig, J. What Is Sustainable Agriculture? A Systematic Review. *Sustainability*. 2015. Vol. 7. № 6. P. 7833–7865. <https://doi.org/10.3390/su7067833>
8. Adamczewska-Sowińska, K., Sowiński, J. Polyculture Management: A Crucial System for Sustainable Agriculture Development. *Soil Health Restoration and Management*. 2020. P. 279–319. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8570-4_8
9. Santoni, M., Ferretti, L., Migliorini, P., Vazzana, C., & Pacini, G. C. A review of scientific research on biodynamic agriculture. *Organic Agriculture*. 2022. Vol. 12. № 3. P. 373–396. <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00394-2>
10. El-Beltagi, H. S., Basit, A., Mohamed, H. I., Ali, I., Ullah, S., Kamel, E. A. R., Shalaby, T. A., Ramadan, K. M. A., Alkhateeb, A. A., & Ghazzawy, H. S. Mulching as a Sustainable Water and Soil Saving Practice in Agriculture: A Review. *Agronomy*. 2022. Vol. 12. № 8. P. 1881. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081881>
11. Дацько, О. М. Рослинні пробіотики: вплив на рослини в умовах стресу. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агрономія та біологія*. 2021. Вип. 43. № 1. С. 10–18. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2021.1.2>
12. Троценко, В. І., Жатова, Г. О., Яценко, В. М., & Колосок, І. О. Вплив ретардантів на ріст рослин та структуру урожайності соняшнику. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агрономія та біологія*. 2021. Вип. 43. № 1. С. 55–64. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2021.1.8>
13. Kolisnyk, O., Yakovets, L., Amons, S., Butenko, A., Onychko, V., Tykhonova, O., Hotvianska, A., Kravchenko, N., Vereshchahin, I., Yatsenko, V. Simulation of High-Product Soy Crops Based on the Application of Foliar Fertilization in the Conditions of the Right Bank of the Forest steppe of Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2024. Vol. 25. № 7. P. 234–243. <https://doi.org/10.12912/27197050/188638>
14. Mishchenko, Y., Kovalenko, I., Butenko, A., Danko, Y., Trotsenko, V., Masyk, I., Radchenko, M., Hlupak, Z., & Stavitskyi, A. Microbiological Activity of Soil Under the Influence of Post-Harvest Siderates. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23. № 4. P. 122–127. <https://doi.org/10.12911/22998993/146612>
15. Яценко, В. М. Вплив позакореневого підживлення на тривалість вегетаційного періоду кукурудзи. *The 26th International scientific and practical conference "World problems and ways of solving modern problems" (July 02–05, 2024) Oslo, Norway. International Science Group*. 2024. 14–16.
16. Trivedi, P., Mattupalli, C., Eversole, K., Leach, J. E. Enabling sustainable agriculture through understanding and enhancement of microbiomes. *New Phytologist*. 2021. Vol. 230. № 6. P. 2129–2147. <https://doi.org/10.1111/nph.17319>
17. Hryhoriv, Y., Butenko, A., Masyk, I., Onychko, T., Davydenko, G., Bondarieva, L., Hotvianska, A., Horbunova, K., Yevtushenko, Y., Mykola, V. Growth and Development of Sweet Corn Plants in the Agro-Ecological Conditions of the Western Region of Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24. № 4. P. 216–222.
18. Polyvani, A., Butenko, A., Mikulina, M., Zubko, V., Kharchenko, S., Dubovyk, V., Dubovyk, O., Sarzhanov, B. Genotype prediction in maize (*Zea mays* L.) progeny using different predictive models. *Agronomy Research*. 2024. Vol. 22. <https://doi.org/10.15159/AR.24.063>
19. Zakharchenko, E., Datsko, O., Mishchenko, Y., Melnyk, A., Liudmyla Kriuchko, Rieznik, S., Hotvianska, A. Efficiency of biofertilizers when growing corn for grain. *Modern Phytomorphology*. 2023. Vol. 17. P. 50–56. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7966053>

20. Barbosa, J. Z., Roberto, L. D. A., Hungria, M., Corrêa, R. S., Magri, E., Correia, T. D. Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum brasilense* inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. *Applied Soil Ecology*. 2022. Vol. 170, 104276. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104276>
21. Hungria, M., Barbosa, J. Z., Rondina, A. B. L., Nogueira, M. A. Improving maize sustainability with partial replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Agronomy Journal*. 2022. Vol. 114. № 5. P. 2969–2980. <https://doi.org/10.1002/agj2.21150>
22. Zakharchenko, E. A., Petrenko, S. V., Berdin, S. I., Podhaietskyi, A. A., Kravchenko, N. V., Hnitetskyi, M. O., Hlupak, Z. I., Bordun, R. M., Tiutiunnyk, O. S., Tryu, V. O. Response of maize plants to seeding rates under conditions of typical black soil. *Modern Phytomorphology*. 2023. Vol. 17. P. 71–74. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7966139>
23. Синиця, О. М., Оничко, В. І., Пиріг, О. В. Деструкція рослинних решток кукурудзи за дії мікробних препаратів в умовах Північно-Східного Лісостепу України. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агрономія та біологія*. 2023. Вип. 53. № 3. С. 79–84. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.3.11>
24. Radchenko, M. V., Trotsenko, V. I., Butenko, A. O., Masyk, I. M., Hlupak, Z. I., Pshychenko, O. I., Terokhina, N. O., Rozhko, V. M., & Karpenko, O. Y. Adaptation of various maize hybrids when grown for biomass. *Agronomy Research*. 2022. Vol. 20. № 2. P. 404–413. <https://doi.org/10.15159/AR.22.028>
25. Zakharchenko, E., Datsko, O., Butenko, S., Mishchenko, Y., Bakumenko, O., Prasol, V., Dudka, A., Tymchuk, N., Leshchenko, D., Novikova, A. The Influence of Organic Growing of Maize Hybrids on the Formation of Leaf Surface Area and Chlorophyll Concentration. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25. № 5. P. 156–164. <https://doi.org/10.12911/22998993/186162>
26. Chen, L., Li, K., Shang, J., Wu, Y., Chen, T., Wanyan, Y., Wang, E., Tian, C., Chen, W., Chen, W., Mi, G., & Sui, X. Plant growth-promoting bacteria improve maize growth through reshaping the rhizobacterial community in low-nitrogen and low-phosphorus soil. *Biology and Fertility of Soils*. 2021. Vol. 57. № 8. P. 1075–1088. <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01598-6>
27. Higdon, S. M., Pozzo, T., Tibbett, E. J., Chiu, C., Jeannotte, R., Weimer, B. C., Bennett, A. B. Diazotrophic bacteria from maize exhibit multifaceted plant growth promotion traits in multiple hosts. *PLOS ONE*. 2020. Vol. 15. № 9. P. e0239081. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239081>
28. Шерстобоева, О. В., Бунас, А. А., Дем'янюк, О. С. Вплив попередників та передпосівної інокуляції насіння штамом *Azotobacter vinelandii* 12m на врожайність кукурудзи і активність процесу азотфіксації. *Збалансоване природокористування*. 2020. № 1. С. 120–128. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2020.203941>
29. Notununu, I., Moleleki, L., Roopnarain, A., Adeleke, R. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on the molecular responses of maize under drought and heat stresses: A review. *Pedosphere*. 2022. Vol. 32. № 1. P. 90–106. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60051-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60051-6)
30. Renoud, S., Abrouk, D., Prigent-Combaret, C., Wisniewski-Dyé, F., Legendre, L., Moënne-Loccoz, Y., Muller, D. Effect of Inoculation Level on the Impact of the PGPR *Azospirillum lipoferum* CRT1 on Selected Microbial Functional Groups in the Rhizosphere of Field Maize. *Microorganisms*. 2022. Vol. 10. № 2. P. 325. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020325>
31. Takahashi, W. Y., Galvão, C. W., Cassán, F. D., Urrea-Valencia, S., Stremel, A. C., Stets, M. I., Stroka Kremer, M. A., Jesus, E. D. C., Etto, R. M. Tracking maize colonization and growth promotion by *Azospirillum* reveals strain-specific behavior and the influence of inoculation method. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2024. Vol. 215. P. 108979. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108979>

32. Contreras-Liza, S., Villadeza, C. Y., Rodriguez-Grados, P. M., Palomares, E. G., Arbizu, C. I. Yield and Agronomic Performance of Sweet Corn in Response to Inoculation with *Azospirillum sp.* Under Arid Land Conditions. *International Journal of Plant Biology*. 2024. Vol. 15. № 3. P. 683–691. <https://doi.org/10.3390/ijpb15030050>
33. Czarnes, S., Mercier, P., Lemoine, D. G., Hamzaoui, J., & Legendre, L. Impact of soil water content on maize responses to the plant growth-promoting rhizobacterium *Azospirillum lipoferum* CRT1. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2020. Vol. 206. № 5. P. 505–516. <https://doi.org/10.1111/jac.12399>
34. Ferreira, L. L., Santos, G. F., Carvalho, I. R., Fernandes, M. D. S., Carnevale, A. B., Lopes, K., Prado, R. L. F., Lautenchleger, F., Pereira, A. I. D. A., Curvêlo, C. R. D. S. Cause and effect relationships, multivariate approach for inoculation of *Azospirillum brasilense* in corn. *Communications in Plant Sciences*. 2019. Vol. 10. № 1. <https://doi.org/10.26814/cps2020006>
35. Galindo, F. S., Rodrigues, W. L., Fernandes, G. C., Boleta, E. H. M., Jalal, A., Rosa, P. A. L., Buzetti, S., Lavres, J., Teixeira Filho, M. C. M. Enhancing agronomic efficiency and maize grain yield with *Azospirillum brasilense* inoculation under Brazilian savannah conditions. *European Journal of Agronomy*. 2022. Vol. 134. P. 126471. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126471>
36. Pedrosa, F. O., Oliveira, A. L. M., Guimarães, V. F., Etto, R. M., Souza, E. M., Furmam, F. G., Gonçalves, D. R. P., Santos, O. J. A. P., Gonçalves, L. S. A., Battistus, A. G., Galvão, C. W. The ammonium excreting *Azospirillum brasilense* strain HM053: A new alternative inoculant for maize. *Plant and Soil*. 2020. Vol. 451. № 1–2. P. 45–56. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04124-8>
37. Urrea-Valencia, S., Etto, R. M., Takahashi, W. Y., Caires, E. F., Bini, A. R., Ayub, R. A., Stets, M. I., Cruz, L. M., & Galvão, C. W. Detection of *Azospirillum brasilense* by qPCR throughout a maize field trial. *Applied Soil Ecology*. 2021. Vol. 160. P. 103849. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103849>
38. Ali, B., Hafeez, A., Ahmad, S., Javed, M. A., Sumaira, Afridi, M. S., Dawoud, T. M., Almaary, K. S., Muresan, C. C., Marc, R. A., Alkhalifah, D. H. M., Selim, S. *Bacillus thuringiensis* PM25 ameliorates oxidative damage of salinity stress in maize via regulating growth, leaf pigments, antioxidant defense system, and stress responsive gene expression. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 921668. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921668>
39. Azeem, M., Haider, M. Z., Javed, S., Saleem, M. H., & Alatawi, A. Drought Stress Amelioration in Maize (*Zea mays L.*) by Inoculation of *Bacillus spp.* Strains under Sterile Soil Conditions. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. № 1. P. 50. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010050>
40. Castelo Sousa, H., Gomes De Sousa, G., De Araújo Viana, T. V., Prudêncio De Araújo Pereira, A., Nojosa Lessa, C. I., Pires De Souza, M. V., Da Silva Guilherme, J. M., Ferreira Goes, G., Da Silveira Alves, F. G., Primola Gomes, S., Barbosa Da Silva, F. D. *Bacillus aryabhattai* Mitigates the Effects of Salt and Water Stress on the Agronomic Performance of Maize under an Agroecological System. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. № 6. P. 1150. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061150>
41. Moreno-Galván, A., Romero-Perdomo, F. A., Estrada-Bonilla, G., Meneses, C. H. S. G., & Bonilla, R. R. Dry-Caribbean *Bacillus spp.* Strains Ameliorate Drought Stress in Maize by a Strain-Specific Antioxidant Response Modulation. *Microorganisms*. 2020. Vol. 8. № 6. P. 823. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060823>
42. Vieira Velloso, C. C., de Oliveira, C. A., Gomes, E. A., Lana, U. G. D. P., de Carvalho, C. G., Guimarães, L. J. M., Pastina, M. M., de Sousa, S. M. Genome-guided insights of tropical *Bacillus* strains efficient in maize growth promotion. *FEMS Microbiology Ecology*. 2020. Vol. 96. № 9. P. faa157. <https://doi.org/10.1093/femsec/faa157>
43. Alzate Zuluaga, M. Y., Martinez De Oliveira, A. L., Valentinuzzi, F., Tiziani, R., Pii, Y., Mimmo, T., Cesco, S. Can Inoculation With the Bacterial Biostimulant *Enterobacter*

sp. Strain 15S Be an Approach for the Smarter P Fertilization of Maize and Cucumber Plants? *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 12. P. 719873. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.719873>

44. Jha, Y., Mohamed, H. I. Inoculation with *Lysinibacillus fusiformis* Strain YJ4 and *Lysinibacillus sphaericus* Strain YJ5 Alleviates the Effects of Cold Stress in Maize Plants. *Gesunde Pflanzen*. 2023. Vol. 75. № 1. P. 77–95. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00666-7>

45. Jinal, H. N., Gopi, K., Kumar, K., Amaresan, N. Effect of zinc-resistant *Lysinibacillus* species inoculation on growth, physiological properties, and zinc uptake in maize (*Zea mays* L.). *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. № 6. P. 6540–6548. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10998-4>

46. Kusale, S. P., Attar, Y. C., Sayyed, R. Z., El Enshasy, H., Hanapi, S. Z., Ilyas, N., Elgorban, A. M., Bahkali, A. H., Marraiki, N. Inoculation of *Klebsiella variicola* Alleviated Salt Stress and Improved Growth and Nutrients in Wheat and Maize. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. № 5. P. 927. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050927>

47. Zafar, S., Iqbal, N., Haidar, M. Z., Rafique, M., & Ali, M. (2021). Responses of spring sown maize (*Zea mays* L.) genotypes to *Aspergillus flavus* inoculation: Grain yield and quality attributes. *Pakistan Journal of Botany*. 2021. Vol. 53. № 4. [https://doi.org/10.30848/PJB2021-4\(30\)](https://doi.org/10.30848/PJB2021-4(30))

48. Naeem, U., Afzaal, M., Haq, I. U., Qazi, A., Yasar, A., Tabinda, A. B., Mahfooz, Y., Naz, A. U., Awan, H. A., & Ahmad, A. Investigating the effect of *Aspergillus niger* inoculated press mud (biofertilizer) on the potential of enhancing maize (*Zea mays* L.) yield, phosphorous use efficiency, and phosphorous agronomic efficiency. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. № 8. P. 666. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07025-2>

49. Li, M.-Y., Wang, W., Mo, F., Ren, A.-T., Wang, Z.-Y., Zhu, Y., Xiong, Y.-C. Seven-year long-term inoculation with *Funneliformis mosseae* increases maize yield and soil carbon storage evidenced by in situ ¹³C-labeling in a dryland. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 944. P. 173975. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173975>

50. Li, X., Sun, P., Zhang, Y., Jin, C., Guan, C. A novel PGPR strain *Kocuria rhizophila* Y1 enhances salt stress tolerance in maize by regulating phytohormone levels, nutrient acquisition, redox potential, ion homeostasis, photosynthetic capacity and stress-responsive genes expression. *Environmental and Experimental Botany*. 2020. Vol. 174. P. 104023. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104023>

51. Xu, R., Li, T., Shen, M., Yang, Z. L., Zhao, Z.-W. Evidence for a Dark Septate Endophyte (*Exophiala pisciphila*, H93) Enhancing Phosphorus Absorption by Maize Seedlings. *Plant and Soil*. 2020. Vol. 452. № 1–2. P. 249–266. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04538-9>

52. Bahraminia, M., Zarei, M., Ronaghi, A., Sepehri, M., Etesami, H. Ionomeric and biochemical responses of maize plant (*Zea mays* L.) inoculated with *Funneliformis mosseae* to water-deficit stress. *Rhizosphere*. 2020. Vol. 16. P. 100269. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100269>

53. Ahmad, I., Jiménez-Gasco, M. D. M., Luthe, D. S., Shakeel, S. N., Barbercheck, M. E. Endophytic *Metarhizium robertsii* promotes maize growth, suppresses insect growth, and alters plant defense gene expression. *Biological Control*. 2020. Vol. 144. P. 104167. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104167>

54. Xu, Y., Zhang, J., Shao, J., Feng, H., Zhang, R., Shen, Q. Extracellular proteins of *Trichoderma guizhouense* elicit an immune response in maize (*Zea mays*) plants. *Plant and Soil*. 2020. Vol. 449. № 1–2. P. 133–149. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04435-1>

55. Ali, R., Gul, H., Rauf, M., Arif, M., Hamayun, M., Husna, Khilji, S. A., Ud-Din, A., Sajid, Z. A., & Lee, I.-J. Growth-Promoting Endophytic Fungus (*Stemphylium lycopersici*) Ameliorates Salt Stress Tolerance in Maize by Balancing Ionic and Metabolic

Status. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. P. 890565. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.890565>

56. Gavilanes, F. Z., Souza Andrade, D., Zucareli, C., Horácio, E. H., Sarkis Yunes, J., Barbosa, A. P., Alves, L. A. R., Cruzatty, L. G., Maddela, N. R., Guimarães, M. D. F. Co-inoculation of *Anabaena cylindrica* with *Azospirillum brasilense* increases grain yield of maize hybrids. *Rhizosphere*. 2020. Vol. 15. P. 100224. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100224>

57. Ribeiro, V. P., Gomes, E. A., De Sousa, S. M., De Paula Lana, U. G., Coelho, A. M., Marriel, I. E., De Oliveira-Paiva, C. A. Co-inoculation with tropical strains of *Azospirillum* and *Bacillus* is more efficient than single inoculation for improving plant growth and nutrient uptake in maize. *Archives of Microbiology*. 2022. Vol. 204. № 2. P. 143. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02759-3>

58. Vanissa, T. T. G., Berger, B., Patz, S., Becker, M., Turečková, V., Novák, O., Tarkowská, D., Henri, F., Ruppel, S. The Response of Maize to Inoculation with *Arthrobacter sp.* And *Bacillus sp.* In Phosphorus-Deficient, Salinity-Affected Soil. *Microorganisms*. 2020. Vol. 8. № 7. P. 1005. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071005>

59. Tyagi, J., Mishra, A., Kumari, S., Singh, S., Agarwal, H., Pudake, R. N., Varma, A., Joshi, N. C. Deploying a microbial consortium of *Serendipita indica*, *Rhizophagus intraradices*, and *Azotobacter chroococcum* to boost drought tolerance in maize. *Environmental and Experimental Botany*. 2023. Vol. 206. P. 105142. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105142>

60. Liu, Y., Yang, Y., & Wang, B. Entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* play roles of maize (*Zea mays*) growth promoter. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. № 1. P. 15706. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19899-7>

61. Datsko, O., Kovalenko, V., Yatsenko, V., Sakhoshko, M., Hotvianska, A., Solohub, I., Horshchar, V., Dubovyk, I., Kriuchko, L., Tkachenko, R. Increasing soils fertility as a factor in the sustainability of agriculture and resilience to climate change. *Modern Phytomorphology*. 2024. Vol. 18. P. 110–113.

62. Shah, K. K., Tripathi, S., Tiwari, I., Shrestha, J., Modi, B., Paudel, N., Das, B. D. Role of soil microbes in sustainable crop production and soil health: A review. *Agricultural Science and Technology*. 2021. Vol. 13. № 2. P. 109–118. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.02.019>

63. Shahane, A. A., Shivay, Y. S. Soil Health and Its Improvement Through Novel Agronomic and Innovative Approaches. *Frontiers in Agronomy*. 2021. № 3. P. 680456. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.680456>

64. Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., Rillig, M. C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020. Vol. 1. № 10. P. 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>

65. Friedrichsen, C. N., Hagen-Zakarison, S., Friesen, M. L., McFarland, C. R., Tao, H., & Wulfhorst, J. D. Soil health and well-being: Redefining soil health based upon a plurality of values. *Soil Security*. 2021. Vol. 2. P. 100004. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100004>

66. Tahat, M., Alananbeh, K., Othman, Y., Leskovar, D. Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. № 12. P. 4859. <https://doi.org/10.3390/su12124859>

67. Khatoun, Z., Huang, S., Rafique, M., Fakhar, A., Kamran, M. A., Santoyo, G. Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 273. P. 111118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111118>

68. Pahalvi, H. N., Rafiya, L., Rashid, S., Nisar, B., Kamili, A. N. Chemical Fertilizers and Their Impact on Soil Health. *Microbiota and Biofertilizers*. 2021. Vol. 2. P. 1–20. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1

69. Poppeliers, S. W., Sánchez-Gil, J. J., De Jonge, R. Microbes to support plant health: Understanding bioinoculant success in complex conditions. *Current Opinion in Microbiology*. 2023. Vol. 73. P. 102286. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2023.102286>
70. Sammauria, R., Kumawat, S., Kumawat, P., Singh, J., & Jatwa, T. K. Microbial inoculants: Potential tool for sustainability of agricultural production systems. *Archives of Microbiology*. 2020. Vol. 202. № 4. P. 677–693. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01795-w>
71. O’Callaghan, M., Ballard, R. A., Wright, D. Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Soil Use and Management*. 2022. Vol. 38. № 3. P. 1340–1369. <https://doi.org/10.1111/sum.12811>
72. Ortiz, A., Sansinenea, E. The Role of Beneficial Microorganisms in Soil Quality and Plant Health. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. № 9. P. 5358. <https://doi.org/10.3390/su14095358>
73. Sible, C. N., Seebauer, J. R., Below, F. E. Plant Biostimulants: A Categorical Review, Their Implications for Row Crop Production, and Relation to Soil Health Indicators. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. № 7. P. 1297. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071297>
74. Romero, F., Labouyrie, M., Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., Tedersoo, L., Bahram, M., Guerra, C. A., Eisenhauer, N., Tao, D., Delgado-Baquerizo, M., García-Palacios, P., Van Der Heijden, M. G. A. Soil health is associated with higher primary productivity across Europe. *Nature Ecology & Evolution*. 2024. Vol. 8. № 10. P. 1847–1855. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02511-8>
75. Gupta, M. M. Arbuscular Mycorrhizal Fungi: The Potential Soil Health Indicators. *Soil Health*. 2020. Vol. 59. P. 183–195. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_11
76. Mahapatra, S., Yadav, R., Ramakrishna, W. Bacillus subtilis impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde. *Journal of Applied Microbiology*. 2022. Vol. 132. № 5. P. 3543–3562. <https://doi.org/10.1111/jam.15480>
77. Chaudhary, P., Chaudhary, A., Bhatt, P., Kumar, G., Khatoon, H., Rani, A., Kumar, S., Sharma, A. Assessment of Soil Health Indicators Under the Influence of Nanocompounds and Bacillus spp. In Field Condition. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. Vol. 9. P. 769871. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.769871>
78. Kumar, A., Singh, S., Mukherjee, A., Rastogi, R. P., & Verma, J. P. Salt-tolerant plant growth-promoting Bacillus pumilus strain JPVS11 to enhance plant growth attributes of rice and improve soil health under salinity stress. *Microbiological Research*. 2021. Vol. 242. P. 126616. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126616>
79. Javed, Z., Tripathi, G. D., Mishra, M., Dashora, K. Actinomycetes – The microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2021. Vol. 31. P. 101893. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101893>