ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.7

ВЛИЯНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ И «НАНОКРЕМНИЯ» НА РОСТ И МИКОРИЗАЦИЮ РАСТЕНИЙ ГОРОХА ПОСЕВНОГО

Научная статья

Смирнова Ю.В.[1, *], Хайруллин Р.М.[2], Кадырова М.Н.[3]
[1, 3] Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, Стерлитамак, Российская Федерация
[2] Институт биохимии и генетики УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (bh84[at]mail.ru)

Аннотация

Исследовано влияние обработки семян гороха (сорт Воронежский зеленый) препаратом спор эндофитной бактерии *Bacillus subtilis* 26Д, а также удобрениями «НаноКремний» и «Бионекс-1» (индивидуально и в комбинации) на рост и микоризацию корней растений. Показано, что наиболее сильный ростстимулирующий эффект наблюдался при использовании бактериального препарата индивидуально в сравнении с другими. Однако при этом бациллы оказывали слабое ингибирующие действие на развитие микоризной инфекции в корнях. Данный негативный эффект бактерий уменьшался при совместной обработке семян с удобрениями «НаноКремний» и «Бионекс-1». Наименьший эффект стимуляции роста растений наблюдался при использовании препарата «НаноКремний», при этом обработка им семян способствовала стимуляции формирования микоризы.

Ключевые слова: эндофитные бактерии, эндомикориза, Bacillus subtilis, Pisum sativum.

THE INFLUENCE OF MICROBIOLOGICAL DRUGS AND 'NANOKREMNIY' ON THE GROWTH AND MYCORHIZATION OF FIELD PEAS

Research article

Smirnova Y.V.[1, *], Khairullin R.M.[2], Kadirova M.N.[3]
[1, 3] Sterlitamak branch of the Ufa University of Science and Technology, Sterlitamak, Russian Federation
[2] Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Center of Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

* Corresponding author (bh84[at]mail.ru)

Abstract

The influence of treating pea seeds (Voronezhsky Zeleny variety) with a drug of endophytic *Bacillus subtilis* 26D bacteria, as well as with 'NanoKremniy' and 'Bionex-1' fertilisers (individually and in combination) on plant root growth and mycorhization was studied. It was shown that the strongest growth-stimulating effect was observed when the bacterial drug was used individually in comparison with others. However, the bacilli had a weak inhibitory effect on the development of mycorrhizal infection in the roots. This negative effect of bacteria was reduced when seeds were treated with 'NanoKremniy' and 'Bionex-1' fertilisers. The least effect on plant growth stimulation was observed when using 'NanoKremniy', while treating seeds with it promoted the formation of mycorhiza.

Keywords: endophytic bacteria, endomycorrhiza, Bacillus subtilis, Pisum sativum.

Введение

Микробиологические препараты, в том числе на основе эндофитных бактерий, широко используются в растениеводстве для стимуляции роста, повышения устойчивости и урожайности сельскохозяйственных культур. К таким средствам относятся, например, Фитоспорин-М, Фитобактерин, Споробактерин и др. Ростстимулирующие бактерии, входящие в состав подобных препаратов, улучшают минеральное питание, повышают устойчивость растений к фитопатогенам и действию неблагоприятных факторов среды. Так, указанные и другие хозяйственно-полезные свойства эндофитного штамма *Bacillus subtilis* 26Д — основы препаратов Фитоспорин-М, Фитоспорин-АС показаны в ряде работ [1], [2], [3].

Эффект действия эндофитных бактерий может быть усилен обработкой растений стимуляторами роста [6] и применением удобрений [4], [5]. Особый интерес вызывает повышение эффективности функционирования растительно-микробных систем с использованием суспензий наночастиц металлов [7] и других элементов. Одним из таких элементов является кремний благодаря высокой биологической активности и уникальным физико-химическим параметрам, перспективным для разработки препаратов на основе его наночастиц [8]. Рядом авторов показано положительное влияние наночастиц кремния на рост и продуктивность сельскохозяйственных растений [9], [10], [11]. Однако до конца неясным остается вопрос о влиянии нанокремния (НК) на другие компоненты агроэкосистем, в частности, микроорганизмы, находящиеся в симбиотических отношениях с растением (эндофитные бактерии, микоризные грибы и др.), от которых в значительной степени зависят рост и урожайность культур. Кроме того, в научной литературе имеется немало свидетельств отрицательного эффекта наночастиц на рост растений [12]. При этом не исключено, что при совместном действии различных ростстимулирующих агентов — препаратов наночастиц, эндофитов, а также удобрений, эффект может быть непредсказуем.

В связи с этим целью данной работы явилось исследование совместного влияния препарата эндофитных бактерий *B. subtilis* 26Д, органического удобрения «Бионекс-1» (ООО НВП «БашИНком», Россия) и препарата «НаноКремний»

(ООО «НаноКремний», Россия) на рост растений и микоризацию корней гороха посевного. Были поставлены следующие задачи:

1) оценить влияние обработки растений гороха препаратом спор *Bacillus subtilis* 26Д, а также удобрениями «НаноКремний» и «Бионекс-1» (индивидуально и в комбинации) на биомассу побегов и корней растений;

2) исследовать влияние обработки растений препаратами (индивидуально и в комбинации) на показатели микоризации корней гороха.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования служили растения гороха посевного (*Pisum sativum* L., сорт Воронежский зеленый). Семена перед посадкой калибровали. Для обработки семян использовали препарат «НаноКремний» (ООО «НаноКремний», Россия), препарат суспензии спор *B. subtilis* 26Д (ВНИИСХМ №128) или баковую смесь препарата «НаноКремний» (НК) и спор бактерий. 1 г семян обрабатывали 20 мкл суспензии бактерий в концентрации 10^8 КОЕ/мл (1 л/т). Препарат «НаноКремний» использовали согласно инструкции, на 1 тонну семян 400 г препарата разводили в 10 л воды. Семена контрольных растений обрабатывали дистиллированной водой. Затем производили посев семян на опытном участке (Стерлитамакский район, климат умеренно-континентальный, чернозем выщелоченный, содержание гумуса 10–15%. Обеспеченность калием и фосфором — средняя) по 75 штук на участках 1х1 $м^2$ на глубину 6–7 см. Исследования проводили в июне–июле 2024 года. Период исследования характеризовался средним количеством осадков (130–132 мм) и высокой температурой воздуха в дневное время (до 35°С).

В контрольных вариантах семена высевали в почву без внесения удобрений. На опытные делянки органическое удобрение «Бионекс-1» (ООО НВП «БашИнком», содержание азота 1–2,5%, фосфора — 2,5–5%, калия — 0,5–1,5%; органическое вещество — не менее 10%) вносили 2 раза в течение эксперимента в виде растворов согласно инструкции производителя. Экспериментальные делянки располагали рандомизировано. В фазе начала созревания семян растения вместе с корневой системой осторожно вынимали из почвы. Побеги отделяли от корней, взвешивали. Корневую систему промывали в проточной воде, окрашивали для гистохимического анализа и количественного учета везикулярно-арбускулярной микоризы (ВАМ) по методу Трувело и др. Корни обрабатывали 10%-ным раствором КОН, промывали 2%-ным раствором HCl, окрашивали трипановым синим. С помощью световой микроскопии оценивали частоту встречаемости микоризы в корнях гороха. Частота (F%), интенсивность колонизации микоризы (M%) и изобилие арбускул (A%) в корневой системе были рассчитаны с помощью компьютерной программы «Mycocalc» [13].

Эксперименты проводили в трех биологических и трех аналитических повторностях. Статистическую обработку результатов осуществляли с помощью стандартных программ пакета Microsoft. В таблицах приведены средние значения повторностей и стандартное отклонение.

Результаты и обсуждение

Обработка растений препаратами как индивидуально, так и при их комбинации, стимулировала рост надземной части и корней растений. При обработке каждым препаратом в отдельности наиболее сильный ростстимулирующий эффект наблюдался при использовании эндофитной бактерии *B. subtilis* 26Д. Надземная биомасса растений, полученных из семян, обработанных спорами эндофита, была больше в сравнении с контрольными (не обработанными никаким из препаратов) на 67%, корней — на 97% (табл. 1).

Таблица 1 - Средние значения массы растения гороха посевного

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.7.1

Вариант опыта	Надземная часть, г	Корни, г
Контроль	21,42±1,79	4,31±0,22
НаноКремний	31,50±3,27	6,43±0,18
B.subtilis 26Д	57,15±2,54	8,50±0,74
Бионекс	37,56±1,60	6,99±0,17
НаноКремний +*B.subtilis* 26Д	38,85±2,52	7,15±0,36
Бионекс + НаноКремний	32,67±2,56	7,05±0,58
Бионекс + *B. subtilis* 26Д	60,87±2,98	8,15±0,79
Бионекс + *B. subtilis* 26Д + НаноКремний	53,73±2,17	8,00±0,25

Обработка семян спорами бактерии с последующей обработкой вегетирующих растений гороха позволила получить максимальную массу надземной части в сравнении со всеми другими вариантами применения препаратов. Этот показатель был больше в сравнении с растениями контрольного варианта (без обработок), у побегов — в 2,84 раза, у корней — в 1,89 раз.

Полученные нами данные хорошо согласуются с имеющимися в научной литературе. Известно, что «Бионекс-1» содержит не только такие макроэлементы, как азот, фосфор, калий, но и гумусовые вещества и клетки бактерии *B. subtilis* 26Д. Такое сочетание биоагентов усиливает действие друг друга. Следует отметить, что во всех вариантах опыта, где растения были обработаны бациллами, как чистой культурой, так и в комбинации с другими изучавшимися препаратами, указанные морфометрические показатели были максимальными в сравнении с использованием только препаратов НК или «Бионекс-1». Такой эффект объясняется тем, что эндофитные бактерии *B. subtilis* 26Д стимулируют рост растений, улучшая их минеральное питание, повышая уровень фитогормонов и других рострегулирующих веществ в тканях. Кроме того, они препятствуют развитию фитопатогенов, вырабатывая антибиотики, литические ферменты, переводя питательные вещества в недоступные для патогенов формы [1], [14].

Обработка растений препаратами в большинстве вариантов опыта способствовала увеличению степени микоризации корней гороха. Так, частота микоризной инфекции (F%) в корневой системе гороха наиболее значительно увеличилась при использовании препаратов НК и «Бионекс», и при их комбинации друг с другом, на 7,6%, 5,9% и 10,5% соответственно, по сравнению с контролем (растения без обработки препаратами). При обработке растений только препаратом спор бацилл наблюдали тенденцию к снижению частоты микоризации. Однако, показатели интенсивности микоризации (M%) корней и обилия арбускул (A%) в тканях корня растений в этом варианте опыта были больше в сравнении с контрольными растениями, необработанными препаратами (табл. 2).

Таблица 2 - Показатели микоризации корней гороха при обработке семян и растений различными препаратами и их комбинациями

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.162.7.2

Вариант опыта	Показатели микоризации		
	F%	M%	A%
Контроль	79,72±1,45	10,41±0,69	0,10±0,07
НаноКремний	85,81±1,36	19,29±1,15	1,41±0,01
B. subtilis 26Д	77,44±1,46	16,15±0,73	0,36±0,03
Бионекс	84,42±1,33	13,30±1,05	0,41±0,02
НаноКремний +*B. subtilis* 26Д	79,00±1,09	15,92±1,30	0,17±0,06
Бионекс + НаноКремний	88,06±1,31	22,68±1,16	0,62±0,01
Бионекс + *B. subtilis* 26Д	86,67±1,16	22,36±1,05	0,73±0,07
Бионекс + *B. subtilis* 26Д + ‹‹НаноКремний››	86,85±1,75	17,24±1,38	1,09±0,13

Подобное уменьшение частоты микоризации корней растений при обработке семян препаратом спор и клеток эндофита *B. subtilis* 26Д были получены ранее нами и другими авторами [1]. Предполагается, что мобилизация фосфатов бактериальными метаболитами снижает конкурентоспособность эндомикоризных грибов. Кроме того, бациллы продуцирую различные соединения с фунгицидным действием, что может также сказываться на развитии ВАМ.

При обработке растений препаратом НК, как индивидуально, так и в комбинации с другими, наблюдали статистически достоверное увеличение показателей микоризации корней гороха. Известно, что эффективность микоризной инфекции увеличивается после обработки растений кремнием, что связано с более высокой концентрацией этого элемента в микоризных грибах, ассоциированных с растениями [15]. Кремний и микоризные грибы действуют синергически, улучшая рост растений и их биохимические параметры.

Заметное увеличение показателей микоризации корней гороха наблюдали во всех вариантах опыта с применением удобрения «Бионекс-1», несмотря на наличие в составе данного препарата бактерий *B. subtilis* 26Д. Вероятно, внесение в почву дополнительного количества органических соединений с удобрением смягчало конкурентные взаимоотношения между микоризными грибами и эндофитными бактериями.

Заключение

Полученные данные демонстрируют, что дополнительное применение препарата «Бионекс-1» после обработки семян гороха спорами эндофита *B. subtilis* 26Д не оказывает существенного влияния на формирование биомассы как надземной части, так и корней растений. Несмотря на значительную стимуляцию роста растений гороха бактерией *B. subtilis* 26Д, эндофит оказывал слабое угнетающее действие на развитие микоризной инфекции в корнях. Такой негативный эффект уменьшался обработкой семян в комбинации с препаратами «НаноКремний» и «Бионекс-1». Наименьший эффект стимуляции роста растений наблюдался при использовании препарата «НаноКремний», при этом обработка им семян способствовала стимуляции формирования микоризы.

Таким образом, для достижения наилучших результатов при выращивании гороха и других сельскохозяйственных культур, для которых важно развитие микоризного симбиоза, рекомендуется комбинировать обработку семян бактерией *B. subtilis* 26Д с препаратами «НаноКремний» и «Бионекс-1». Это позволит не только стимулировать рост растений, но и уменьшить негативное влияние эндофита на развитие микоризы.

Полученные в исследовании данные открывают перспективы для дальнейших исследований в области агробиотехнологий и симбиотических взаимодействий растений с микроорганизмами. Необходимо дальнейшее изучение молекулярных и биохимических механизмов действия препаратов, особенно на основе нанокремния, на эндофитные бактерии и микоризные грибы.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Егоршина А.А. Фосфат-мобилизующая активность эндофитных штаммов *Bacillus subtilis* и их влияние на степень микоризации корней пшеницы / А.А. Егоршина, Р.М. Хайруллин, М.А. Лукьянцев [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. — 2011. — Т. 4, № 2. — С. 172–182.

2. Курамшина З.М. Токсичность кадмия и никеля для растений *Sinapis alba*, инокулированных эндофитными штаммами *Bacillus subtilis* / З.М. Курамшина, Ю.В. Смирнова, Р.М. Хайруллин // Физиология растений. — 2018. — Т. 65, № 2. — С. 133–142.

3. Курамшина З.М. Сортовая отзывчивость *Triticum aestivum* L. на инокуляцию клетками эндофитных штаммов *Bacillus subtilis* / З.М. Курамшина, Р.М. Хайруллин, Ю.В. Смирнова // Российская сельскохозяйственная наука. — 2019. — № 6. — С. 3–6.

4. Чеботарь В.К. Микробные препараты на основе эндофитных и ризобактерий, которые перспективны для повышения продуктивности и эффективности использования минеральных удобрений у ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) и овощных культур / В.К. Чеботарь, А.Н. Заплаткин, А.В. Щербаков и др. // Сельскохозяйственная биология. — 2016. — № 3. — С. 335–342.

5. Сергалиев Н.Х. Влияние биопрепаратов и минерального удобрения на активность симбиотического аппарата нута (*Cicer arietinum* L.) в сухостепной зоне Приуралья / Н.Х. Сергалиев, Р.К. Уразгалиева, Б.Б. Жылкыбаев [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. — 2014. — № 4 (48). — С. 67–69.

6. Olivares F.L. Plant growth promoting bacteria and humic substances : crop promotion and mechanisms of action / F.L. Olivares, J.G. Busato, A.M. de Paula [et al.] // Chem. Biol. Technol. Agric. — 2017. — Vol. 4. — Article 30. — DOI: 10.1186/s40538-017-0112-x.

7. Гончар Е.Н. Повышение эффективности микробно-растительного симбиоза путем создания композиционных биопрепаратов с использованием наночастиц биогенных металлов / Е.Н. Гончар, А.В. Щербаков, К.Г. Лопатько [и др.] // Достижения науки и техники АПК. — 2013. — № 12. — С. 30–34.

8. Rajput V.D. Effects of Silicon and Silicon-Based Nanoparticles on Rhizosphere Microbiome / V.D. Rajput, T. Minkina, M. Feizi [et al.] // Plant Stress and Growth. Biology (Basel). — 2021. — Vol. 10, Issue 8. — Art. 791. — DOI: 10.3390/biology10080791.

9. Asgari F. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.) / F. Asgari, A. Majd, P. Jonoubi, F. Najafi // Plant Physiol. Biochem. — 2018. — Vol. 127. — P. 152–160. — DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.03.021.

10. Suciaty T. The effect of nano-silica fertilizer concentration and rice hull ash doses on soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) growth and yield / T. Suciaty, D. Purnomo, A.T. Sakya, Supriyadi // IOP Conf. Series: Earth Environment Science. — 2018. — Vol. 129. — Art. 012009. — DOI: 10.1088/1755-1315/129/1/012009.

11. Janmohammadi M. Effect of Pre-Sowing Seed Treatments with Silicon Nanoparticles on Germinability of Sunflower (*Helianthus annuus*) / M. Janmohammadi, N. Sabaghnia // Botanica. — 2015. — Vol. 21. — P. 13–21. — DOI: 10.1515/botlit-2015-0002.

12. Goswami P. Positive and negative effects of nanoparticles on plants and their applications in agriculture / P. Goswami, S. Yadav, J. Mathur // Plant Science Today. — 2019. — Vol. 6, Issue 2. — P. 232–242. — DOI: 10.14719/pst.2019.6.2.502.

13. Trouvelot A.K. Mesure du taux de mycorhization VA d’un système racinaire. Recherche de methodes d’estimation ayant une signification fonctionnelle, In Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae / A.K. Trouvelot, J.L. Kough [et al.] // INRA edition, Paris. — 2006. — P. 217–221.

14. Васильева Е.Н. Эндофитные микроорганизмы в фундаментальных исследованиях и сельском хозяйстве / Е.Н. Васильева, Г.А. Ахтемова, В.А. Жуков [и др.] // Экологическая генетика. — 2019. — № 1. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/endofitnye-mikroorganizmy-v-fundamentalnyh-issledovaniyah-i-selskom-hozyaystve (дата обращения: 12.05.2025)

15. Hajiboland R. Silicon influences growth and mycorrhizal responsiveness in strawberry plants / R. Hajiboland, N. Moradtalab, N. Aliasgharzad // Physiol Mol Biol Plants. — 2018. — Vol. 24, Issue 6. — P. 1103–1115.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Egorshina A.A. Fosfat-mobilizuyushchaya aktivnost' endofitnykh shtammov *Bacillus subtilis* i ikh vliyanie na stepen' mikorizatsii korney pshenitsy [Phosphate-mobilizing activity of endophytic strains of Bacillus subtilis and their effect on the degree of mycorrhization of wheat roots] / A.A. Egorshina, R.M. Khayrullin, M.A. Luk'yantsev [et al.] // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya [Journal of Siberian Federal University. Series: Biology]. — 2011. — Vol. 4, № 2. — P. 172–182. [in Russian]

2. Kuramshina Z.M. Toksichnost' kadmiya i nikelya dlya rasteniy *Sinapis alba*, inokulirovannykh endofitnymi shtammami *Bacillus subtilis* [Toxicity of cadmium and nickel to Sinapis alba plants inoculated with endophytic strains of Bacillus

subtilis] / Z.M. Kuramshina, Yu.V. Smirnova, R.M. Khayrullin // Fiziologiya rasteniy [Plant Physiology]. — 2018. — Vol. 65, № 2. — P. 133–142. [in Russian]

3. Kuramshina Z.M. Sortovaya otzyvchivost' *Triticum aestivum* L. na inokulyatsiyu kletkami endofitnykh shtammov *Bacillus subtilis* / Z.M. Kuramshina, R.M. Khayrullin, Yu.V. Smirnova // Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka [Russian agricultural science]. — 2019. — № 6. — P. 3–6. [in Russian]

4. Chebotar' V.K. Mikrobnye preparaty na osnove endofitnykh i rizobakteriy, kotorye perspektivny dlya povysheniya produktivnosti i effektivnosti ispol'zovaniya mineral'nykh udobrenij u yarovogo yachemenya *(Hordeum vulgare* L.) i ovoshchnykh kul'tur / V.K. Chebotar', A.N. Zaplatkin, A.V. Shcherbakov et al. // Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]. — 2016. — № 3. — P. 335–342. [in Russian]

5. Sergaliev N.H. Vliyanie biopreparatov i mineral'nogo udobreniya na aktivnost' simbioticheskogo apparata nuta (*Cicer arietinum* L.) v suhostepnoj zone Priural'ya [The influence of biological drugs and mineral fertilizers on the activity of the symbiotic apparatus of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in the dry steppe zone of the Urals] / N.H. Sergaliev, R.K. Urazgalieva, B.B. Zhylkybaev [et al.] // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [News of Orenburg State Agrarian University]. — 2014. — № 4 (48). — P. 67–69. [in Russian]

6. Olivares F.L. Plant growth promoting bacteria and humic substances : crop promotion and mechanisms of action / F.L. Olivares, J.G. Busato, A.M. de Paula [et al.] // Chem. Biol. Technol. Agric. — 2017. — Vol. 4. — Article 30. — DOI: 10.1186/s40538-017-0112-x.

7. Gonchar E.N. Povysheniye effektivnosti mikrobnorastitel'nogo simbioza putem sozdaniya kompozitsionnykh biopreparatov s ispol'zovaniem nanochastic biogennykh metallov [Improving the efficiency of microbial-plant symbiosis by creating composite biological products using nanoparticles of biogenic metals] / E.N. Gonchar, A.V. Shcherbakov, K.G. Lopatko [et al.] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Achievements of Science and Technology in AIC]. — 2013. — № 12. — P. 30–34. [in Russian]

8. Rajput V.D. Effects of Silicon and Silicon-Based Nanoparticles on Rhizosphere Microbiome / V.D. Rajput, T. Minkina, M. Feizi [et al.] // Plant Stress and Growth. Biology (Basel). — 2021. — Vol. 10, Issue 8. — Art. 791. — DOI: 10.3390/biology10080791.

9. Asgari F. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.) / F. Asgari, A. Majd, P. Jonoubi, F. Najafi // Plant Physiol. Biochem. — 2018. — Vol. 127. — P. 152–160. — DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.03.021.

10. Suciaty T. The effect of nano-silica fertilizer concentration and rice hull ash doses on soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) growth and yield / T. Suciaty, D. Purnomo, A.T. Sakya, Supriyadi // IOP Conf. Series: Earth Environment Science. — 2018. — Vol. 129. — Art. 012009. — DOI: 10.1088/1755-1315/129/1/012009.

11. Janmohammadi M. Effect of Pre-Sowing Seed Treatments with Silicon Nanoparticles on Germinability of Sunflower (*Helianthus annuus*) / M. Janmohammadi, N. Sabaghnia // Botanica. — 2015. — Vol. 21. — P. 13–21. — DOI: 10.1515/botlit-2015-0002.

12. Goswami P. Positive and negative effects of nanoparticles on plants and their applications in agriculture / P. Goswami, S. Yadav, J. Mathur // Plant Science Today. — 2019. — Vol. 6, Issue 2. — P. 232–242. — DOI: 10.14719/pst.2019.6.2.502.

13. Trouvelot A.K. Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de methodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle, In Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae / A.K. Trouvelot, J.L. Kough [et al.] // INRA edition, Paris. — 2006. — P. 217–221.

14. Vasileva E.N. Endofitnye mikroorganizmy v fundamental'nykh issledovaniyakh i sel'skom khozyaystve [Endophytic microorganisms in fundamental research and agriculture] / E.N. Vasileva, G.A. Akhtemova, V.A. Zhukov [et al.] // Ekologicheskaya genetika [Environmental Genetics]. — 2019. — № 1. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/endofitnye-mikroorganizmy-v-fundamentalnyh-issledovaniyah-i-selskom-hozyaystve (accessed: 12.05.2025) [in Russian]

15. Hajiboland R. Silicon influences growth and mycorrhizal responsiveness in strawberry plants / R. Hajiboland, N. Moradtalab, N. Aliasgharzad // Physiol Mol Biol Plants. — 2018. — Vol. 24, Issue 6. — P. 1103–1115.