

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 579.64+606:63

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-1-7-16>

Поступила в редакцию 22.04.2025

Received 22.04.2025

И. В. Шавейко¹, З. М. Алешенкова², И. Н. Ананьева²,
М. М. Коротков³, О. В. Короткова³

¹ООО «Фермент», д. Флерьяново, Ляховичский район, Брестская область, Республика Беларусь²Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь³Полесский институт растениеводства, аг. Криничный, Мозырский район, Гомельская область, Республика Беларусь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНДОФИТНЫХ БАКТЕРИЙ ДЛЯ СТИМУЛЯЦИИ РОСТА И РАЗВИТИЯ СОИ (*GLYCINE MAX* (L.) MERR.)

Аннотация. В работе приведены результаты применения ризобияльных (*Bradyrhizobium japonicum* БИМ В-743) и неризобияльных (*Agrobacterium tumefaciens* БИМ В-1315 Г и *Pseudomonas brassicacearum* БИМ В-1228 Д) эндофитных бактерий сои как для обработки семян, так и вегетирующих растений на посевах сои в условиях опытного поля Полесского института растениеводства. Установлено позитивное влияние обработки вегетирующих растений сои сорта Верас эндофитами на величину зеленой массы (11–34,9 %), массу корней (13–26,2 %), количество бобов (54,5–83,3 %), массу 1 000 семян (6,4–9,6 %), массу семян с 1 м² (29,7–47,7 %). Максимальные положительные результаты по всем показателям получены при совместном использовании ризобияльных и неризобияльных эндофитов.

Предпосевная инокуляция семян сои сорта Ясельда ризобияльными и неризобияльными эндофитными бактериями положительно повлияла на высоту растений (8,1–12,7 %), зеленую массу (16,2–38,9 %), количество бобов (71,4–81 %) и массу 1 000 семян (8,9–15,4 %), что обеспечило получение годового экономического эффекта (чистый дополнительный доход с 1 га) по зеленой массе – 595,0 бел. руб. (без НДС), по семенам – 3 120,0 бел. руб. (без НДС).

Ключевые слова: ризобияльные и неризобияльные эндофитные бактерии сои, азотфиксирующий, фосфатсольюбилизирующий, предпосевная инокуляция семян, обработка вегетирующих растений

Для цитирования: Использование эндофитных бактерий для стимуляции роста и развития сои (*Glycine max* (L.) Merr.) / И. В. Шавейко, З. М. Алешенкова, И. Н. Ананьева [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2026. – Т. 71, № 1. – С. 7–16. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-1-7-16>

Irina V. Shaveiko¹, Zinaida M. Aleschenkova², Irina N. Ananyeva²,
Michail M. Korotkov³, Oksana V. Korotkova³

¹LLC Ferment, d. Fleryanovo, Lyakhovichi District, Brest Region, Republic of Belarus²Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus³Polesie Institute of Plant Growing, ag. Krinichny, Mozyr District, Gomel Region, Republic of Belarus

USE ENDOPHYTIC BACTERIA TO STIMULATE GROWTH AND DEVELOPMENT OF SOYBEAN (*GLYCINE MAX* (L.) MERR.)

Abstract. The article presents the results of using rhizobial (*Bradyrhizobium japonicum* BIM B-743) and non-rhizobial (*Agrobacterium tumefaciens* BIM B-1315 G and *Pseudomonas brassicacearum* BIM B-1228 D) endophytic soybean bacteria for both seed and vegetative plant treatment on soybean crops in the experimental field of the Polesie Institute of Plant Growing. A positive effect of treating vegetative plants of the 'Veras' soybean variety with endophytes on the amount of green mass (11–34.9 %), root mass (13–26.2 %), number of beans (54.5–83.3 %), mass of 1,000 seeds (6.4–9.6 %), and mass of seeds per 1 m² (29.7–47.7 %) was established. The maximum positive results for all indicators were obtained with combined use of rhizobial and non-rhizobial endophytes.

Pre-sowing inoculation of 'Yaselda' soybean seeds with rhizobial and non-rhizobial endophytic bacteria had a positive effect on plant height (8.1–12.7 %), root mass (16.2–38.9 %), number of beans (71.4–81 %) and 1,000 seed weight (8.9–15.4 %), which ensured an annual economic effect (net additional income per 1 ha) of 595.0 BYN for green mass (excluding VAT) and 3,120.0 BYN for seeds (excluding VAT).

Keywords: rhizobial and non-rhizobial endophytic bacteria of soybeans, nitrogen-fixing, phosphate-solubilizing, pre-sowing inoculation of seeds, treatment of vegetative plants

For citation: Shaveiko I. V., Aleschenkova Z. M., Ananyeva I. N., Korotkov M. M., Korotkova O. V. Use endophytic bacteria to stimulate growth and development of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya biyalagichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2026, vol. 71, no. 1, pp. 7–16 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2026-71-1-7-16>

Введение. Эндифиты (от греч. *endon* – внутри, *phyton* – растение) являются частью микробиома растений и играют важную роль в процессе их роста и повышения устойчивости к стрессу [1]. Они имеют преимущества перед микроорганизмами, обитающими вне растения, поскольку не испытывают воздействия экстремальных условий окружающей среды, находятся в условиях стабильного pH, оптимальной влажности и обеспечены питательными веществами, поставляемыми растениями. Природа взаимодействия растений и эндифитов варьируется от мутуализма до патогенности [2]. Эндифитные бактерии, способные фиксировать азот атмосферы, солубилизовать нерастворимые соединения фосфора, продуцировать сидерофоры и 1-аминоциклопропан-1-карбоксилат-деаминазу, ингибировать развитие патогенов, осуществлять деградацию ксенобиотиков, приносят пользу растениям [3, 4]. Эндифитные микроорганизмы способны продуцировать широкий спектр метаболитов и повышать стрессоустойчивость растений, увеличивать урожай сельскохозяйственных культур [2–6].

Внимание исследователей привлекают взаимоотношения эндифитных бактерий с бобовыми растениями, которые благодаря симбиотической азотфиксации вносят значительный вклад в поддержание баланса азота в почве. Бобовые растения интересны тем, что в их физиологическое состояние вносят вклад как ризобийные, так и неризобийные эндифитные микроорганизмы [7].

Возделывание таких зернобобовых культур, как соя, на почвах с низким содержанием гумуса может быть эффективным при наличии в почве спонтанных конкурентоспособных штаммов клубеньковых бактерий. Соя, обладая способностью вступать в симбиоз с клубеньковыми бактериями и обогащать почву азотом, обеспечивает накопление за вегетационный период до 200 кг азота на га [8]. Для многих регионов Беларуси, где соя раньше не выращивалась и в почве отсутствуют спонтанные штаммы *Bradyrhizobium japonicum*, предпосевная обработка семян сои и вегетирующих растений инокулянтами – необходимое условие ее возделывания.

Одним из способов повышения эффективности бобово-ризобийного симбиоза (*Glycine max* (L.) Merr. – *B. japonicum*) и стрессоустойчивости растений сои является использование в составе инокулянтов высокоэффективных штаммов *B. japonicum* совместно с фосфатмобилизующими и стимулирующими рост растений микроорганизмами [9–11].

Обработка семян и вегетирующих растений сои ризобийными и неризобийными эндифитными бактериями дает возможность усилить процесс азотфиксации, уменьшить объем внесения азотных и фосфорных удобрений, повысить продуктивность сои.

Цель работы – изучить эффективность использования ризобийных и неризобийных эндифитных бактерий для стимуляции роста и развития сои.

Объекты и методы исследования. Микробиологические объекты – штаммы неризобийных эндифитных бактерий сои *Pseudomonas brassicacearum* 11E и *Agrobacterium tumefaciens* 27C, выделенные из стеблей и корней растений сои, отобранные по показателям фосфатсолубилизующей, ростстимулирующей активностей, и азотфиксирующий штамм ризобий *B. japonicum* 27N, выделенный из клубеньков растений сои. Растительные объекты – соя сортов Верас и Ясельда.

Для получения посевного материала и глубинного раздельного культивирования эндифитных бактерий для ризобийной культуры *B. japonicum* 27N использовали маннитно-люпиновую среду, г/л: маннит – 10 г; K_2HPO_4 – 0,5 г; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,41 г; NaCl – 0,2 г; $CaSO_4$ – 0,1 г; люпиновый экстракт – 100 мл; агар-агар – 20,0 г; pH 7,1–7,3; для неризобийных эндифитных бактерий *A. tumefaciens* 27C и *P. brassicacearum* 11E – оптимизированную питательную среду Мейнелла, г/л: меласса – 30 г; K_2HPO_4 – 7,0 г; KH_2PO_4 – 3,0 г; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,1 г; $(NH_4)_2SO_4$ – 1,5 г; натрий лимоннокислый – 0,5 г; pH среды доводится 10%-м раствором KOH до $7,0 \pm 0,2$.

Посевной материал *A. tumefaciens* 27C, *P. brassicacearum* 11E и *B. japonicum* 27N получали в глубинных условиях в колбах на лабораторной качалке. Условия культивирования: объем инокулюма – 10 % от объема среды, аэрация – 200 ± 20 об/мин, температура – 28 ± 2 °C, время культивирования – 72 и 120 ч для неризобийных и ризобийного эндифитов соответственно.

Опытную партию культуральных жидкостей (КЖ) эндифитных бактерий нарабатывали в Отделе «Научно-производственный центр биотехнологий» Института микробиологии НАН Беларуси на шейкере-инкубаторе в колбах объемом 2 л с коэффициентом заполнения питательной

средой 0,5 при следующих условиях: среды культивирования – модифицированная среда Мейнелла (для *A. tumefaciens* 27С и *P. brassicacearum* 11Е), маннитно-люпиновая среда (для *B. japonicum* 27N), температура – 28 ± 2 °С, скорость вращения качалки – 100 ± 10 об/мин, объем инокулюма – 10 % от объема среды. Продолжительность культивирования *A. tumefaciens* 27С и *P. brassicacearum* 11Е составляла 48 ч, медленно растущих *B. japonicum* 27N – 120 ч. Численность жизнеспособных клеток бактериальных культур определяли методом предельных разведений и поверхностного посева суспензии на агаризованную питательную среду. Содержание клеток эндофитов в КЖ было не менее $1 \cdot 10^9$ КОЕ/мл.

Полевые исследования проводились в Полесском институте растениеводства (Мозырский р-н Гомельской обл.). Почва опытного участка дерново-подзолистая рыхло-супесчаная, слабооподзоленная, развивающаяся на супесях, подстилаемых с глубины 140–170 см мореным суглинком. Агрохимическая характеристика следующая: рН (в KCL) 6,49, гумус (по Тюрину) – 2,48 %, P_2O_5 (по Кирсанову) – 249 мг/кг, K_2O (по Масловой) – 214 мг/кг, Са – 874 мг/кг, Mg – 190 мг/кг, В – 0,32 мг/кг, Cu – 2,11 мг/кг, Zn – 2,42 мг/кг почвы. Агротехническая обработка почвы проводилась в соответствии с отраслевым регламентом. Площадь участка – 20 м² (4 × 5 м), деланки – 1 м² в трехкратной повторности. Расположение вариантов последовательное со смещением. Проведено опрыскивание против однолетних и многолетних сорняков: Экстракорн (3,5 л/га) – до всходов, Базагран (3,0 л/га) + Фюзилад Форте (2 л/га) – в фазу 1–2-го тройчатых листьев. В 2020 г. проводилась обработка вегетирующих растений сои сорта Верас в фазу 1-го тройчатосложного листа в соответствии со схемой опыта на фоне применения минеральных удобрений в дозе $N_{60} P_{90} K_{120}$: 1 – контроль, опрыскивание водой; 2 – опрыскивание КЖ *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – опрыскивание КЖ *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д; 4 – опрыскивание КЖ *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; 5 – опрыскивание КЖ *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г. Объемное соотношение КЖ, содержащих эндофиты *B. japonicum* 27N, *P. brassicacearum* 11Е, *A. tumefaciens* 27С и продукты их метаболизма, составляло 1 : 1 или 1 : 1 : 1. Обработку проводили 2%-м рабочим раствором КЖ эндофитов из расчета 200 л/га.

В 2021 г. агротехническая обработка почвы применялась согласно отраслевому регламенту: осенью – вспашка ПЛН-4-35, весной – закрытие влаги АДН-4, предпосевное рыхление и выравнивание Horsh Joker серии СТ (3,0–6,0 м). Проведена обработка против однолетних и многолетних сорняков: Пульсар (1,0 л/га) – до всходов, Базагран (3,0 л/га) + Фюзилад Форте (2 л/га) – в фазу 2–3-го тройчатых листьев. Фунгицидно-инсектицидная обработка посевов: Амистар Экстра (1 л/га) + Фуфанон (1 л/га), Борей (0,2 л/га) – против болезней и вредителей. Исследования проводились на семенах сои сорта Ясельда (ООО «Соя-Север»). Предпосевная обработка семян сои осуществлялась из расчета 0,2 л КЖ эндофитов на гектарную норму семян, расход рабочей жидкости – 10 л на 1 т семян в соответствии со схемой опыта на фоне применения минеральных удобрений в дозе $N_{30} P_{90} K_{120}$: 1 – контроль, обработка водой; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г (в соотношении 1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г (в соотношении 1 : 0,5 : 0,5).

Экспериментальные данные статистически обработаны в программе TIBCO Statistica, статистическая значимость различий оценивалась при $p < 0,05$; $p < 0,01$; $p < 0,001$.

Результаты и их обсуждение. В исследовании использован сорт сои Ясельда, внесенный в 1998 г. в Госреестр сортов Беларуси, в 2004 г. – в Госреестр селекционных достижений России по Центрально-Черноземному региону, а также зарегистрированный в Украине, Великобритании и Киргизии. Ранее данный сорт был использован нами при проведении исследований по обработке семян в лабораторных условиях и представлял интерес в качестве объекта полевых исследований. Поскольку эти исследования проводились в рамках ГПНИ, они не предполагали 2-летних регистрационных испытаний. Интерес представляла возможность применения эндофитных бактерий как для обработки семян сои сорта Ясельда, так и для обработки всходов сои сорта Верас, зарегистрированного тем же коллективом белорусских селекционеров в 2007 г. Оба сорта являются скороспелыми, адаптированными к местной сумме активных температур и долготе дня.

Из клубеньков, корней и стеблей растений сои нами ранее были выделены, отобраны и охарактеризованы ризобийный азотфиксирующий штамм *B. japonicum* 27N, фосфатсоллюбилизирующий штамм *P. brassicacearum* 11E (прежнее название – *P. fluorescens*), стимулирующий рост растений штамм *A. tumefaciens* 27C (прежнее название – *Rhizobium radiobacter*) [12]. Культуры непатогенны, нетоксичны и были депонированы в Белорусской коллекции непатогенных микроорганизмов под следующими номерами: *A. tumefaciens* – БИМ В-1315 Г, *P. brassicacearum* – БИМ В-1228 Д, *B. japonicum* – БИМ В-743. В лабораторном опыте в условиях светокультуры при обработке проростков сои нами ранее был установлен стимулирующий эффект инокуляции неризобийными эндофитными бактериями на фоне применения ризобийного эндофита *B. japonicum*, выразившийся в возрастании накопления сырой фитомассы и увеличении азотфиксирующей активности клубеньковых бактерий (на 32,2 %) [12]. Заложенный в 2020 г. в полевых условиях вегетационный опыт предусматривал обработку вегетирующих растений сои (в фазу образования 1-го тройчатосложного листа) эндофитными бактериями по отдельности и в комплексе друг с другом (соотношения 1 : 1 и 1 : 1 : 1).

Несмотря на то что температурный и водный режимы вегетационного периода 2020 г. характеризовались как относительно неблагоприятные для роста и развития растений сои, обработка вегетирующих растений сои сорта Верас эндофитными бактериями *B. japonicum* БИМ В-743; *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д; *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г способствовала увеличению сырой зеленой массы растений сои на 11; 17; 26,7; 34,9 % соответственно (рис. 1). Под действием обработки растений сои масса корней по вариантам опыта также увеличилась на 13; 14,8; 13,8; 26,2 % соответственно (рис. 2).

Количество бобов в опытных вариантах было на 54,5; 69,7; 69,7 и 83,3 % больше, чем в контроле, масса семян при влажности 12,4 % с 1 м² опытных площадок превышала контроль на 29,7; 33,3; 47,7; 41,5 %, а масса 1 000 семян опытных растений сои сорта Верас была больше контроля на 6,4; 6,3; 7,4 и 9,6 % соответственно (рис. 3–5).

Максимальные результаты по всем показателям роста и развития растений сои сорта Верас получены при совместном использовании для обработки ризобийных и неризобийных эндофитных бактерий. Это свидетельствует об эффективности использования агрономически ценных эндофитных бактерий сои *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г и *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д

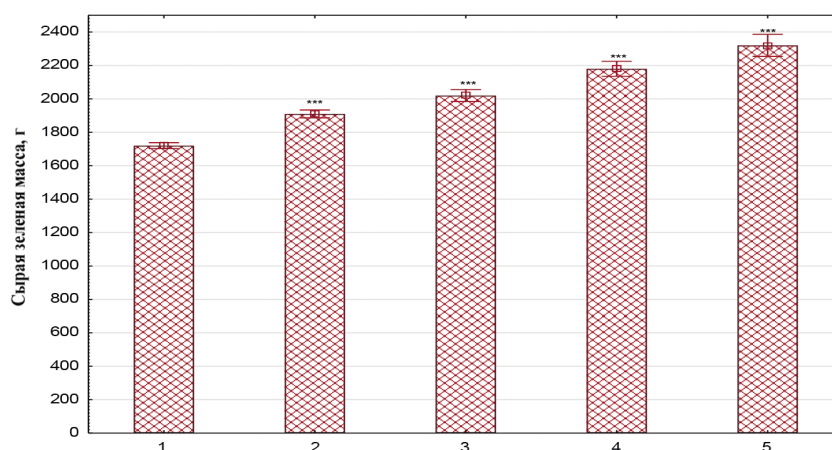


Рис. 1. Влияние обработки растений сои сорта Верас эндофитными бактериями на величину сырой зеленой массы (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д; 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; 5 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; *** – есть различия при $p < 0,001$)

Fig. 1. Effect of treatment of vegetative plants of the 'Veras' soybean variety with endophytic bacteria on the amount of green mass (1 – control; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д; 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; 5 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; *** – there are differences at $p < 0.001$)

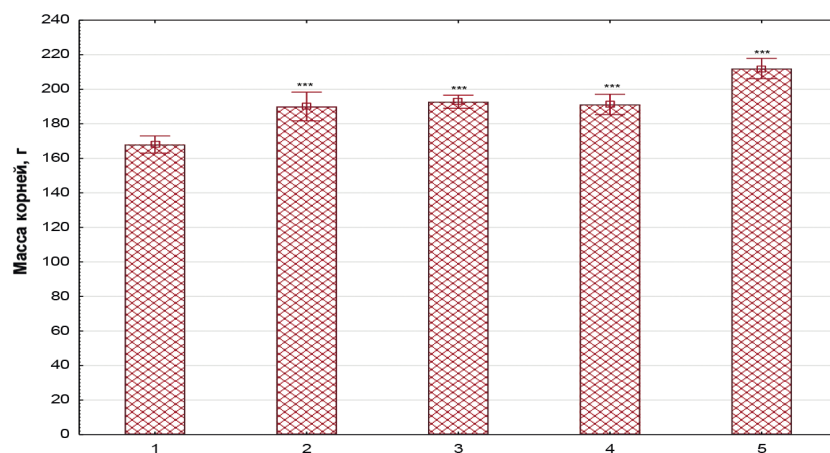


Рис. 2. Влияние обработки растений сои эндофитными бактериями на массу корней (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д; 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; 5 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; *** – есть различия при $p < 0,001$)

Fig. 2. Effect of treatment of soybean plants with endophytic bacteria on the weight of the root system (1 – control; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *P. brassicearum* BIM B-1228 D; 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G; 5 – *B. japonicum* BIM B-743 + *P. brassicearum* BIM B-1228 D + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G; *** – there are differences at $p < 0.001$)

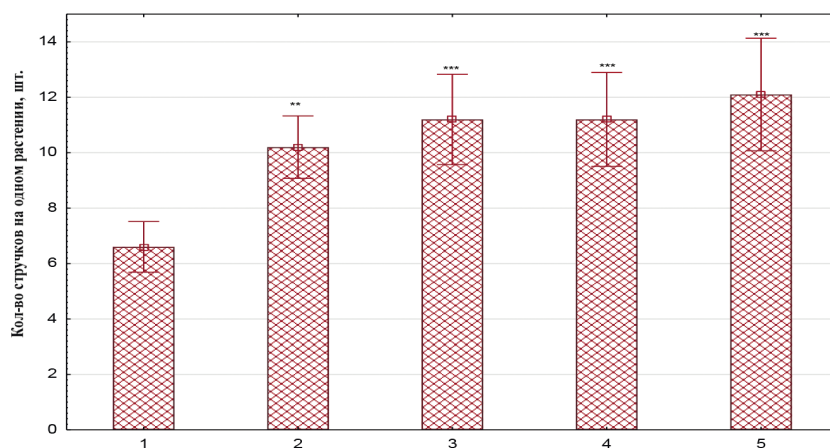


Рис. 3. Влияние обработки растений сои эндофитными бактериями на количество образующихся бобов (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д; 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; 5 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; ** – есть различия при $p < 0,01$; *** – есть различия при $p < 0,001$)

Fig. 3. Effect of treatment of soybean plants with endophytic bacteria on the number of beans formed (1 – control; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *P. brassicearum* BIM B-1228 D; 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G; 5 – *B. japonicum* BIM B-743 + *P. brassicearum* BIM B-1228 D + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G; ** – there are differences at $p < 0.01$; *** – there are differences at $p < 0.001$)

на фоне применения клубеньковых бактерий сои *B. japonicum* БИМ В-743 для стимуляции роста и развития растений сои сорта Верас в агроэкологических условиях Гомельской обл.

Температурный и водный режимы вегетационного периода 2021 г. характеризовались как относительно благоприятные для роста и развития растений сои. В рамках вариантов опыта (1 – контроль, обработка семян водой; 2 – обработка семян КЖ *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – обработка семян КЖ *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г (в соотношении 1 : 1 : 1); 4 – обработка семян КЖ *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г (в соотношении 1 : 0,5 : 0,5)) установлено, что инокуляция семян сои сорта Ясельда эндофитными бактериями позитивно повлияла

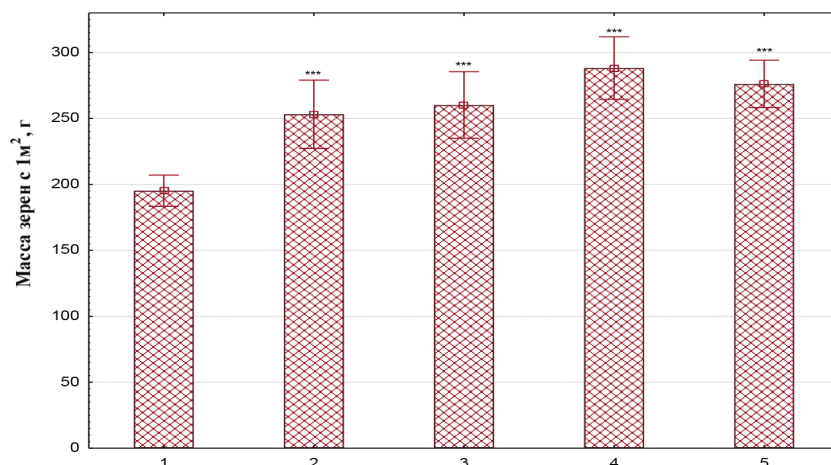


Рис. 4. Влияние обработки растений сои эндофитными бактериями на массу семян с 1 м² (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д; 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; 5 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; *** – есть различия при $p < 0,001$)

Fig. 4. Effect of treatment of soybean plants with endophytic bacteria on the mass of seeds per 1 m² (1 – control; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *P. brassicearum* BIM B-1228 D; 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G; 5 – *B. japonicum* BIM B-743 + *P. brassicearum* BIM B-1228 D + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G; *** – there are differences at $p < 0.001$)

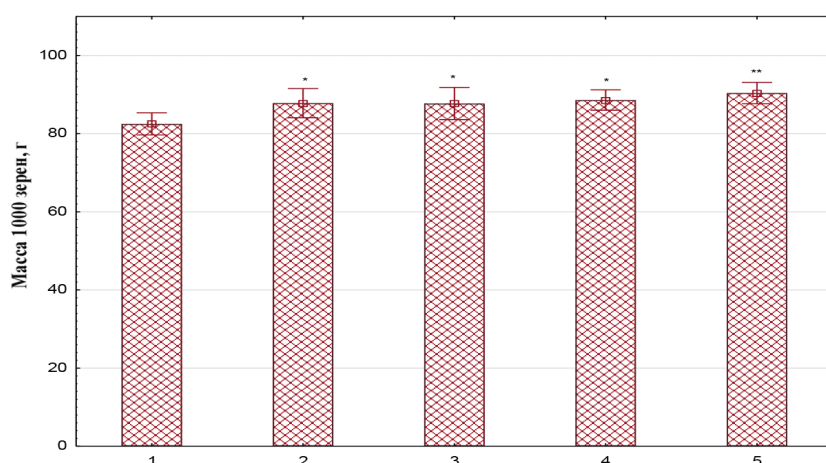


Рис. 5. Влияние обработки растений сои эндофитными бактериями на массу 1 000 семян (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д; 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; 5 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г; * – есть различия при $p < 0,05$; ** – есть различия при $p < 0,01$)

Fig. 5. Effect of treatment of soybean plants with endophytic bacteria on the weight of 1,000 seeds (1 – control; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *P. brassicearum* BIM B-1228 D; 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G; 5 – *B. japonicum* BIM B-743 + *P. brassicearum* BIM B-1228 D + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G; * – there are differences at $p < 0.05$; ** – there are differences at $p < 0.01$)

на рост растений: увеличение их высоты по вариантам составило 8,1; 11,5; 12,7 % соответственно (рис. 6). В вариантах с обработкой семян эндофитами сырая зеленая масса превысила контроль на 16,2; 29,5; 38,9 % соответственно (рис. 7).

Количество бобов на растениях сои сорта Ясельда, семена которых обработаны инокулянтom на основе КЖ эндофитных бактерий, увеличилось по сравнению с контролем на 71,4; 75,9 и 81 % соответственно, а масса 1 000 семян возросла на 8,9; 11,1 и 15,4 % соответственно (рис. 8, 9).

Полученные в 2021 г. результаты свидетельствуют об эффективном применении обработки семян сои сорта Ясельда ризобияльными и неризобияльными эндофитными бактериями на фоне использования сниженной дозы минерального азота на 50 % ($N_{30} P_{90} K_{120}$) по сравнению с фоно-

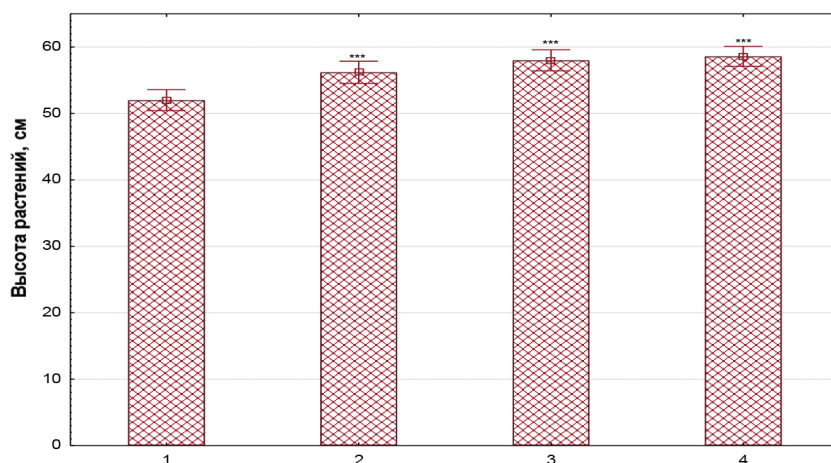


Рис. 6. Влияние инокуляции семян сои сорта Ясельда на высоту растений сои (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д (1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д (1 : 0,5 : 0,5); *** – есть различия при $p < 0,001$)

Fig. 6. Effect of inoculation of 'Yaselda' soybean seeds on soybean plant height (1 – control; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G + *P. brassicearum* BIM B-1228 D (1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G + *P. brassicearum* BIM B-1228 D (1 : 0,5 : 0,5); *** – there are differences at $p < 0.001$)

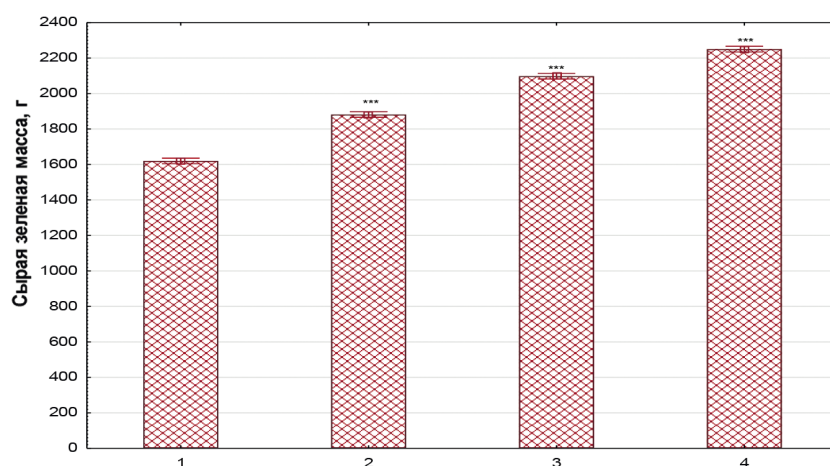


Рис. 7. Влияние инокуляции семян сои эндофитными бактериями на величину сырой зеленой массы (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* БИМ В-743; 3 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д (1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* БИМ В-743 + *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г + *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д (1 : 0,5 : 0,5); *** – есть различия при $p < 0,001$)

Fig. 7. Effect of soybean seed inoculation with endophytic bacteria on the amount of green mass (1 – control; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G + *P. brassicearum* BIM B-1228 D (1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G + *P. brassicearum* BIM B-1228 D (1 : 0,5 : 0,5); *** – there are differences at $p < 0.001$)

вой дозой минеральных удобрений ($N_{60} P_{90} K_{120}$), внесенной в 2020 г. Кроме этого, подтверждается возможность продуктивного применения ризобияльных и неризобияльных эндофитов в соотношении 1 : 0,5 : 0,5, что экономически более выгодно.

Использование для обработки семян ризобияльного штамма азотфиксирующих бактерий *B. japonicum* БИМ В-743 и неризобияльных фосфатсольюбилизирующих и ростстимулирующих *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г и *P. brassicearum* БИМ В-1228 Д эндофитных бактерий в Полесском институте растениеводства на посевах сои сорта Ясельда в условиях опытного поля общей площадью 5 га обеспечило получение годового экономического эффекта (чистый дополнительный доход с 1 га) по зеленой массе – 595 бел. руб. (без НДС), по семенам – 3 120 бел. руб. (без НДС).

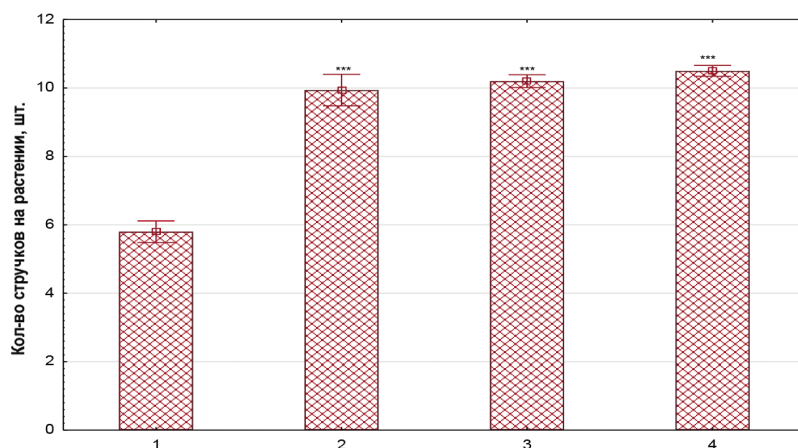


Рис. 8. Влияние инокуляции семян сои эндофитными бактериями на количество образующихся бобов (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 Г + *P. brassicearum* BIM B-1228 Д (1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 Г + *P. brassicearum* BIM B-1228 Д (1 : 0,5 : 0,5); *** – есть различия при $p < 0,001$)

Fig. 8. Effect of soybean seeds inoculation with endophytic bacteria on the number of beans formed (1 – control; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G + *P. brassicearum* BIM B-1228 D (1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G + *P. brassicearum* BIM B-1228 D (1 : 0,5 : 0,5); *** – there are differences at $p < 0.001$)

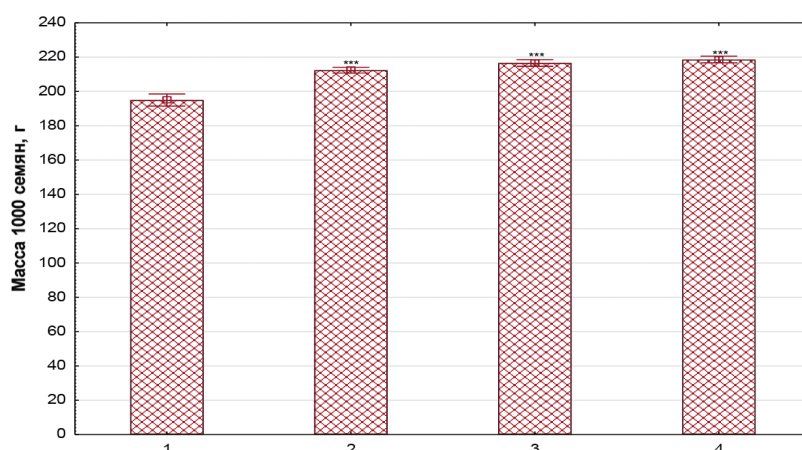


Рис. 9. Влияние инокуляции семян сои сорта Ясельда эндофитными бактериями на массу 1 000 семян (1 – контроль; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 Г + *P. brassicearum* BIM B-1228 Д (1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 Г + *P. brassicearum* BIM B-1228 Д (1 : 0,5 : 0,5); *** – есть различия при $p < 0,001$)

Fig. 9. Effect of 'Yaselda' soybean seeds inoculation with endophytic bacteria on the mass of 1,000 seeds (1 – control; 2 – *B. japonicum* BIM B-743; 3 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G + *P. brassicearum* BIM B-1228 D (1 : 1 : 1); 4 – *B. japonicum* BIM B-743 + *A. tumefaciens* BIM B-1315 G + *P. brassicearum* BIM B-1228 D (1 : 0,5 : 0,5); *** – there are differences at $p < 0.001$)

Поскольку ризобияльные и неризобияльные эндофиты являются естественными представителями микробиоты внутри растений, их использование для обработки семян и вегетирующих растений позволит обеспечить получение экологически чистой продукции и увеличить урожайность сои.

Закключение. Проведенная сравнительная оценка эффективности применения ризобияльных и неризобияльных эндофитных бактерий сои на поле Полесского института растениеводства, расположенного в п. Криничный Мозырского р-на Гомельской обл., показала, что обработка вегетирующих растений сои сорта Верас в фазу образования 1-го тройчатосложного листа стимулирует их рост и развитие. Установлено позитивное влияние эндофитов на вегетирующие растения сои сорта Верас: наблюдалось увеличение зеленой массы (11–34,9 %), массы корней

(13–26,2 %), количества бобов (54,5–83,3 %), массы 1 000 семян (6,4–9,6 %) и массы семян с 1 м² (29,7–47,7 %). Максимальные положительные результаты по всем показателям получены при совместном использовании ризобияльных и неризобияльных эндофитных бактерий.

Предпосевная инокуляция семян сои сорта Ясельда ризобияльными и неризобияльными эндофитными бактериями положительно повлияла на высоту растений (8,1–12,7 %), зеленую массу (16,2–38,9 %), количество бобов (71,4–81 %) и массу 1 000 семян (8,9–15,4 %).

Использование ризобияльных азотфиксирующих бактерий *B. japonicum* БИМ В-743 и неризобияльных фосфатсольбирующих и ростстимулирующих *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г и *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д эндофитных бактерий в Полесском институте растениеводства для обработки семян сои сорта Ясельда обеспечило получение годового экономического эффекта (чистый дополнительный доход с 1 га) по зеленой массе – 595,0 бел. руб. (без НДС), по семенам – 3 120,0 бел. руб. (без НДС).

Полученные данные свидетельствуют о значительном экономическом потенциале использования ризобияльных *B. japonicum* БИМ В-743 и неризобияльных эндофитных бактерий *P. brassicacearum* БИМ В-1228 Д, *A. tumefaciens* БИМ В-1315 Г для стимуляции роста и повышения урожайности сои.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Selective regulation of endophytic bacteria and gene expression in soybean by water-soluble humic materials / W. Wang, D. Li, X. Qiu [et al.] // *Environmental Microbiome*. – 2024. – Vol. 19, N 1. – Art. 2. <https://doi.org/10.1186/s40793-023-00546-1>
2. The Hidden World within Plants: Ecological and Evolutionary Considerations for Defining Functioning of Microbial Endophytes / P. R. Hardoim, L. S. van Overbeek, G. Berg [et al.] // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 2015. – Vol. 79, N 3. – P. 293–320. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00050-14>
3. Inside the Plants: Endophytic Bacteria and their Functional Attributes for Plant Growth Promotion / P. K. Pandey, M. Ch. Singh, S. Singh [et al.] // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 6, N 2. – P. 10–21. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.002>
4. Rosenblueth, M. Bacterial Endophytes and Their Interactions with Hosts / M. Rosenblueth, E. Martínez-Romero // *Molecular Plant-Microbe Interactions*. – 2006. – Vol. 19, N 8. – P. 827–837. <https://doi.org/10.1094/mpmi-19-0827>
5. Metabolic potential of endophytic bacteria / G. Brader, S. Compant, B. Mitter [et al.] // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2014. – Vol. 27, N 100. – P. 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.012>
6. Drought tolerance improvement in plants: an endophytic bacterial approach / A. Ullah, M. Nisar, H. Ali [et al.] // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 103, N 18. – P. 7385–7397. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10045-4>
7. Mayhood, P. Soybean Root Nodule and Rhizosphere Microbiome: Distribution of Rhizobial and Nonrhizobial Endophytes / P. Mayhood, B. S. Mirza // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2021. – Vol. 87, N 10. <https://doi.org/10.1128/aem.02884-20>
8. Генетические основы селекции растений: в 4 т. / А. В. Кильчевский, Л. В. Хотылева, В. А. Ленеш [и др.]; науч. ред. А. В. Кильчевский, Л. В. Хотылева – Мн.: Бел. наука, 2010. – Т. 2: Частная генетика растений. – 578 с.
9. Kyrychenko, O. V. Efficiency of soybean-rhizobium symbioses for seeds inoculated with compositions based on *Rhizobium*, *Azotobacter* and phytolectins. *Biotechnologia Acta* // *Biotechnologia Acta*. – 2019. – Vol. 12, N 2. – P. 79–87. <https://doi.org/10.15407/biotech12.02.079>
10. Co-inoculation of rhizobacteria promotes growth, yield, and nutrient contents in soybean and improves soil enzymes and nutrients under drought conditions / D. Jabbarova, A. Kannepalli, K. Davranov [et al.] // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, N 1. – Art. 22081. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01337-9>
11. Streptomyces N2A, an endophytic actinobacteria that promotes soybean growth and increases yield and seed quality under field conditions / D. L. Villafañe, R. A. Maldonado, J. S. Bianchi [et al.] // *Plant science*. – 2024. – Vol. 343. – Art. 112073. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112073>
12. Эндофитные бактерии сои (*Glycine max*): выделение, физиолого-биохимические свойства и идентификация / З. М. Алешенкова, И. Н. Ананьева, Л. Е. Картыжова [и др.] // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: сб. науч. тр. / НАН Беларуси [и др.]; под ред. Э. И. Коломиец (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2019. – Т. 11. – С. 8–21.

References

1. Wang W., Li D., Qiu X., Yang J., Liu L., Wang E., Yuan H. Selective regulation of endophytic bacteria and gene expression in soybean by water-soluble humic materials. *Environmental Microbiome*, 2024, vol. 19, no. 1, art. 2. <https://doi.org/10.1186/s40793-023-00546-1>
2. Hardoim P. R., van Overbeek L. S., Berg G., Pirttilä A. M., Compant S., Campisano A., Döring M., Sessitsch A. The Hidden World within Plants: Ecological and Evolutionary Considerations for Defining Functioning of Microbial Endophytes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2015, vol. 79, no. 3, pp. 293–320. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00050-14>

3. Pandey P. R., Singh M. C., Singh S., Singh A. K., Kumar M., Pathak M., Shakywar R. C., Pandey A. K. Inside the Plants: Endophytic Bacteria and their Functional Attributes for Plant Growth Promotion. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017, vol. 6, no. 2, pp. 10–21. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.002>
4. Rosenblueth M., Martínez Romero E. Bacterial Endophytes and Their Interactions with Hosts. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2006, vol. 19, no. 8, pp. 827–837. <https://doi.org/10.1094/mpmi-19-0827>
5. Brader G., Compant S., Mitter B., Trognitz F., Sessitsch A. Metabolic potential of endophytic bacteria. *Current Opinion in Biotechnology*, 2014, vol. 2, no. 100, pp. 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2013.09.012>
6. Ullah A., Nisar M., Ali H., Hazrat A., Hayat K., Keerio A. A. [et al.]. Drought tolerance improvement in plants: an endophytic bacterial approach. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, vol. 103, no. 18, pp. 7385–7397. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10045-4>
7. Mayhood P., Mirza B. S. Soybean Root Nodule and Rhizosphere Microbiome: Distribution of Rhizobial and Nonrhizobial Endophytes. *Applied and Environmental Microbiology*, 2021, vol. 87, no. 10. <https://doi.org/10.1128/aem.02884-20>
8. Kil'chevskii A. V., Khotyleva L. V., Lenesh V. A., Yurenkova S. I., Kartel' N. A., Shapturenko M. N. *Genetic bases of plant breeding in 4 volumes. Vol. 2. Special genetics of plants*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 578 p. (in Russian).
9. Kyrychenko O. V. Efficiency of soybean-rhizobium symbioses for seeds inoculated with compositions based on *Rhizobium*, *Azotobacter* and phytolectins. *Biotechnologia Acta*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 79–87. <https://doi.org/10.15407/biotech12.02.079>
10. Jabborova D., Kannepalli A., Davranov K., Narimanov A., Enakiev Y., Syed A., Elgorban A. M., Bahkali A. H., Wirth S., Sayyed R. Z., Gafur A. Co-inoculation of rhizobacteria promotes growth, yield, and nutrient contents in soybean and improves soil enzymes and nutrients under drought conditions. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, art. 22081. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01337-9>
11. Villafañe D. L., Maldonado R. A., Bianchi J. S., Kurth D., Gramajo H., Chiesa M. A., Rodríguez E. Streptomyces N2A, an endophytic actinobacteria that promotes soybean growth and increases yield and seed quality under field conditions. *Plant science*, 2024, vol. 343, art. 112073. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112073>
12. Aleshchenkova Z. M., Anan'eva I. N., Kartyzhova L. E., Shaveiko I. V., Klishevich N. G. Endophytic bacteria of soybean culture (*Glycine Max*): isolation, physiological-biochemical characterization and identification. *Mikrobnye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty: sbornik nauchnykh trudov* [Microbial biotechnology: fundamental and applied aspects: collection of scientific papers]. Minsk, 2019, vol. 11, pp. 8–21 (in Russian).

Информация об авторах

Шавейко Ирина Валерьевна – аспирант (соискатель), директор по развитию ООО «Фермент» (пер. Лермонтова, 2а/1, д. Флерьяново, Ляховичский р-н, Брестская обл., 225373, Республика Беларусь). E-mail: irinkasemenovaa@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0007-2738-7291>

Алещенкова Зинаида Михайловна – д-р биол. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: zaleschenkova@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0006-8620-4427>

Ананьева Ирина Николаевна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 2, 220084, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ananeva@mbio.bas-net.by. <https://orcid.org/0009-0007-4837-2259>

Коротков Михаил Михайлович – заведующий лабораторией. Полесский институт растениеводства (ул. Школьная, 2, 247781, аг. Криничный, Мозырский р-н, Гомельская обл., Республика Беларусь). E-mail: mzpolf@mail.gomel.by.

Короткова Оксана Викторовна – старший научный сотрудник. Полесский институт растениеводства (ул. Школьная, 2, 247781, аг. Криничный, Мозырский р-н, Гомельская обл., Республика Беларусь). E-mail: mzpolf@mail.gomel.by

Information about the authors

Irina V. Shaveiko – Postgraduate Student (Applicant), Director of Development, Ferment LLC (2a/1, Lermontov Lane, d. Fleryanovo, Lyakhovich District, Brest Region, 225373, Republic of Belarus). E-mail: irinkasemenovaa@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0007-2738-7291>

Zinaida M. Aleschenkova – D. Sc. (Biol.), Professor, Chief Researcher. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zaleschenkova@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0006-8620-4427>

Irina N. Ananyeva – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ananeva@mbio.bas-net.by. <https://orcid.org/0009-0007-4837-2259>

Mikhail M. Korotkov – Head of the Laboratory. Polesie Institute of Plant Growing (2, Shkolnaya Str., 247781, ag. Krinichny, Mozyr District, Gomel Region, Republic of Belarus). E-mail: mzpolf@mail.gomel.by

Oksana V. Korotkova – Senior Researcher. Polesie Institute of Plant Growing (2, Shkolnaya Str., 247781, ag. Krinichny, Mozyr District, Gomel Region, Republic of Belarus). E-mail: mzpolf@mail.gomel.by