

Научная статья  
УДК 574.24, 579.26, 579.64  
doi: 10.17223/19988591/71/4

## Изучение потенциала штаммов *Pseudomonas protegens* А-СМС-05 и *Gordonia paraffinivorans* А-СМС-11 для использования в сельскохозяйственной биотехнологии

Анастасия Николаевна Сысоева<sup>1</sup>, Мария Денисовна Ивасенко<sup>2</sup>,  
Денис Александрович Ивасенко<sup>3</sup>, Анна Леонидовна Герасимчук<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, Россия

<sup>1, 2, 3</sup> ООО «Дарвин», Томск, Россия

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0000-3716-3338>, [nastena.sysoeva.97@bk.ru](mailto:nastena.sysoeva.97@bk.ru)

<sup>2</sup> [ivaskenko.mary@mail.ru](mailto:ivaskenko.mary@mail.ru)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7132-182X>, [ivaskenko.da@mail.ru](mailto:ivaskenko.da@mail.ru)

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2945-2364>, [gerasimchuk\\_ann@mail.ru](mailto:gerasimchuk_ann@mail.ru)

**Аннотация.** В статье приведены результаты экспериментов по изучению стимулирования роста растений и биопротекторных свойств изолятов из сточных вод городских очистных сооружений *Pseudomonas protegens* и *Gordonia paraffinivorans*. Исследовали ингибирующую активность штаммов *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11 по отношению к фитопатогенному грибу *Fusarium equiseti*. Ингибирование радиального роста мицелия составило от 11% до 13% для штамма А-СМС-11 и от 36% до 67% для штамма А-СМС-05. Показано, что штамм А-СМС-05 обладает выраженными свойствами, способствующими ризогенезу у эксплантов барбариса (*Berberis thunbergii* Aurea). В опытах с проращиванием семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) не обнаружено какого-либо влияния штаммов *G. paraffinivorans* А-СМС-11 и *P. protegens* А-СМС-05, в том числе в составе консорциума, на всхожесть семян. Однако выявлены статистически значимые ( $p < 0,05$ ) отличия по признаку длины проростков и корней пшеницы при обработке семян штаммами *G. paraffinivorans* А-СМС-11 и *P. protegens* А-СМС-05 соответственно. Обработка эксплантов малины (*Rubus idaeus* L.) культуральной жидкостью штамма А-СМС-05 способствовала увеличению средней длины побегов по сравнению с отрицательным и положительным контролями на 40% и на 73% соответственно. Использование штаммов в составе консорциума не показало значимых результатов. Для штамма *P. Protegens* А-СМС-05 выявлены более высокие показатели по всем исследованным характеристикам, таким как эффективность ингибирования фитопатогена и процент эксплантов с признаками ризогенеза.

**Ключевые слова:** микроорганизмы – продуценты биоактивных веществ, ингибирование роста фитопатогенных микроорганизмов, стимулирование роста растений, ризогенез

**Источник финансирования:** исследование выполнено при поддержке Гранта № 075-15-2022-1152 (Постановление № 619 от 8 апреля 2022 г.).

**Для цитирования:** Сысоева А.Н., Ивасенко М.Д., Ивасенко Д.А., Герасимчук А.Л. Изучение потенциала штаммов *Pseudomonas protegens* А-СМС-05 и *Gordonia paraffinivorans* А-СМС-11 для использования в сельскохозяйственной биотехнологии // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 80–100. doi: 10.17223/19988591/71/4

## Study of the potential of *Pseudomonas Protegens* A-CMC-05 and *Gordonia Paraffinivorans* A-CMC-11 strains for use in agricultural biotechnology

Anastasya N. Sysoeva<sup>1</sup>, Marya D. Ivashenko<sup>2</sup>, Denis A. Ivashenko<sup>3</sup>, Anna L. Gerasimchuk<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>1, 2, 3</sup> Darwin Ltd., Tomsk, Russian Federation

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0000-3716-3338>, [nastena.sysoeva.97@bk.ru](mailto:nastena.sysoeva.97@bk.ru)

<sup>2</sup> [ivashenko.mary@mail.ru](mailto:ivashenko.mary@mail.ru)

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7132-182X>, [ivashenko.da@mail.ru](mailto:ivashenko.da@mail.ru)

<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2945-2364>, [gerasimchuk\\_ann@mail.ru](mailto:gerasimchuk_ann@mail.ru)

**Summary.** Excessive use of chemical fertilizers has led to various negative consequences such as accumulation of harmful elements in the soil, groundwater pollution, reduction of soil organic matter content and fertility, and deterioration of soil physical and chemical properties. In recent years, special attention has been paid to the industrial potential of microorganisms for use as biological fertilizers, their ability to improve nutrient availability, enhance plant growth and productivity, and protect the environment from negative impacts. A large group of soil bacteria has been shown to have a positive effect on plant growth, which is associated with such properties as increased availability of mineral nutrition elements for plants, production of metabolites with hormonal and signaling functions (auxins, cytokinins, gibberellins, abscisic, salicylic and jasmonic acids), induction of mechanisms of systemic resistance to stresses of abiotic and biotic nature. *Bacillus* and *Pseudomonas* are among the most studied and widely used producers of bacterial enzymes and destructors of organic compounds, as well as plant growth-promoting bacteria and antagonists of plant pathogens.

In the present study, the growth-stimulating and bioprotective properties of strains *Pseudomonas protegens* A-CMC-05 and *Gordonia paraffinivorans* A-CMC-11, which we had isolated earlier from municipal wastewater treatment plants in Surabaya, Indonesia, were investigated. The representatives of *Pseudomonas* and *Gordonia* are widely distributed in nature and are actively studied due to their ability to deconstruct, transform and synthesize organic compounds. *P. protegens* is known as a plant growth-promoting rhizobacterium. No published data were found for *G. paraffinivorans* to investigate their potential as plant growth stimulators or biocontrol properties, but such works are available for other members of the genus *Gordonia*.

The inhibitory activity of strains *P. protegens* A-CMC-05 and *G. paraffinivorans* A-CMC-11 against the phytopathogenic fungus of the genus *Fusarium*, representatives of which are often associated with severe crown and root rot diseases of wheat, was investigated. When *Fusarium equiseti* D1 was co-cultured in the presence of each of the bacterial strains, changes in the morphology of the fungal mycelium and inhibition of the growth zone were observed (See Fig. 1A). When the fungal fragment was inoculated onto freshly grown bacterial turf, the inhibitory activity of *P. protegens* A-CMC-05 was as prominent, whereas strain *G. paraffinivorans* A-CMC-11 showed less pronounced antagonism (see Fig. 1B). In the third cultivation variant, which consisted of inoculating the fungal mycelium into the center of the Petri dish at the same distance (3.5 cm) between two bacterial growth zones (0.7-0.8 mm in diameter), in the presence of the *Pseudomonas* sp. strain A-CMC-05, a more noticeable inhibition of mycelial growth was also observed than in the presence of the *Gordonia* sp. strain A-CMC-11 (See Fig. 1C). Inhibition of radial mycelial growth ranged from 11% to

13% for strain A-CMC-11 and from 36% to 67% for strain A-CMC-05. In addition to inhibition of the growth zone, strain A-CMC-05 inhibited the development of aerial hyphae of *Fusarium equiseti* D1, only weak growth in the depth of the agarized medium was observed (See Table 1).

An experiment was conducted to study the growth-stimulating properties promoting rhizogenesis of unrooted explants of barberry of Thunberg (*Berberis thunbergii* Aurea), selected as an object for research (See Fig. 2). As a result, rhizogenesis processes were observed in 12.1% of explants planted in sterile soil treated with the culture liquid solution of strain A-CMC-05. In the experiment with strain A-CMC-11, root formation was detected in 7.5% of explants. In the control experiment with the addition of the Kornevin commercial preparation based on 4(indol-3yl)butyric acid (IBA) the efficiency of rhizogenesis was 15%. Analysis of the obtained results indicates that strain A-CMS-05 has pronounced properties promoting rhizogenesis in barberry plants used as an object of research and its efficiency in stimulating rhizogenesis is comparable to the efficiency of the preparation based on IBA. In subsequent experiments, in addition to the effect of strains A-CMC-05 and A-CMC-11 individually, their effect on plant growth and rhizogenesis in the consortium was investigated. In experiments with germination of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds in sterile soil, strains of *G. paraffinivorans* A-CMC-11 and *P. protegens* A-CMC-05, including as part of a consortium, had no effect on seed germinability (See Fig. 3A). At the same time, the formation of a denser earth clod at the roots of wheat seedlings in the experiments with each of the strains and as part of the consortium compared to the control was noted (See Fig. 3B). Statistically significant differences were also revealed between the lengths of seedlings when seeds were treated with *G. paraffinivorans* A-CMC-11 and the lengths of wheat roots under the influence of *P. protegens* A-CMC-05 (See Fig. 4). The use of strains as part of a consortium showed no significant results. Additionally, the effect of bacterial strains and consortium on rooting efficiency and shoot length in raspberry (*Rubus idaeus* L.) explants of "Cassiopeia" variety was investigated (See Fig. 5). In contrast to the experiment with barberry explants, no positive effect of individual strains or their consortium on rhizogenesis processes in raspberry was found. Moreover, the efficiency of root formation by the number of rooted explants was the most significant in the negative control without any soil or explants treatment and amounted to 87% (See Fig. 5A). We did not analyze root and shoot masses except for visual assessment. The total root mass in experimental and control experiments could differ and, among other things, affect the average shoot mass, which visually increased after treatment with culture liquid of the strains and consortium due to a wider leaf plate (See Fig. 6). In addition, treatment of explants with the culture fluid of *P. protegens* A-CMC-05 increased the average shoot length by 40% compared with the negative control and by 73% compared with the positive control (See Fig. 5B). The studies demonstrated the potential of *P. protegens* A-CMC-05 and *G. paraffinivorans* A-CMC-11 as biocontrol agents and plant growth stimulators. *P. protegens* A-CMC-05 showed more pronounced results and is a more promising agent for further studies of growth-stimulating and bioprotective properties.

The article contains 6 Figures, 1 Table, 40 References.

**Keywords:** microorganisms - producers of bioactive substances, growth inhibition of phytopathogenic microorganisms, plant growth stimulation, rhizogenesis

**Fundings:** the study was supported by Grant No. 075-15-2022-1152 (Resolution No. 619 of April 8, 2022).

**For citation:** Sysoeva AN, Ivasenko MD, Ivasenko DA, Gerasimchuk AL. Study of the potential of *Pseudomonas Protegens* A-CMC-05 and *Gordonia Paraffinivorans* A-CMC-11 strains for use in agricultural biotechnology. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology.* 2025;71:80-100. doi: 10.17223/19988591/71/4

## **Введение**

Одной из важных задач агропромышленного комплекса (АПК) является необходимость производства всё большего количества продуктов питания для удовлетворения растущего спроса населения. Кроме того, сельское хозяйство сталкивается с проблемами последствий загрязнения окружающей среды, такими как изменение климата и нехватка воды, которые снижают урожайность сельскохозяйственных культур. Чрезмерное использование химических удобрений привело к различным негативным последствиям, таким как накопление вредных элементов в почве, загрязнение грунтовых вод, снижение содержания органического вещества в почве и ее плодородия вместе с ухудшением физических и химических свойств почвы [1]. Таким образом, современное сельскохозяйственное производство в различных странах мира сталкивается с необходимостью решения сразу двух важнейших проблем, а именно защиты сельскохозяйственных культур от вредителей, болезней и сорняков и защиты окружающей среды от техногенного загрязнения [2].

В последние годы особое внимание уделяется промышленному потенциалу микроорганизмов для использования в качестве биологических удобрений, их способности улучшать доступность питательных веществ, усиливать рост и продуктивность растений и защищать окружающую среду от негативных воздействий [3, 4]. Для большой группы почвенных бактерий показано положительное влияние на рост и развитие растений, что связывают с такими свойствами, как повышение доступности для растений элементов минерального питания, продукция метаболитов с гормональными и сигнальными функциями (ауксины, цитокинины, гиббереллины, абсцизовая, салициловая и жасмоновая кислоты), индукция механизмов системной устойчивости к стрессам абиотической и биотической природы [5, 6]. Помимо этого, некоторые ростостимулирующие микроорганизмы могут обладать и свойствами биоконтроля, подавляя рост фитопатогенов с помощью производства антимикробных соединений или конкуренции за экологические ниши или питательные ресурсы. Изучение потенциала таких микроорганизмов и их применение в устойчивом сельском хозяйстве в качестве альтернатив химическим удобрениям и пестицидам будет способствовать улучшению состояния окружающей среды и повышению производительности сельского хозяйства [7].

Во всем мире биостимуляторы роста на основе бактерий все шире используют в растениеводстве для увеличения урожайности растений [8]. Однако несмотря на достаточно широкий ассортимент присутствующих на рынке препаратов на основе живых бактерий для защиты и регуляции роста растений, их применение занимает лишь небольшую долю в сельскохозяйственной отрасли. Одной из основных причин, ограничивающих применение таких биопрепаратов, может являться недостаточное изучение механизмов, обеспечивающих биопротекторные (обеспечивающие фунгицидный эффект в отношении фитопатогенных грибов) и ростостимулирующие свойства микроорганизмов разнообразных филогенетических групп, а также изменяющиеся свойства инокулированных в почву микроорганиз-

мов, которые могут влиять на производство сельскохозяйственных культур. Успешное использование микробных биостимуляторов зависит от их выживаемости в почве, способности взаимодействия с местными микроорганизмами в почве и факторами окружающей среды [9, 10]. Также эффективные микроорганизмы должны усиливать возможности роста растений, иметь широкий спектр действия, быть безопасными для окружающей среды, быть устойчивыми к разнообразным температурным воздействиям, УФ-излучению и иным факторам [11]. Учитывая всё вышеперечисленное, необходимость в разработке новых биоудобрений на основе ростостимулирующих бактерий остается актуальной.

Целью настоящего исследования явилось изучение ростостимулирующих и биопротекторных свойств двух штаммов бактерий, *Pseudomonas protegens* А-СМС-05 и *Gordonia paraffinivorans* А-СМС-11, обладающих липолитическими свойствами и являющихся деструкторами широкого круга органических веществ.

### Материалы и методы

Штаммы бактерий *Pseudomonas protegens* А-СМС-05 (VKM В-3844D) и *Gordonia paraffinivorans* А-СМС-11 (VKM Ас-3071D) культивировали на среде PCA (plate count agar) и агаризованной или жидкой среде на основе гидролизата рыбной муки (ГРМ). Влияние штаммов бактерий на рост по отношению друг к другу определяли с помощью посевов на агаризованную питательную среду методом перекрестных штрихов. На середину чашки от одного края до другого наносили полоску бактериального инокулята одного штамма и инкубировали при 28°C в течение ночи. Далее наносили на чашку полосу инокулята второго штамма, перпендикулярно выросшему бактериальному штамму. Еще через сутки инкубирования при 28°C проверяли зону роста второго штамма и определяли наличие или отсутствие ингибирования одного штамма другим. Посевы проводили в двух повторностях с обоими вариантами перекрестных штрихов.

Ингибирующий эффект штаммов А-СМС-05 и А-СМС-11 на рост и развитие фитопатогенных микроорганизмов исследовали на тест-штамме *Fusarium equiseti* D1. Эксперимент проводили на среде с мальтозным экстрактом (МЭ: мальтозный экстракт – 30 г/л; пептон – 5 г/л; агар – 15 г) с добавлением 1 мл стокового раствора микроэлементов ( $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$  – 5 г/л;  $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  – 1 г/л) и PCA (plate count agar). Использовали три разных подхода к культивированию при проведении эксперимента. В первом варианте с совместным культивированием высевали на чашки с агаризованной средой 0,1 мл свежей жидкой бактериальной культуры и равномерно распределяли по поверхности агара. Далее на инокулированные бактериями чашки помещали два агаровых блока свежесвыращенного грибного мицелия на расстоянии друг от друга не менее 3 см. Во втором варианте эксперимента проводили посев жидкой бактериальной культуры на чашку Петри (0,1 мл суспензии клеток с концентрацией не менее  $10^8$  кл/мл), через 1 сутки инкубирования при 28°C на поверхность агара помещали два фрагмента мицелия, как описано выше. Третий вариант культивирова-

ния заключался в следующем: 3 мкл жидкой бактериальной культуры ( $10^8$  кл/мл) инокулировали с двух противоположных сторон чашки Петри с КДА (картофельно-декстрозный агар: картофель – 200 г/л, глюкоза – 20 г/л; агар – 15 г/л) на равном расстоянии от центра (не менее 3 см) и культивировали при 28°C в течение 24 ч; после в центр чашки Петри помещали агаровый блок мицелия диаметром 5 мм. Культивирование всех вариантов эксперимента в трех независимых повторностях проводили в течение 5 суток. Далее измеряли диаметр грибного мицелия в контрольных и экспериментальных чашках и рассчитывали ингибирующий эффект бактериальных штаммов по описанной ранее формуле [12].

Эксперимент по влиянию метаболитов культуральной жидкости штаммов *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11 на всхожесть семян пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.) проводили по следующей схеме: семена пшеницы вымачивали 1 ч в свежей жидкой культуре каждого штамма (не менее  $10^8$  кл/мл) по отдельности и культуральной жидкости консорциума из двух штаммов, затем высевали в стерильную почву. Параллельно проводили контрольный посев необработанных семян. Эксперимент проводили в стерильных пластиковых парниках с прозрачными крышками с режимом инсоляции день-ночь (16 : 8) в течение 8 сут. Для каждого варианта эксперимента, включая контрольный, использовали три биологических повторности по 100 семян пшеницы в каждой. В конце эксперимента определяли процент всхожести семян, а также анализировали длину корней и проростков.

Эксперимент по стимулированию процессов ризогенеза у растений метаболитами, образуемыми штаммами бактерий, проводили с использованием эксплантов барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii* Auceps). Полученные микрклональным размножением экспланты барбариса без признаков ризогенеза были высажены в стерильную почву, обработанную раствором (150 мл раствора на 2 л почвы) культуральной жидкости штаммов *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11 с концентрацией  $10^8$  кл/мл. Проводили отдельный эксперимент для каждого штамма. В каждом эксперименте было использовано 66 эксплантов барбариса. В контрольном эксперименте экспланты высаживались в стерильную почву без какой-либо обработки. Дополнительный контрольный эксперимент включал обработку эксплантов (опудривание) регулятором роста растений (препарат «Корневин», содержащий 4(индол-3ил)масляную кислоту (ИМК) в качестве действующего вещества), а также внесение жидкой формы биопрепарата на основе спор (в конечной концентрации  $10^6$  на мл) и мицелия гриба *Trichoderma virens* 6 (производитель ООО «Дарвин», г. Томск) для подавления развития нежелательных микроорганизмов. Эксперимент проводили при комнатной температуре на протяжении 5 недель. Первые 2 недели контейнеры с эксплантами были закрыты герметичными прозрачными крышками для поддержания высокой влажности и адаптации эксплантов. Далее в течение 3 недель влажность постепенно снижали за счет нарушения герметичности крышек. После испарения всей влаги растения извлекали из почвы и проводили подсчет эксплантов с признаками ризогенеза.

Для последующего исследования ростостимулирующих свойств штаммов, включая образование корней и длину побегов, выбраны экспланты малины (*Rubus idaeus* L.) сорта «Кассиопея». Экспланты без признаков ризогенеза были высажены в стерильную почву, как описано выше. Во всех трех вариантах эксперимента, а именно с обработкой культуральной жидкостью штамма *P. protegens* А-СМС-05, штамма *G. paraffinivorans* А-СМС-11 и консорциума из двух штаммов, использовали по 70 эксплантов малины. В контрольных экспериментах высаживали экспланты в стерильную почву без какой-либо обработки и с обработкой препаратом «Корневин». Продолжительность и условия проведения эксперимента с эксплантами малины совпадали с описанным выше с участием барбариса. Однако в данном случае по завершении эксперимента оценивали не только число эксплантов с признаками ризогенеза, но и длину побегов.

Статистическую обработку полученных данных проводили с применением непараметрического U-критерия Манна–Уитни. Отличия считали значимыми при  $p \leq 0,05$ .

### Результаты исследования и обсуждение

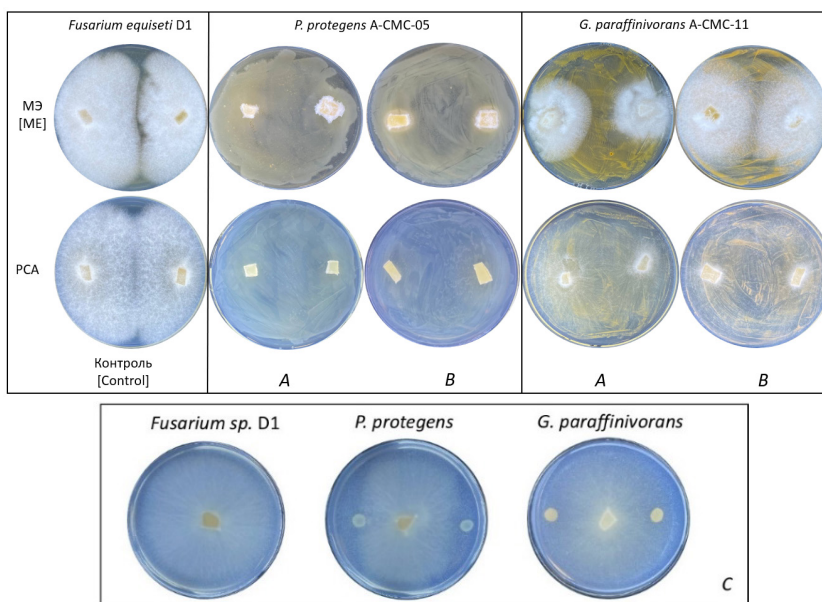
В исследовании использовали штаммы бактерий, выделенные нами ранее из городских очистных сооружений г. Сурабая (Индонезия) и идентифицированные на основе молекулярно-биологического анализа как *Pseudomonas protegens* А-СМС-05 (VKM В-3844D) и *Gordonia paraffinivorans* А-СМС-11 (VKM Ас-3071D) (данные не опубликованы). Исследуемые штаммы относятся к филогенетически удаленным друг от друга таксонам (Gammaproteobacteria и Actinomycetia соответственно) и представляют интерес как потенциальные агенты для использования в различных экологических и сельскохозяйственных биотехнологиях. Представители *Pseudomonas* и *Gordonia* широко распространены в природе и активно изучаются благодаря своей способности разлагать, преобразовывать и синтезировать органические соединения [13, 14]. *P. protegens* известен как стимулирующая рост растений ризобактерия [15]. Для *G. paraffinivorans* не обнаружено опубликованных данных об исследовании их потенциала в качестве стимуляторов роста растений или свойств биоконтроля, однако подобные работы есть для других представителей рода *Gordonia* [16].

Исследовали ингибирующую активность штаммов *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11 по отношению к фитопатогенному грибу рода *Fusarium*, штамм D1, выделенному нами ранее из пораженных фузариозом растений клубники. *Fusarium* D1 по анализу гена ITS (номер доступа GenBank NCBI PV390695) относится к *Fusarium equiseti*, представителю комплекса видов *Fusarium incarnatum-equiseti*, который является патогеном для разнообразных растений [17, 18].

*Fusarium* spp., широко распространенный мицелиальный гриб, встречающийся в почве и растениях, многие виды которого являются важными патогенами растений [19, 20], влияют на качество урожая и приводят к порче продуктов питания [21], а также оказывают значительное влияние на здоровье человека и животных [22, 23].

При совместном культивировании *F. equiseti* D1 в присутствии каждого из бактериальных штаммов наблюдали ингибирование зоны роста мицелия (рис. 1А). При инокулировании фрагмента гриба на свежесвыросший бактериальный газон ингибирующая активность штамма *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 была такой же заметной, тогда как для штамма *Gordonia* sp. А-СМС-11 наблюдали менее выраженный антагонизм (рис. 1В). При третьем варианте культивирования, который заключался в инокулировании грибного мицелия в центр чашки Петри на одинаковом расстоянии (3,5 см) между двумя бактериальными зонами роста (диаметром 0,7–0,8 мм), в присутствии штамма *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 также наблюдали более заметное ингибирование роста мицелия, чем в присутствии штамма *Gordonia* sp. А-СМС-11 (рис. 1С).

Ингибирование радиального роста мицелия на среде для микромицетов составило 11–13% для штамма А-СМС-11 и от 36% до 67% для штамма А-СМС-05. Для штамма А-СМС-11 отмечено наибольшее ингибирующее воздействие на мицелий (до 57%) при культивировании на среде РСА, предназначенной для культивирования бактерий и подсчета колоний.



**Рис. 1.** Подавление роста *Fusarium equiseti* D1 при разных вариантах культивирования на средах с мальтозным экстрактом (МЭ) и РСА (А – совместное культивирование; В – инокулирование грибного мицелия на выросший бактериальный газон; С – инокулирование мицелия между двумя бактериальными зонами роста) в присутствии штаммов *Gordonia* sp. А-СМС-11 и *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 при 28°C в течение 5 суток

[Fig. 1 Inhibition of *Fusarium equiseti* D1 growth under different cultivation conditions on media with maltose extract (ME) and PCA (A - co-cultivation; B - inoculation of fungal mycelium onto the grown bacterial lawn; C - inoculation of mycelium between two bacterial growth zones) in the presence of strains *Gordonia* sp. А-СМС-11 and *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 strains at 28°C for 5 days]



Помимо ингибирования зоны роста, штамм А-СМС-05 препятствовал развитию воздушных гиф фузариума, наблюдали лишь слабый рост в глубине агаризованной среды (табл. 1).

Ранее продемонстрировано ингибирование роста мицелия *Fusarium equiseti*, выделенного из больных стеблей и корней перца хабанеро, почвенными штаммами *Paenibacillus* sp. и *Bacillus* spp. как при совместном культивировании (до 66%), так и при использовании бесклеточных фильтратов (до 69%) [24]. В другом исследовании для ризосферных штаммов *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. subtilis* и *B. mojavensis* показана высокая степень снижения фузариозного увядания у *Vicia faba*, вызванного

Таблица 1 [Table 1]

**Ингибирование роста *Fusarium equiseti* D1 при культивировании в присутствии штаммов *Gordonia* sp. А-СМС-11 и *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 [Inhibition of *Fusarium equiseti* D1 growth when cultivated in the presence of *Gordonia* sp. А-SMS-11 and *Pseudomonas* sp. А-SMS-05 strains]**

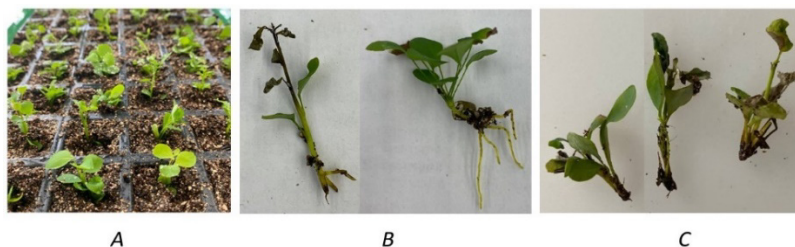
Наименование штамма-антагониста [Name of antagonist strain]	Мицелий [Mycelium]	Ингибирование роста мицелия, % [Inhibition of mycelium growth, %]				
		Совместное культивирование [Co-cultivation]		Инокулирование грибного мицелия на бактериальный газон [Inoculation of fungal mycelium on bacterial lawn]		Инокулирование мицелия между двумя бактериальными зонами роста [Inoculation of mycelium between two bacterial growth zones]
		МЭ [malt extract]	РСА	МЭ [malt extract]	РСА	
<i>Pseudomonas protegens</i> А-СМС-05	Воздушные гифы [Aerial hyphae]	83,8 ± 4,1	100	82,7 ± 3,4	100	39,0 ± 2,4
	Глубинный мицелий [Deep mycelium]	36,1 ± 1,2	35,0 ± 7,3	67,66 ± 6,7	34,9 ± 5,5	Не наблюдали [Not observed]
<i>Gordonia paraffinivorans</i> А-СМС-11	Воздушные гифы [Aerial hyphae]	23,8 ± 9,1	16,8 ± 1,4	11,4 ± 0,0	57,3 ± 2,3	13,0 ± 7,4
	Глубинный мицелий [Deep mycelium]	10,5 ± 9,1	Не наблюдали [Not observed]	Не наблюдали [Not observed]	Не наблюдали [Not observed]	Не наблюдали [Not observed]

*F. equiseti*, в тепличных условиях [25]. Помимо *Bacillus* и родственных ему видов показана фунгицидная активность для штамма *Chryseobacterium rhizophlanae* 1М и его метаболитов, ацетоина и 2,3-бутанедиола, в отношении возбудителей фузариоза маша (*Vigna radiata*), среди которых был *Fusarium equiseti* [26].

Фунгицидная активность штаммов *Pseudomonas protegens* относительно представителей рода *Fusarium* также была показана ранее другими исследователями [27]. При этом в одной из опубликованных работ продемонстрировано отсутствие ингибирующей активности у двух штаммов *P. protegens* в отношении грибов рода *Fusarium*, тогда как для других фитопатогенных грибов фунгицидная активность присутствовала [28]. Информации об исследованиях ингибирующей активности штаммов *Gordonia* против фитопатогенных грибов нами не обнаружено.

Бактериальные антагонисты фитопатогенных грибов, как и стимулирующие рост растений бактерий, обычно выделяют из почв и корней растений как основного местообитания ризобактерий. В отдельных работах описывается выделение способствующих росту растений бактерий из орошаемых сточными водами сельскохозяйственных почв [29, 30] и других типов почв, подверженных антропогенному влиянию [31]. Однако некоторые исследования продемонстрировали, что микроорганизмы, выделенные из других экологических ниш, таких как водная среда (морская вода, питьевая вода), также эффективно подавляли рост патогенов и способствовали росту растений [32, 33]. Кроме того, продемонстрирован эффект стимулирования роста растений и защиты растений от патогенов рода *Fusarium* spp бактериями, выделенными из очистных сооружений сточных вод [34]. Авторами показано ингибирующее действие бактерий родов *Pseudomonas*, *Proteus* на рост *Fusarium culmorum* и *Fusarium graminearum* и наличие свойств, стимулирующих рост растений. Также авторы данной работы предполагают, что у ризосферных и неризосферных бактерий могут отличаться механизмы, ответственные за противогрибковые свойства. Этими же авторами показано, что бактерии могут переноситься из ризосферы одного вида растений в ризосферу другого вида растений без потери их свойств, способствующих росту растений [35], что подтверждает возможный потенциал разных бактерий в стимулировании роста разнообразных растений.

Помимо исследования потенциала штаммов в качестве агентов биоконтроля, проведен эксперимент по изучению ростостимулирующих свойств, а именно синтеза биоактивных веществ, способствующих ризогенезу эксплантов барбариса (рис. 2). Для представителей разных видов барбариса сообщается о сложностях с укоренением и введением в культуру при микроклональном размножении [36, 37], чем и обоснован выбор декоративного кустарника барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii* Auzera) в качестве объекта для исследований. В итоге у 12,1% эксплантов, высаженных в стерильную почву, обработанную раствором культуральной жидкости штамма А-СМС-05, наблюдали процессы ризогенеза. В эксперименте со штаммом А-СМС-11 образование корней выявлено у 7,5% эксплантов. В контрольном эксперименте с добавлением коммерческого препарата



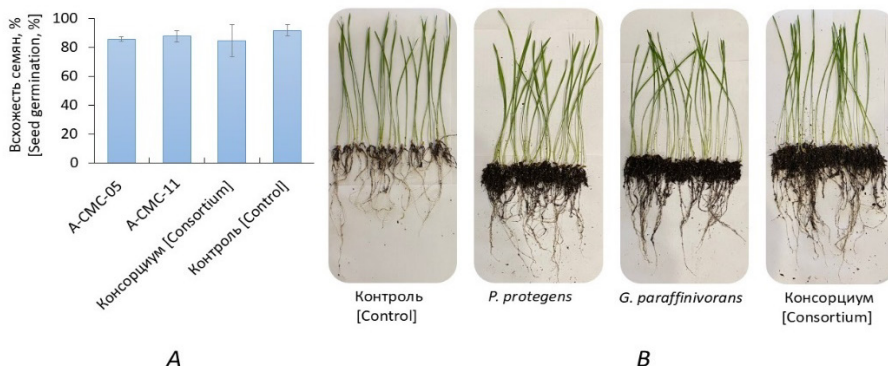
**Рис. 2.** Эксперимент по стимулированию корнеобразования у эксплантов барбариса штаммами *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11: внешний вид эксплантов барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii Aurea*) в начале эксперимента (А); экспланты с корнями в конце эксперимента (В); экспланты без признаков ризогенеза в конце эксперимента (С)

[**Fig. 2.** Experiment on stimulation of root formation in barberry explants by strains *P. protegens* А-СМС-05 and *G. paraffinivorans* А-СМС-11: external appearance of explants of Thunberg barberry (*Berberis thunbergii Aurea*) at the beginning of the experiment (А); explants with roots at the end of the experiment (В); explants without signs of rhizogenesis at the end of the experiment (С)]

«Корневин» и биопрепарата на основе *Trichoderma virens* б эффективность ризогенеза составила 15%. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что штамм А-СМС-05 обладает выраженными свойствами, способствующими ризогенезу у использованных в качестве объекта исследования растений барбариса, и его эффективность в стимулировании ризогенеза сравнима с эффективностью препарата на основе ИМК. Литературный поиск для сравнительного анализа полученных результатов практически не выявил публикаций, касающихся биостимулирования роста и укоренения эксплантов барбариса. В одной из обнаруженных работ приводится протокол по индукции развития корневых волосков у эксплантов индийского барбариса (*Berberis aristata* DC) штаммами *Agrobacterium rhizogenes* [38].

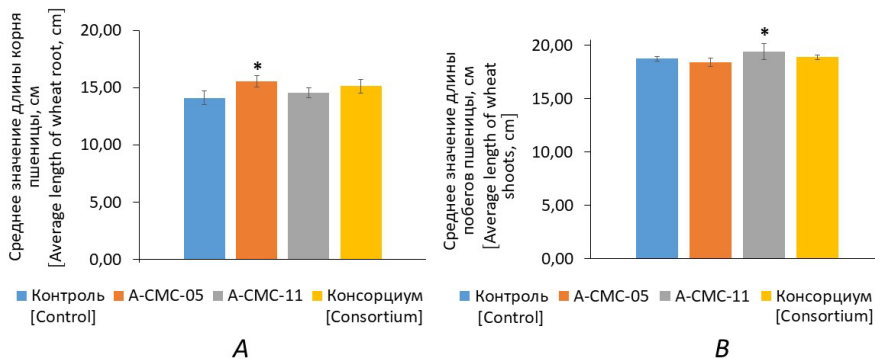
В последующих экспериментах, помимо влияния штаммов А-СМС-05 и А-СМС-11 по отдельности, исследовали их воздействие на рост и ризогенез растений в составе консорциума. Совместное культивирование штаммов А-СМС-05 и А-СМС-11 на плотных питательных средах подтвердило, что они не проявляют антагонистической активности в отношении друг друга и могут применяться в виде консорциума.

В опытах с проращиванием семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) культуральная жидкость штаммов *G. paraffinivorans* А-СМС-11 и *P. protegens* А-СМС-05, в том числе в составе консорциума, не показала какого-либо влияния на всхожесть семян (рис. 3). Значимых отличий от контрольного эксперимента не обнаружено (рис. 3А). При этом отмечено формирование более плотного земляного кома у корней проростков пшеницы в экспериментах с каждым из штаммов и в составе консорциума по сравнению с контролем (рис. 3В). Вместе с тем выявлены статистически значимые отличия длин проростков и корней пшеницы при обработке семян культуральной жидкостью штаммов *G. paraffinivorans* А-СМС-11 и *P. protegens* А-СМС-05 соответственно (рис. 4). Использование штаммов в составе консорциума не показало значимых результатов.



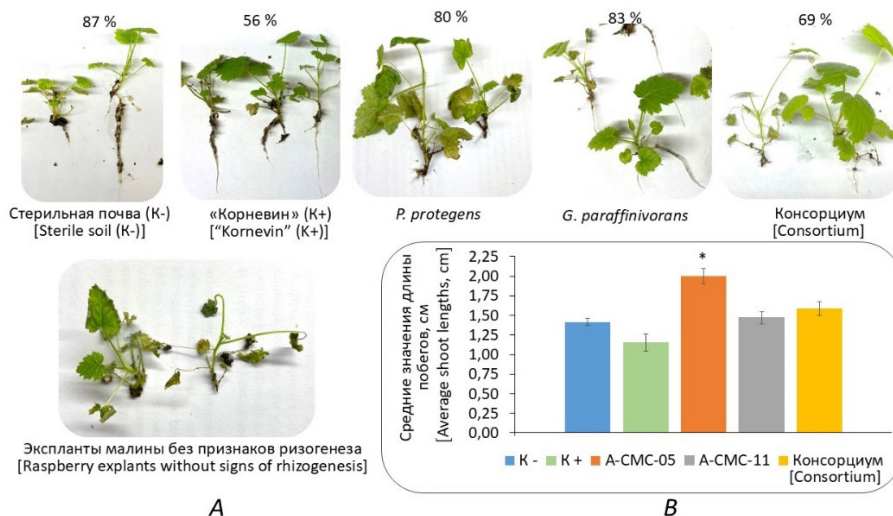
**Рис. 3.** Влияние штаммов *P. protegens* A-CMC-05 и *G. paraffinivorans* A-CMC-11 на всхожесть семян пшеницы (А) и внешний вид проростков и корней пшеницы (В)

[Fig. 3. The effect of *P. protegens* A-CMC-05 and *G. paraffinivorans* A-CMC-11 strains on the germination of wheat seeds (A) and the appearance of wheat seedlings and roots (B)]



**Рис. 4.** Влияние штаммов *G. paraffinivorans* A-CMC-11 и *P. protegens* A-CMC-05 на длину корней (А) и побегов пшеницы (В). На графиках отображены среднеарифметические значения длины побегов и корней пшеницы со стандартной ошибкой среднего. Знаком (\*) показаны статистически значимые различия ( $p \leq 0,05$ ) [Fig. 4. Effect of *G. paraffinivorans* A-CMC-11 and *P. protegens* A-CMC-05 strains on the length of wheat roots (A) and shoots (B). The graphs show the arithmetic mean values of the length of shoots and roots of wheat with the standard error of the mean. The sign (\*) shows statistically significant differences ( $p \leq 0.05$ )]

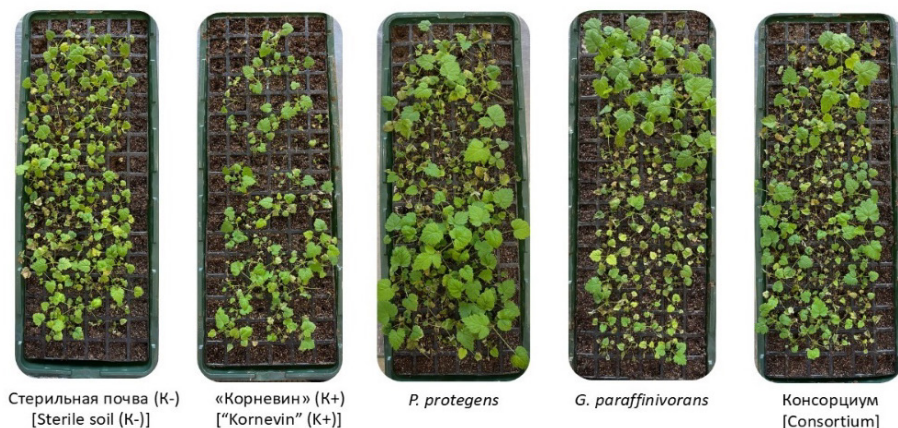
В следующем эксперименте изучали влияние метаболитов штаммов *G. paraffinivorans* A-CMC-11 и *P. protegens* A-CMC-05 на эффективность укоренения и длину побегов у эксплантов малины (*Rubus idaeus* L.) сорта «Кассиопея» (рис. 5). Выбор растительного объекта связан со сложностями ризогенеза эксплантов малины *in vitro*. Производителям приходится высаживать экспланты без признаков ризогенеза для укоренения и адаптации растений. Однако, в отличие от эксперимента с эксплантами барбариса, положительного влияния штаммов или их консорциума на процессы ризогенеза у малины не обнаружено. Эффективность корнеобразования по количеству укоренившихся эксплантов оказалась самой значительной



**Рис. 5.** Влияние штаммов *G. paraffinivorans* A-CMC-11 и *P. protegens* A-CMC-05 на корнеобразование (A) и длину побегов малины (B). На графике отображены среднесарифметические значения длины побегов со стандартной ошибкой среднего. Знаком (\*) показаны статистически значимые различия ( $p \leq 0,05$ )

[Fig. 5. Effect of *G. paraffinivorans* A-CMC-11 and *P. protegens* A-CMC-05 strains on root formation (A) and shoot length (B) of raspberry. The graph shows the arithmetic mean values of shoot length with the standard error of the mean. The sign (\*) indicates statistically significant differences ( $p \leq 0.05$ )]

в отрицательном контроле без какой-либо обработки почвы или эксплантов и составила 87% (см. рис. 5A). По всей видимости, влияние исследуемых штаммов на ризогенез специфично, зависит от конкретного растительного объекта и избирательно может оказывать положительное воздействие на процесс образования корней. Самая низкая эффективность ризогенеза обнаружена в положительном контроле с обработкой коммерческим препаратом, содержащим ИМК, что сложно поддается объяснениям. Однако в настоящем исследовании учитывалось только число укоренившихся эксплантов, измерений массы корней не проводилось. Общая масса корней в контрольных и опытных экспериментах могла отличаться и в том числе влиять на среднюю массу побегов, которая визуально увеличивалась после обработки культуральной жидкостью штаммов и консорциума за счет более широкой листовой пластины (рис. 6). Кроме того, обработка эксплантов культуральной жидкостью штамма *P. protegens* A-CMC-05 способствовала увеличению средней длины побегов на 40% по сравнению с отрицательным контролем и на 73% по сравнению с положительным контролем (см. рис. 5B). Положительный эффект может быть связан как с синтезом ИМК бактерией, так и других биоактивных веществ, способствующих росту растений и описанных ранее для представителей *P. protegens* [39]. Ростостимулирующие свойства у представителей *P. protegens* описаны ранее, включая улучшение роста пшеницы [40].



**Рис. 6.** Внешний вид эксплантов малины по окончании эксперимента по стимулированию роста и корнеобразования штаммами *Pseudomonas protegens* А-СМС-05 и *Gordonia paraffinivorans* А-СМС-11

[Fig. 6. Appearance of raspberry explants at the end of the experiment on stimulating growth and root formation with strains of *Pseudomonas protegens* A-CMC-05 and *Gordonia paraffinivorans* A-CMC-11]

## Заключение

В данной работе изучали биопротекторные и биоактивные свойства двух изолятов из очистных сооружений, получающих муниципальные сточные воды (г. Сурабая, Индонезия), для которых ранее нами показаны липолитические свойства и способность к деструкции пальмового масла (данные не опубликованы). Штаммы *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11 продемонстрировали *in vitro* антагонистический потенциал против фитопатогенного гриба *Fusarium equiseti* D1, а также ряд признаков, способствующих росту растений.

В нашем исследовании ингибирование радиального роста мицелия *Fusarium* sp. D1, являющегося представителем *Fusarium equiseti*, составило от 11% до 13% для штамма А-СМС-11 и от 36% до 67% для штамма А-СМС-05. Следует отметить, что штамм *P. protegens* А-СМС-05 полностью подавлял развитие воздушного мицелия, однако эффективность ингибирования рассчитывали по подавлению роста не только воздушных гиф, но и глубинного мицелия. Помимо фунгицидной активности, штамм А-СМС-05 обладает выраженными свойствами, способствующими ризогенезу у эксплантов барбариса (*Berberis thunbergii* Aurea), и его эффективность в стимулировании ризогенеза сравнима с эффективностью препарата на основе ИМК.

В опытах с проращиванием семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) выявлены статистически значимые увеличения длин проростков и корней пшеницы при обработке семян штаммами *G. paraffinivorans* А-СМС-11 и *P. protegens* А-СМС-05 соответственно. Обработка эксплантов малины (*Rubus idaeus* L.) культуральной жидкостью штамма А-СМС-05 способствовала увеличению средней длины побегов по сравнению с отрицатель-



ным и положительным контролями на 40% и на 73% соответственно. Для штамма *P. protegens* А-СМС-05 выявлены более высокие показатели по всем исследованным характеристикам, таким как эффективность ингибирования фитопатогена и процент эксплантов с признаками ризогенеза.

Результаты проведенных исследований подтверждают литературные данные о том, что неризосферные бактерии могут значительно улучшать свойства сельскохозяйственных растений. Полученные данные продемонстрировали потенциал штаммов *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11, выделенных из аэротенка городских очистных сооружений, в качестве агентов биоконтроля и стимуляторов роста растений. Штамм *P. protegens* А-СМС-05 показал более значимые результаты и является более перспективным для дальнейших исследований ростостимулирующих и биопротекторных свойств.

#### Список источников

1. Fróna D., Szenderák J., Harangi-Rákos M. The challenge of feeding the World // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, № 20. 5816. doi: 10.3390/su11205816
2. Pathak V.M., Verma V.K., Rawat B.S., Kaur B., Babu N., Sharma A., Dewali S., Yadav M., Kumari R., Singh S., Mohapatra A., Pandey V., Rana N., Cunill J.M. Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. 962619. doi: 10.3389/fmicb.2022.962619
3. Khan A., Upadhyay V.K., Panwar M., Singh A.V. Soil microbiota: A key bioagent for revitalization of soil health in hilly regions // *Microbiological advancements for higher altitude agro-ecosystems & sustainability* / ed. by R. Goel, R. Soni, D.C. Sual. Singapore : Springer, 2020. PP. 183–200. doi: 10.1007/978-981-15-1902-4\_10
4. Ayilara M.S., Adeleke B.S., Akinola S.A., Fayose C.A., Adeyemi U.T., Gbadegehin L.A., Omole R.K., Johnson R.M., Uthman Q.O., Babalola O.O. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides // *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 14. 1040901. doi: 10.3389/fmicb.2023.1040901
5. Максимов И., Веселова С., Нужная Т., Сарварова Е., Хайруллин П. Стимулирующие рост растений бактерии в регуляции устойчивости растений к стрессовым факторам // *Физиология растений*. 2015. Т. 62, № 6. С. 763–775. doi: 10.7868/S0015330315060111
6. Vejan P., Abdullah R., Khadiran T., Ismail S., Nasrulhaq B.A. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability – a review // *Molecules*. 2016. Vol. 21, № 5. 573. doi: 10.3390/molecules21050573
7. Taheri P., Puopolo G., Santoyo G. Plant growth-promoting microorganisms: New insights and the way forward // *Microbiological Research*. 2025. Vol. 297. 128168. doi: 10.1016/j.micres.2025.128168
8. Glick B.R. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications // *Scientifica (Cairo)*. 2012. Vol. 2012. 963401. doi: 10.6064/2012/963401
9. Martinez-Viveros O., Jorquera M.A., Crowley D.E., Gajardo G., Mora M.L. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2010. Vol. 10, № 3. PP. 293–319. doi: 10.4067/S0718-95162010000100006
10. Choudhary D.K., Sharma K.P., Gaur R.K. Biotechnological perspectives of microbes in agro-ecosystems // *Biotechnology Letters*. 2011. Vol. 33, № 10. PP. 1905–1910. doi: 10.1007/s10529-011-0662-0

11. Nakkeeran S., Fernando W.G.D., Siddiqui Z.A. Plant growth promoting rhizobacteria formulations and its scope in commercialization for the management of pests and diseases // PGPR: Biocontrol and biofertilization / ed. by Z.A. Siddiqui. Dordrecht, The Netherlands : Springer, 2005. PP. 257–296. doi: 10.1007/1-4020-4152-7\_10
12. Whipps J.M. Effect of media on growth and interactions between a range of soil-borne glasshouse pathogens and antagonistic fungi // New Phytologist. 1987. Vol. 107, № 1. PP. 127–142. doi: 10.1111/J.1469-8137.1987.TB04887.X
13. Afonso L., Gionco-Cano B., Simionato A.S., Niekawa E.T.G., Pega G.E.A. et al. Chapter 3 – Microbial bioactive compounds in plant disease management // Food security and plant disease management / ed. by A. Kumar, S. Droby. Woodhead Publishing, 2021. PP. 37–61. doi: 10.1016/B978-0-12-821843-3.00013-1
14. Silva N.M., de Oliveira A.M.S.A., Pegorin S., Giusti C.E., Ferrari V.B., Barbosa D. et al. Characterization of novel hydrocarbon-degrading *Gordonia paraffinivorans* and *Gordonia sihwensis* strains isolated from composting // PLoS ONE. 2019. Vol. 14, № 4. e0215396. doi: 10.1371/journal.pone.0215396
15. Ramette A., Frapolli M., Fischer-Le S.M., Gruffaz C., Meyer J.-M., Défago G., Sutra L., Moënne-Loccoz Y. *Pseudomonas protegens* sp. nov., widespread plant-protecting bacteria producing the biocontrol compounds 2,4-diacetylphloroglucinol and pyoluteorin // Systematic and Applied Microbiology. 2011. Vol. 34, № 3. PP. 180–188. doi: 10.1016/j.syapm.2010.10.005
16. Kayasth M., Kumar V., Gera R. *Gordonia* sp.: A salt tolerant bacterial inoculant for growth promotion of pearl millet under saline soil conditions // 3 Biotech. 2014. Vol. 4, № 5. PP. 553–557. doi: 10.1007/s13205-013-0178-5
17. El Hazzat N., Adnani M., Msairi S., El Alaoui M.A., Mouden N., Chliyah M. et al. *Fusarium equiseti* as one of the main *Fusarium* species causing wilt and root rot of chickpeas in Morocco // Acta Mycologica. 2023. Vol. 58. PP. 1–10. doi: 10.5586/am.576
18. Bibi A., Mubeen F., Rizwan A., Ullah I., Hammad M., Waqas M.A.B., Ikram A., Abbas Z., Halterman D., Saeed N.A. Morpho-molecular identification of *Fusarium equiseti* and *Fusarium oxysporum* associated with symptomatic wilting of potato from Pakistan // Journal of Fungi. 2024. Vol. 10, № 10. 701. doi: 10.3390/jof10100701
19. Pecoraro F., Giannini M., Beccari G., Covarelli L., Filippini G., Pisi A., Nipoti P., Prodi A. Comparative studies about fungal colonization and deoxynivalenol translocation in barley plants inoculated at the base with *Fusarium graminearum*, *Fusarium culmorum* and *Fusarium pseudograminearum* // Agricultural and Food Science. 2018. Vol. 27, № 1. PP. 74–83. doi: 10.23986/afsci.67704
20. Moya-Elizondo E.A., Rew L.J., Jacobsen B.J., Hogg A.C., Dyer A.T. Distribution and prevalence of *Fusarium* crown rot and common root rot pathogens of wheat in Montana // Plant Disease. 2011. Vol. 95, № 9. PP. 1099–1108. doi: 10.1094/PDIS-11-10-0795
21. Scherm B., Balmas V., Spanu F., Pani G., Delogu G., Pasquali M., Migheli Q. *Fusarium culmorum*: Causal agent of foot and root rot and head blight on wheat // Molecular Plant Pathology. 2012. Vol. 14, № 4. PP. 323–341. doi: 10.1111/mpp.12011
22. Rohweder D., Valenta H., Sondermann S., Schollenberger M., Drochner W., Pahlow G., Döll S., Dänicke S. Effect of different storage conditions on the mycotoxin contamination of *Fusarium culmorum*-infected and non-infected wheat straw // Mycotoxin Research. 2011. Vol. 27, № 2. PP. 145–153. doi: 10.1007/s12550-011-0087-6
23. Nordkvist E., Häggblom P. *Fusarium* mycotoxin contamination of cereals and bedding straw at Swedish pig farms // Animal Feed Science and Technology. 2014. Vol. 198. PP. 231–237. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2014.10.002
24. Mejia-Bautista M., Cristobal-Alejo J., Tun-Suarez J., Reyes-Ramírez A. In vitro activity of *Bacillus* spp. on mycelial growth inhibition of *Fusarium equiseti* and *Fusarium solani* isolated from habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.) // Agrociencia. 2016. Vol. 50, № 8. PP. 1123–1135.
25. Haddoudi I., Cabrefiga J., Mora I., Mhadhbi H., Montesinos E., Mrabet M. Biological control of *Fusarium* wilt caused by *Fusarium equiseti* in *Vicia faba* with broad spectrum



- antifungal plant-associated *Bacillus* spp. // *Biological Control*. 2021. Vol. 160, № 1. 104671. doi: 10.1016/j.biocontrol.2021.104671
26. Шемшюра О.Н., Байдалинов А.И., Сулейменова Ж.Б., Джакибаева Г.Т., Баймаханова Г.Б., Момбекова Г.А. Штамм *Chryseobacterium rhizoplanae* 1M – основа биопрепарата против фузариозной гнили *Vidua radiata* и оценка его биобезопасности // *Микробиология және вирусология*. 2022. Т. 2, № 37. С. 80–91. doi: 10.53729/MV-AS.2022.02.0
  27. Bensidhoum L., Nabti E., Tabli N., Kupferschmied P., Weiss A., Rothballer M., Schmid M., Keel C., Hartmann A. Heavy metal tolerant *Pseudomonas protegens* isolates from agricultural well water in northeastern Algeria with plant growth promoting, insecticidal and antifungal activities // *European Journal of Soil Biology*. 2016. Vol. 75. PP. 38–46. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.04.006
  28. Andreolli M., Zapparoli G., Angelini E., Lucchetta G., Lampis S., Vallini G. *Pseudomonas protegens* MP12: A plant growth-promoting endophytic bacterium with broad-spectrum antifungal activity against grapevine phytopathogens // *Microbiological Research*. 2019. Vol. 219. PP. 123–131. doi: 10.1016/j.micres.2018.11.003
  29. Uno S., Preece J. Micro and cutting propagation of ‘Crimson Pygmy’ Barberry // *Hort Science*. 1987. Vol. 22, № 3. PP. 488–491. doi: 10.21273/HORTSCI.22.3.488
  30. Жарасова Д.Н., Толеп Н.А. Особенности введения в культуру *in vitro* барбариса илийского (*Berberis iliensis* М. Поп.) // *Вестник Карагандинского университета*. Серия «Биология. Медицина. География». 2022. Т. 4, № 108. С. 29–33. doi: 10.31489/2022BMG4/29-33
  31. Бакаева М.Д., Кенджиева А.А., Стариков С.Н., Четвериков С.П., Четверикова Д.В. Влияние стимулирующей рост бактерии *Pseudomonas protegens* DA1.2 и ее метаболитов на повреждение рапса почвенными остатками метсульфурон-метила // *Агротехника*. 2024. № 12. С. 30–35. doi: 10.31857/S0002188124120041
  32. Ajmal A.W., Saroosh S., Mulk S., Hassan M.N., Yasmin H., Jabeen Z., Nosheen A. et al. Bacteria isolated from wastewater irrigated agricultural soils adapt to heavy metal toxicity while maintaining their plant growth promoting traits // *Sustainability*. 2024. Vol. 13. 7792. doi: 10.3390/su13147792
  33. Sarawaneeyaruk S., Lorliam W., Krajangsang S., Pringsulaka O. Enhancing plant growth under municipal wastewater irrigation by plant growth promoting rhizospheric *Bacillus* spp // *Journal of King Saud University – Science*. 2019. Vol. 31, № 3. PP. 384–389. doi: 10.1016/j.jksus.2018.04.027
  34. Barbaccia P., Gaglio R., Dazzi C., Miceli C., Bella P., Lo Papa G., Settanni L. Plant growth-promoting activities of bacteria isolated from an anthropogenic soil located in Agrigento province // *Microorganisms*. 2022. Vol. 10, № 11. 2167. doi: 10.3390/microorganisms10112167
  35. Goswami D., Vaghela H., Parmar S., Dhandhukia P., Thakker J.N. Plant growth promoting potentials of *Pseudomonas* spp. strain OG isolated from marine water // *Journal of Plant Interactions*. 2013. Vol. 8, № 4. PP. 281–290. doi: 10.1080/17429145.2013.768360
  36. Przemieniecki S.W., Kurowski T.P., Karwowska A. Plant growth promoting potential of *Pseudomonas* sp. SP0113 isolated from potable water from a closed water well // *Archives of Biological Science*. 2015. Vol. 67, № 2. PP. 663–673. doi: 10.2298/ABS141002029P
  37. Przemieniecki S.W., Kurowski T.P., Kotlarz K., Krawczyk L., Damszel M. et al. Bacteria isolated from treated wastewater for biofertilization and crop protection against *Fusarium* spp. pathogens // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2019. Vol. 19, № 1. PP. 1–11. doi: 10.1007/s42729-018-0001-9
  38. Brijwal L., Tamta S. *Agrobacterium rhizogenes* mediated hairy root induction in endangered *Berberis aristata* DC // *SpringerPlus*. 2015. Vol. 4, № 1. 443. doi: 10.1186/s40064-015-1222-1
  39. Przemieniecki S.W., Kurowski P.T., Kotlarz K., Krawczyk K., Damszel M., Karwowska A. Plant growth promoting properties of *Serratia fonticola* ART-8 and *Pseudomonas*

- putida* ART-9 and their effect on the growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) // Environmental Biotechnology. 2016. Vol. 12, № 2. PP. 35–39. doi: 10.14799/ebms263
40. Bakaeva M., Chetverikov S., Timergalin M., Feoktistova A., Rameev T., Chetverikova D., Kenjjeva A., Starikov S., Sharipov D., Hkudaygulov G. PGP-bacterium *Pseudomonas protegens* improves bread wheat growth and mitigates herbicide and drought stress // Plants. 2022. Vol. 11, № 23. 3289. doi: 10.3390/plants11233289

## References

1. Fróna D, Szenderák J, Harangi-Rákos M. The Challenge of Feeding the World. *Sustainability*. 2019;11(20):5816. doi: 10.3390/su11205816
2. Pathak VM, Verma VK, Rawat BS, Kaur B, Babu N, Sharma A, Dewali S, Yadav M, Kumari R, Singh S, Mohapatra A, Pandey V, Rana N, Cunill JM. Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. *Front. Microbiol.* 2022;13:962619. doi: 10.3389/fmicb.2022.962619
3. Khan A, Upadhayay VK, Panwar M, Singh AV. Soil microbiota: A key bioagent for revitalization of soil health in hilly regions. In: *Microbiological Advancements for Higher Altitude Agro-Ecosystems & Sustainability*. Goel R, Soni R, Suyal DC, editors. Singapore: Springer; 2020. pp. 183-200. doi: 10.1007/978-981-15-1902-4\_10
4. Ayilara MS, Adeleke BS, Akinola SA, Fayose CA, Adeyemi UT, Gbadegesin LA, Omole RK, Johnson RM, Uthman QO, Babalola OO. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nano-biopesticides. *Front. Microbiol.* 2023;14:1040901. doi: 10.3389/fmicb.2023.1040901
5. Maksimov I, Veselova S, Nuzhnaya T, Sarvarova E, Khairullin R. Plant growth-promoting bacteria in the regulation of plant resistance to stress factors. *Russ. J. Plant Physiol.* 2015;62(6):763-775. In Russian, English summary. doi: 10.7868/S0015330315060111
6. Vejan P, Abdullah R, Khadiran T, Ismail S, Nasrullah BA. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability - A review. *Molecules*. 2016;21(5):573. doi: 10.3390/molecules21050573
7. Taheri P, Puopolo G, Santoyo G. Plant growth-promoting microorganisms: New insights and the way forward. *Microbiological Research*. 2025;297:128168. doi: 10.1016/j.micres.2025.128168
8. Glick BR. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica (Cairo)*. 2012;2012:963401. doi: 10.6064/2012/963401
9. Martinez-Viveros O, Jorquera MA, Crowley DE, Gajardo G, Mora ML. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2010;10(3):293-319. doi: 10.4067/S0718-95162010000100006
10. Choudhary DK, Sharma KP, Gaur RK. Biotechnological perspectives of microbes in agro-ecosystems. *Biotechnol. Lett.* 2011;33(10):1905-1910. doi: 10.1007/s10529-011-0662-0
11. Nakkeeran S, Fernando WGD, Siddiqui ZA. Plant growth promoting rhizobacteria formulations and its scope in commercialization for the management of pests and diseases. In: *PGPR: Biocontrol and biofertilization*. Siddiqui ZA, editor. Dordrecht, The Netherlands: Springer; 2005. pp. 257-296. doi: 10.1007/1-4020-4152-7\_10
12. Whipps JM. Effect of media on growth and interactions between a range of soil-borne glasshouse pathogens and antagonistic fungi. *New Phytol.* 1987;107(1):127-142. doi: 10.1111/J.1469-8137.1987.TB04887.X
13. Afonso L, Gionco-Cano B, Simionato AS, Niekawa ETG, Pega GEA et al. Chapter 3 - Microbial bioactive compounds in plant disease management. In: *Food Security and Plant Disease Management*. Kumar A, Droby S, editors. Woodhead Publishing; 2021. pp. 37-61. doi: 10.1016/B978-0-12-821843-3.00013-1
14. Silva NM, de Oliveira AMSA, Pegorin S, Giusti CE, Ferrari VB, Barbosa D et al. Characterization of novel hydrocarbon-degrading *Gordonia paraffinivorans* and *Gordonia*

- sihwenensis* strains isolated from composting. *PLoS ONE*. 2019;14(4):e0215396. doi: 10.1371/journal.pone.0215396
15. Ramette A, Frapolli M, Fischer-Le SM, Gruffaz C, Meyer J-M, Défago G, Sutra L, Moëgne-Loccoz Y. *Pseudomonas protegens* sp. nov., widespread plant-protecting bacteria producing the biocontrol compounds 2,4-diacetylphloroglucinol and pyoluteorin. *Syst. Appl. Microbiol.* 2011;34(3):180-188. doi: 10.1016/j.syapm.2010.10.005
  16. Kayasth M, Kumar V, Gera R. *Gordonia* sp.: A salt tolerant bacterial inoculant for growth promotion of pearl millet under saline soil conditions. *3 Biotech.* 2014;4(5):553-557. doi: 10.1007/s13205-013-0178-5
  17. El Hazzat N, Adnani M, Msairi S, El Alaoui MA, Mouden N, Chliyah M et al. *Fusarium equiseti* as one of the main *Fusarium* species causing wilt and root rot of chickpeas in Morocco. *Acta Mycol.* 2023;58:1-10. doi: 10.5586/am.576
  18. Bibi A, Mubeen F, Rizwan A, Ullah I, Hammad M, Waqas MAB, Ikram A, Abbas Z, Halterman D, Saeed NA. Morpho-molecular identification of *Fusarium equiseti* and *Fusarium oxysporum* associated with symptomatic wilting of potato from Pakistan. *Journal of Fungi.* 2024;10(10):701. doi: 10.3390/jof10100701
  19. Pecoraro F, Giannini M, Beccari G, Covarelli L, Filippini G, Pisi A, Nipoti P, Prodi A. Comparative studies about fungal colonization and deoxynivalenol translocation in barley plants inoculated at the base with *Fusarium graminearum*, *Fusarium culmorum* and *Fusarium pseudograminearum*. *Agricultural and Food Science.* 2018;27(1):74-83. doi: 10.23986/afsci.67704
  20. Moya-Elizondo EA, Rew LJ, Jacobsen BJ, Hogg AC, Dyer AT. Distribution and prevalence of *Fusarium* crown rot and common root rot pathogens of wheat in Montana. *Plant Disease.* 2011;95(9):1099-1108. doi: 10.1094/PDIS-11-10-0795
  21. Scherm B, Balmas V, Spanu F, Pani G, Delogu G, Pasquali M, Migheli Q. *Fusarium culmorum*: Causal agent of foot and root rot and head blight on wheat. *Mol. Plant Pathol.* 2012;14(4):323-341. doi: 10.1111/mpp.12011
  22. Rohweder D, Valenta H, Sondermann S, Schollenberger M, Drochner W, Pahlow G, Döll S, Dänicke S. Effect of different storage conditions on the mycotoxin contamination of *Fusarium culmorum*-infected and non-infected wheat straw. *Mycotoxin Res.* 2011;27(2):145-153. doi: 10.1007/s12550-011-0087-6
  23. Nordkvist E, Häggblom P. *Fusarium* mycotoxin contamination of cereals and bedding straw at Swedish pig farms. *Anim. Feed Sci. Technol.* 2014;198:231-237. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2014.10.002
  24. Mejia-Bautista M, Cristobal-Alejo J, Tun-Suarez J, Reyes-Ramírez A. In vitro activity of *Bacillus* spp. on mycelial growth inhibition of *Fusarium equiseti* and *Fusarium solani* isolated from habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agrociencia.* 2016;50(8):1123-1135.
  25. Haddoudi I, Cabrefiga J, Mora I, Mhadhbi H, Montesinos E, Mrabet M. Biological control of *Fusarium* wilt caused by *Fusarium equiseti* in *Vicia faba* with broad spectrum antifungal plant-associated *Bacillus* spp. *Biological Control.* 2021;160(1):104671. doi: 10.1016/j.biocontrol.2021.104671
  26. Shemshura ON, Baidalinov AI, Suleimenova ZhB, Dzhakibaeva GT, Baimakhanova GB, Mombekova GA. The strain *Chryseobacterium rhizoplanae* 1M - a basis of a biological preparation against fusarium rot *Vidna radiata* and its biosafety assessment. *Microbiology and Virology.* 2022;2(37):80-91. In Russian, English summary. doi: 10.53729/MV-AS.2022.02.0
  27. Bensidhoum L, Nabti E, Tabli N, Kupferschmied P, Weiss A, Rothballer M, Schmid M, Keel C, Hartmann A. Heavy metal tolerant *Pseudomonas protegens* isolates from agricultural well water in northeastern Algeria with plant growth promoting, insecticidal and antifungal activities. *Eur. J. Soil Biol.* 2016;75:38-46. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.04.006
  28. Andreolli M, Zapparoli G, Angelini E, Lucchetta G, Lampis S, Vallini G. *Pseudomonas protegens* MP12: A plant growth-promoting endophytic bacterium with broad-spectrum

- antifungal activity against grapevine phytopathogens. *Microbiol. Res.* 2019;219:123-131. doi: 10.1016/j.micres.2018.11.003
29. Uno S, Preece J. Micro and cutting propagation of ‘Crimson Pygmy’ Barberry. *Hort Science.* 1987;22(3):488-491. doi: 10.21273/HORTSCI.22.3.488
  30. Zharassova D, Tolep NA. Features of the introduction of *Berberis iliensis* M. Pop. into *in vitro* culture. *Bulletin of the Karaganda University. “Biology, medicine, geography Series”.* 2022;4(108):29-33. In Russian, English summary. doi: 10.31489/2022BMG4/29-33
  31. Bakaeva M, Kendzhieva A, Starikov S, Chetverikov S, Chetverikova D. Effect of the growth-stimulating bacterium *Pseudomonas protegens* DA1.2 and its metabolites on damage to rapeseed by soil residues of metsulfuron-methyl. *Agrohimiâ.* 2024;12:30-35. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S0002188124120041
  32. Ajmal AW, Saroosh S, Mulk S, Hassan MN, Yasmin H, Jabeen Z, Nosheen A et al. Bacteria isolated from wastewater irrigated agricultural soils adapt to heavy metal toxicity while maintaining their plant growth promoting traits. *Sustainability.* 2024;13:7792. doi: 10.3390/su13147792
  33. Sarawanceyaruk S, Lorliam W, Krajangsang S, Pringsulaka O. Enhancing plant growth under municipal wastewater irrigation by plant growth promoting rhizospheric *Bacillus* spp. *J. King Saud Univ. Sci.* 2019;31(3):384-389. doi: 10.1016/j.jksus.2018.04.027
  34. Barbaccia P, Gaglio R, Dazzi C, Miceli C, Bella P, Lo Papa G, Settanni L. Plant growth-promoting activities of bacteria isolated from an anthropogenic soil located in Agrigento province. *Microorganisms.* 2022;10(11):2167. doi: 10.3390/microorganisms10112167
  35. Goswami D, Vaghela H, Parmar S, Dhandhukia P, Thakker JN. Plant growth promoting potentials of *Pseudomonas* spp. strain OG isolated from marine water. *J. Plant Interact.* 2013;8(4):281-290. doi: 10.1080/17429145.2013.768360
  36. Przemieniecki SW, Kurowski TP, Karwowska A. Plant growth promoting potential of *Pseudomonas* sp. SP0113 isolated from potable water from a closed water well. *Arch. Biol. Sci.* 2015;67(2):663-673. doi: 10.2298/ABS141002029P
  37. Przemieniecki SW, Kurowski TP, Kotlarz K, Krawczyk L, Damszel M et al. Bacteria isolated from treated wastewater for biofertilization and crop protection against *Fusarium* spp. pathogens. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2019;19(1):1-11. doi: 10.1007/s42729-018-0001-9
  38. Brijwal L, Tamta S. *Agrobacterium rhizogenes* mediated hairy root induction in endangered *Berberis aristata* DC. *SpringerPlus.* 2015;4(1):443. doi: 10.1186/s40064-015-1222-1
  39. Przemieniecki SW, Kurowski PT, Kotlarz K, Krawczyk K, Damszel M, Karwowska A. Plant growth promoting properties of *Serratia fonticola* ART-8 and *Pseudomonas putida* ART-9 and their effect on the growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environ. Biotechnol.* 2016;12(2):35-39. doi: 10.14799/ebms263
  40. Bakaeva M, Chetverikov S, Timergalin M, Feoktistova A, Rameev T, Chetverikova D, Kenjjeva A, Starikov S, Sharipov D, Hkudaygulov G. PGP-bacterium *Pseudomonas protegens* improves bread wheat growth and mitigates herbicide and drought stress. *Plants.* 2022;11(23):3289. doi: 10.3390/plants11233289

#### **Информация об авторах:**

**Сысоева Анастасия Николаевна**, аспирант, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет; начальник отдела производства биопрепаратов, ООО «Дарвин» (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3716-3338>

E-mail: [nastena.sysoeva.97@bk.ru](mailto:nastena.sysoeva.97@bk.ru)

**Ивасенко Мария Денисовна**, студент, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет; аппаратчик ООО «Дарвин» (Томск, Россия).

E-mail: [ivassenko.marya@mail.ru](mailto:ivassenko.marya@mail.ru)

**Ивасенко Денис Александрович**, канд. биол. наук, доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет; директор ООО «Дарвин» (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7132-182X>

E-mail: [ivasenko.da@mail.ru](mailto:ivasenko.da@mail.ru)

**Герасимчук Анна Леонидовна**, канд. биол. наук, доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2945-2364>

E-mail: [gerasimchuk\\_ann@mail.ru](mailto:gerasimchuk_ann@mail.ru)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

***Information about the authors:***

**Anastasia N. Sysoeva**, PhD student, Biological Institute, National Research Tomsk State University; Head of the Biological Products Production Department at Darwin LLC (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3716-3338>

E-mail: [nastena.sysoeva.97@bk.ru](mailto:nastena.sysoeva.97@bk.ru)

**Maria D. Ivasenko**, student, Biological Institute, National Research Tomsk State University; operator of Darwin LLC (Tomsk, Russian Federation).

E-mail: [ivasenko.mary@mail.ru](mailto:ivasenko.mary@mail.ru)

**Denis A. Ivasenko**, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Ichthyology and Hydrobiology, Biological Institute, National Research Tomsk State University; Director of Darwin LLC (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7132-182X>

E-mail: [ivasenko.da@mail.ru](mailto:ivasenko.da@mail.ru)

**Anna L. Gerasimchuk**, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Ichthyology and Hydrobiology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2945-2364>

E-mail: [gerasimchuk\\_ann@mail.ru](mailto:gerasimchuk_ann@mail.ru)

*The Authors declare no conflict of interest.*

*Статья поступила в редакцию 20.01.2025;  
одобрена после рецензирования 08.04.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 20.01.2025;  
approved after reviewing 08.04.2025; accepted for publication 04.09.2025*