

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ

PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF PLANTS

УДК 581.14+579.64+633.16
doi: 10.21685/2307-9150-2025-3-5

Действие суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 в условиях внесения фосфатных удобрений на морфофизиологические параметры и продуктивность *Hordeum vulgare*

И. И. Рассохина¹, О. А. Маракаев²

¹Вологодский научный центр Российской академии наук, Вологда, Россия

²Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова, Ярославль, Россия

¹rasskhinairina@mail.ru, ²olemar@yandex.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Микробно-растительное взаимодействие – известный в науке и практике механизм активации роста и повышения продуктивности сельскохозяйственных культур. Цель исследования – оценить действие суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 в условиях внесения фосфатных удобрений на морфофизиологические параметры и продуктивность ячменя обыкновенного (*Hordeum vulgare* L.). Материалы и методы. Работа по изучению действия суспензии штамма на рост и продуктивность *H. vulgare* сорта Сонет выполнялась путем постановки полевых опытов в 2020 и 2022 гг., оценка действия штамма в условиях дополнительного внесения фосфорных удобрений – в 2023–2025 гг. Внесение суспензии штамма осуществлялось дважды: бактеризация семян перед посевом и опрыскивание филлосферы в фазу кущения. Результаты. Многолетние полевые опыты позволяют утверждать, что суспензия штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 способствует увеличению ассимиляционной поверхности, содержанию фотосинтетических пигментов, накоплению сухой массы в надземных органах как отдельно, так и в условиях дополнительного фосфатного питания. Зерновая продуктивность *H. vulgare* сорта Сонет в условиях Нечерноземной зоны России опытных вариантов превосходит контроль на 16–39 % при внесении суспензии штамма и на 72–113 % при внесении суспензии штамма совместно с минеральными удобрениями (на 5–12 % относительно вариантов с внесением тех же дозировок фосфатных удобрений, но без использования суспензии штамма). Действие суспензии *Pseudomonas* sp. GEOT18 может быть связано как со способностью бактерий синтезировать ИУК ($7,87 \pm 0,71$ мг/л), так и высвобождать фосфор из нерастворимого фосфата кальция в доступную для растений форму. Выводы. Полученные результаты позволяют рассматривать суспензию штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 в качестве основы для разработки биопрепарата.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare*, *Pseudomonas*, штамм, рост, продуктивность, фотосинтетические пигменты, фосфатные удобрения, мобилизация фосфора

© Рассохина И. И., Маракаев О. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ВолНЦ РАН по теме НИР FMGZ-2025-0018 «Микроорганизмы и их метаболиты как фактор экологизации и интенсификации сельскохозяйственного производства в условиях Нечерноземной зоны России».

Для цитирования: Рассокхина И. И., Маракаев О. А. Действие суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 в условиях внесения фосфатных удобрений на морфофизиологические параметры и продуктивность *Hordeum vulgare* // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2025. № 3. С. 100–112. doi: 10.21685/2307-9150-2025-3-5

**The effect of a suspension of the strain *Pseudomonas* sp. GEOT18
under conditions of phosphate fertilizer application
on the morphophysiological parameters
and productivity of *Hordeum vulgare***

I.I. Rassokhina¹, O.A. Marakaev²

¹Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences, Vologda, Russia

²P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

¹rasskhinairina@mail.ru, ²olemar@yandex.ru

Abstract. *Background.* Microbe-plant interactions are a well-known mechanism in science and practice for activating growth and increasing productivity in agricultural crops. The purpose of this study was to evaluate the effect of a suspension of the *Pseudomonas* sp. GEOT18 strain, applied with phosphate fertilizers, on the morphophysiological parameters and productivity of common barley (*Hordeum vulgare* L.). *Materials and methods.* The effect of the strain suspension on the growth and productivity of *H. vulgare* cultivar Sonet was studied through field trials in 2020 and 2022, and the strain's performance under additional phosphorus fertilizer application was assessed in 2023–2025. The strain suspension was applied twice: by seed bacterization before sowing and by spraying the phyllosphere during the tillering phase. *Results.* Long-term field experiments suggest that a suspension of the *Pseudomonas* sp. GEOT18 strain increases the assimilation surface, the content of photosynthetic pigments, and the accumulation of dry matter in aboveground organs, both alone and under conditions of additional phosphate nutrition. Grain productivity of *H. vulgare* variety Sonet in the Non-Chernozem zone of Russia in experimental variants exceeds the control by 16–39 % when applying a suspension of the strain and by 72–113 % when applying a suspension of the strain together with mineral fertilizers (by 5–12 % relative to variants with the application of the same doses of phosphate fertilizers, but without using a suspension of the strain). The effect of the *Pseudomonas* sp. GEOT18 suspension may be associated both with the ability of bacteria to synthesize IAA (7.87 ± 0.71 mg/l) and to release phosphorus from insoluble calcium phosphate into a form accessible to plants. *Conclusions.* The obtained results allow us to consider a suspension of the *Pseudomonas* sp. GEOT18 strain as a basis for the development of a biopreparation.

Keywords: *Hordeum vulgare*, *Pseudomonas*, strain, growth, productivity, photosynthetic pigments, phosphate fertilizers, phosphorus mobilization

Financing: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal State Budgetary Educational Institution of the Russian Academy of Sciences on the research topic FMGZ-2025-0018 "Microorganisms and their metabolites as a factor of greening and intensification of agricultural production in the Non-Chernozem zone of Russia".

For citation: Rassokhina I.I., Marakaev O.A. The effect of a suspension of the strain *Pseudomonas* sp. GEOT18 under conditions of phosphate fertilizer application on the morphophysiological parameters and productivity of *Hordeum vulgare*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences.* 2025;(3):100–112. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-9150-2025-3-5

Введение

Микробно-растительное взаимодействие – известный в науке и практике механизм активации роста и повышения продуктивности сельскохозяйственных культур [1–3], который согласуется с современными мировыми и отечественными тенденциями экологизации агропроизводства [4, 5]. Бактерии рода *Pseudomonas*, которые способны обитать в различных условиях, являются значительной группой PGPR-бактерий (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) [6, 7]. К наиболее известным полезным для агропроизводства видам рода *Pseudomonas* относятся *P. aeruginosa*, *P. chlororaphis*, *P. fluorescens*, *P. putida* и *P. syringae* [8]. Ранее проведенный анализ результатов исследований отечественных и зарубежных авторов позволил выделить следующие основные механизмы активации роста и повышения продуктивности культур при действии на них представителей рода *Pseudomonas*: синтез метаболитов, оказывающих действие на рост и/или развитие надземных и подземных органов; повышение доступности минеральных компонентов для растения; подавление развития фитопатогенных грибов и/или бактерий (прямой и косвенный антагонизм); нивелирование стрессовых факторов [9].

Способность к синтезу фитогормональных веществ была отмечена у 80 % представителей рода *Pseudomonas* [10, 11]. Результаты по изучению отдельных ИУК-продуцирующих штаммов подтверждают способность и эффективность представителей данного рода к активации роста растений. Так, показано, что инокуляция семян огурца штаммом *P. mendocina* 9–40 стимулировала корнеобразование боковых и придаточных корней, приводила к увеличению длины корней и массы проростков в 2,3–2,9 и в 1,6–2,0 раза соответственно [12].

Фосфор – один из важнейших биогенных элементов биосфера, валовые запасы которого в почве достаточно велики, однако он находится в малодоступном для растений виде [13]. Среди представителей рода *Pseudomonas* имеется немало штаммов, которые способны к солюбилизированию фосфата [6, 14, 15]. Высвобождение фосфора из нерастворимых фосфатов объясняется, главным образом, синтезом органических кислот и их способностью к хелатированию. Прямое периплазматическое окисление глюкозы до глюконовой кислоты рассматривается как метаболическая основа солюбилизации неорганических фосфатов многими грамотрицательными бактериями в качестве конкурентной стратегии по преобразованию легкодоступных источников углерода в продукты, менее пригодные для использования другими микроорганизмами [16]. Так, было показано, что штаммы бактерий рода *Pseudomonas*, способные к солюбилизации фосфатов, синтезировали глюкановую, 2-кетоглюконовую, янтарную, муравьиную, лимонную, яблоневую, а также щавелевую и молочную кислоты [17].

Цель нашего исследования – оценить действие суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 в условиях внесения фосфатных удобрений на морфофизиологические параметры и продуктивность ячменя обыкновенного (*Hordeum vulgare* L.).

Материалы и методы

Бактерии *Pseudomonas* sp. GEOT18 (GenBank – MT180656), суспензия которых использована в исследованиях, выделены из внутренних тканей стеблеворневых тубероидов генеративных особей *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó в лаборатории молекулярной генетики и биотехнологии Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова. Суспензию данного штамма получали на среде LB по Miller (Luria-Bertani) в условиях постоянного перемешивания при температуре 24 °C в течение 16–18 ч (плотность суспензии – 10⁹ КОЕ/мл).

Подтверждение способности бактерий *Pseudomonas* sp. GEOT18 синтезировать ИУК осуществлялось спектрофотометрическим методом с помощью реактива Сальковского. Для этого бактерии культивировали в течение трех суток на среде LB по Miller с добавлением триптофана (500 мг/л), полученную суспензию центрифугировали (90 с, 13 тыс. об/мин) и фильтровали (0,22 мкм, Millipore). Полученный супернатант смешивали с реагентом Сальковского (500:1000 мкл) и спустя 30 минут проводили измерение оптической плотности (540 нм). Способность бактерий *Pseudomonas* sp. GEOT18 растворять ортофосфаты кальция оценивали путем их культивирования на глюкозоаспаргиновой среде Муромцева с добавлением ортофосфата кальция.

Исследование действия суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 на рост и продуктивность *H. vulgare* проводили на опытном поле Вологодского научного центра РАН в течение вегетационных сезонов 2020 и 2022 гг. Площадь учетной делянки составляла 2 м², повторность опыта – трехкратная. В вегетационные сезоны 2023–2025 гг. полевые исследования были направлены в том числе на оценку совместного действия изучаемого штамма и фосфатных удобрений Суперфосфат (FERTIKA). В 2023 г. минеральные удобрения вносились в количестве 25 и 50 г/м², в 2024 и 2025 гг. – 50 и 100 г/м². Площадь учетной делянки составляла 8 м², повторность опыта – трехкратная. Посев семян осуществлялся с использованием ручной сеялки СОМ-6Р, гербициды и пестициды не вносили.

Почва на опытном участке дерново-подзолистая, среднесуглинистая, содержание аммиачного азота составляет 4,2 ± 0,6 мг/кг, нитратного азота – 38,9 ± 7,8 мг/кг, подвижного калия – 261,0 ± 39,2 мг/кг, подвижного фосфора – 260,0 ± 52,0 мг/кг, pH солевой вытяжки – 6,6 ± 0,1.

Объектом исследования был ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.) сорта Сонет. Семена для исследований были предоставлены сотрудниками СЗНИИМЛПХ (обособленное подразделение ФГБУН ВоЛНЦ РАН).

Погодные условия вегетационных периодов 2020 и 2022–2025 гг. исследования ощущимо отличались между собой и от средних показателей предыдущего периода (2000–2019 гг.): 2020 г. оказался сырьим и прохладным, 2022 г. – теплый и умерено влажный с холодным маев, 2023 г. – теплый с сухим маев и сырьим июлем, 2024 г. – сухим и жарким с холодным маев, 2025 г. – с умеренной первой половиной и жаркой второй половиной сезона.

Обработку растений раствором суспензии изучаемого штамма проводили дважды: инокуляция семян в течение 30 мин перед посевом и опрыскивание филлосферы в фазу кущения. Раствор готовили путем разбавления суспензии (плотность 10⁹ КОЕ/мл) водопроводной водой в соотношении 1:20. Для обработки растений в контрольном варианте по той же схеме использовали воду.

В течение полевых экспериментов 2020 и 2022–2025 гг. в фазах кущения, колошения и цветения растений оценивали морфофизиологические параметры роста: количество побегов и листьев на одном растении, среднюю площадь одного листа и ассимиляционную поверхность растения, сырую и сухую массу, анализ содержания фотосинтетических пигментов. Количество хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях оценивали спектрофотометрическим методом при длинах волн 663, 644 и 452,5 нм, расчет проводили по формулам Реббелена [18]. Работу выполняли в трехкратной биологической и аналитической повторностях. В фазу начала восковой спелости оценивали зерновую продуктивность опытных и контрольных растений, а также количество колосьев ($n = 100$) и массу 1000 зерновок ($n = 3$) [19–20].

Статистическую обработку данных осуществляли по стандартным методикам с использованием пакета анализа данных программы MS Excel'2019 [20]. В таблицах представлены средние значения показателей и их арифметические отклонения. Оценку достоверности различий выборочных средних проводили при значении доверительной вероятности 0,95.

Результаты и обсуждение

Ранее сотрудниками ЯрГУ им. П. Г. Демидова было показано, что штамм *Pseudomonas* sp. GEOT18 способен к трансформации фосфатов путем синтеза органических кислот, а также является ИУК-продуцентом [21]. Собственные лабораторные исследования подтвердили способность бактерий *Pseudomonas* sp. GEOT18 синтезировать ИУК, на третьем стадии культивирования культуральная жидкость содержала $7,87 \pm 0,71$ мг/л ИУК. Кроме того, была выявлена способность данных бактерий к трансформации фосфатов (рис. 1).

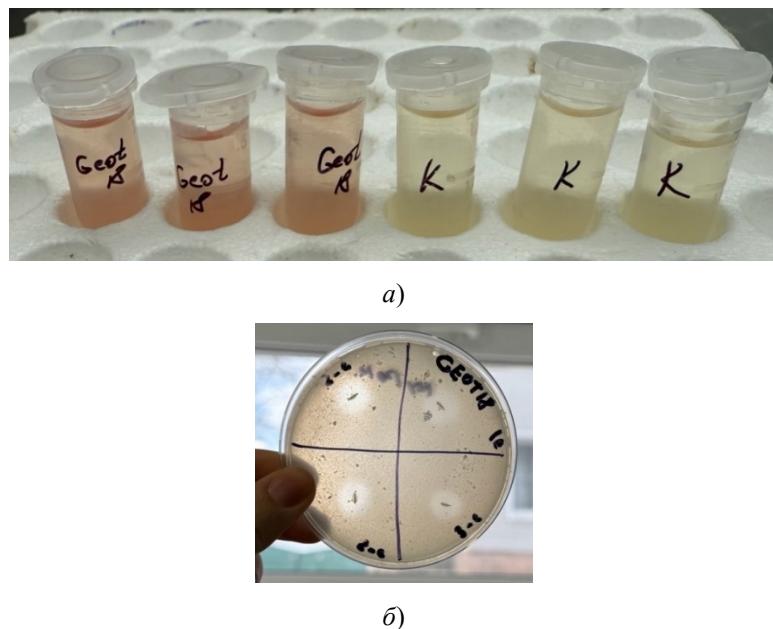


Рис. 1. Результаты исследования потенциала штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 для управления ростом растений:
 α – оценка способности бактерий синтезировать ИУК;
 β – способность бактерий трансформировать фосфаты кальция

Имея существенный потенциал для агропроизводства, суспензия изучаемого штамма оказалась полезной для активации роста растений и повышения их продуктивности. Полевые опыты, проведенные в 2020 и 2022 гг., по изучению действия данной суспензии на рост и продуктивность *H. vulgare* сорта Сонет подтверждают данное предположение [22]. Исследования показали, что внесение суспензии увеличивало ассимиляционную поверхность ячменя в фазу колошения на 21–60 %, в фазу цветения – на 20–57 %. При этом увеличение ассимиляционной поверхности опытных культур происходило путем увеличения площади отдельного листа (различия с контролем в фазу колошения – 17–51 %). Увеличение листовой поверхности на фоне повышения в них содержания фотосинтетических пигментов приводило к значимым изменениям по показателю сухой массы *H. vulgare*, превосходство опытных вариантов над контролем достигает 29–64 % и 70–88 % в фазы колошения и цветения. Темп накопления сухой массы у опытных вариантов *H. vulgare* существенно превосходит контроль независимо от вегетационного периода. Например, в 2020 г. превосходство темпов накопления сухой массы опытного варианта над контролем составило 59–92 %, в 2022 г. – 15–58 % (табл. 1). Более активное накопление сухого вещества опытными растениями сказывалось на повышении зерновой продуктивности *H. vulgare* сорта Сонет в полевых опытах на 20–39 % [22].

Таблица 1

Накопление сухой массы *H. vulgare* в фазах колошения
и цветения относительно фазы кущения, % относительно
показателя сухой массы в фазу кущения

Период вегетации	2020		2022	
	Контроль	Опыт	Контроль	Опыт
Колошение / кущения, %	127	202*	300	344*
Цветение / кущения, %	443	852*	458	722*

* Разница по сравнению с контролем статистически достоверна при $p < 0,05$.

Закономерности, выявленные в полевых опытах 2023–2025 гг., подтверждают способность суспензии изучаемого штамма активизировать рост и повышать продуктивность *H. vulgare* сорта Сонет (табл. 2). Так, в фазу колошения ассимиляционная поверхность опытных вариантов была выше контроля на 13–36 %, при этом значения площади отдельного листа и количества листьев с одного растения возрастали до 13 %.

Учитывая, что ростостимулирующий штамм *Pseudomonas* sp. GEOT18 способен к мобилизации фосфатов (рис. 1), особый интерес представляет изучение его действия на *H. vulgare* сорта Сонет в условиях дополнительного внесения фосфатов. Внесение суспензии штамма в условиях дополнительного фосфорного питания в фазу колошения опыта 2023 г. увеличивало значения данного показателя *H. vulgare* на 40–78 % относительно контроля в условиях, где фосфатные удобрения вносились без суспензии штамма, прибавка относительно контроля достигала 36–43 %. Аналогичная закономерность была выявлена в фазу колошения в опытах 2024 и 2025 гг.: разница с контролем при внесении суспензии штамма и минеральных удобрений максимальна и достигает 69–97 % и 88–103 % соответственно (разница с контролем вариантов с внесением фосфатов без суспензии штамма – 58–81 % и 30–73 % соответственно).

Отметим, что внесение изучаемой суспензии совместно с минеральными удобрениями сказалось и на показателе площади отдельного листа (в 2023 г. пре-восходство над контролем достигало – 35–39 %, в 2024 г. – 46–47 %, в 2025 г. – 26–36 %), и на показателя количества листьев (в 2023 г. превосходство над контролем достигало – 4–36 %, в 2024 г. – 18–35 %, в 2025 г. – 47–48 %).

Таблица 2

Изменение морфометрических показателей *H. vulgare* в фазе колошения

Вариант	Количество побегов на растении, шт.	Количество листьев на растении, шт.	Площадь одного листа, см ²	Площадь всех листьев, см ²
2023				
Контроль	1,1 ± 0,1	8,0 ± 0,5	2,3 ± 0,1	18,3 ± 1,8
Суспензия штамма	1,4 ± 0,1 ^a	8,1 ± 0,5	2,5 ± 0,1	20,7 ± 1,8
Фосфаты 25 г/м ²	1,5 ± 0,1 ^a	8,7 ± 0,4	2,9 ± 0,1 ^a	24,8 ± 1,7 ^a
Суспензия штамма + Фосфаты 25 г/м ²	1,5 ± 0,2 ^a	8,3 ± 0,7	3,1 ± 0,2 ^a	25,7 ± 2,5 ^a
Фосфаты 50 г/м ²	1,5 ± 0,1 ^a	8,8 ± 0,7	3,0 ± 0,1 ^a	26,2 ± 2,2 ^a
Суспензия штамма + Фосфаты 50 г/м ²	2,0 ± 0,2 ^{a; c}	10,9 ± 1,0 ^{a; c}	3,2 ± 0,2 ^a	32,6 ± 2,8 ^{a; c}
2024				
Контроль	1,8 ± 0,2	6,8 ± 0,2	7,2 ± 0,4	48,6 ± 3,3
Суспензия штамма	1,9 ± 0,2	7,3 ± 0,8	8,1 ± 0,3	58,4 ± 5,2 ^a
Фосфаты 50 г/м ²	2,2 ± 0,4	7,5 ± 1,1	10,4 ± 0,5 ^a	76,9 ± 11,7 ^a
Суспензия штамма + Фосфаты 50 г/м ²	2,5 ± 0,3 ^a	8,0 ± 1,0	10,5 ± 0,6 ^a	82,3 ± 11,3 ^a
Фосфаты 100 г/м ²	2,6 ± 0,3 ^a	9,0 ± 1,0 ^a	10,4 ± 0,4 ^a	87,8 ± 8,0 ^a
Суспензия штамма + Фосфаты 100 г/м ²	2,7 ± 0,2 ^a	9,2 ± 0,8 ^a	10,6 ± 0,5 ^a	95,5 ± 8,1 ^a
2025				
Контроль	2,0 ± 0,2	9,3 ± 1,0	9,9 ± 0,5	90,4 ± 10,5
Суспензия штамма	2,8 ± 0,2 ^a	12,0 ± 0,6 ^a	10,1 ± 0,5	122,8 ± 10,1 ^a
Фосфаты 50 г/м ²	2,0 ± 0,2	9,8 ± 1,1	12,4 ± 0,6 ^a	117,5 ± 12,9 ^a
Суспензия штамма + Фосфаты 50 г/м ²	3,3 ± 0,2 ^{a; c}	13,7 ± 0,8 ^{a; c}	12,5 ± 0,6 ^a	170,1 ± 11,9 ^{a; c}
Фосфаты 100 г/м ²	2,8 ± 0,2 ^a	11,7 ± 0,9 ^a	13,5 ± 0,7 ^a	156,0 ± 14,1 ^a
Суспензия штамма + Фосфаты 100 г/м ²	3,2 ± 0,3 ^{a; d}	13,8 ± 0,9 ^{a; d}	13,5 ± 0,6 ^a	183,5 ± 11,9 ^{a; d}

П р и м е ч а н и е: а – разница по сравнению с контролем статистически достоверна при $p < 0,05$; б – разница по сравнению с вариантом, где вносились фосфаты в количестве 25 г/м², статистически достоверна при $p < 0,05$; с – разница по сравнению с вариантом, где вносились фосфаты в количестве 50 г/м², статистически достоверна при $p < 0,05$; д – разница по сравнению с вариантом, где вносились фосфаты в количестве 100 г/м², статистически достоверна при $p < 0,05$.

Наибольших морфометрических показателей достигали варианты с единовременным внесением суспензии штамма и фосфатных удобрений в максимальных дозировках (опыт 2023 г. – 50 г/м², опыты 2024–2025 гг. – 100 г/м²),

а значения ростовых показателей вариантов с внесением суспензии штамма и фосфатных удобрений в меньших количествах (опыт 2023 г. – 25 г/м², опыты 2024–2025 гг. – 50 г/м²) были сопоставимы с вариантами, где вносились только минеральные удобрения в максимальных дозировках (опыт 2023 г. – 50 г/м², опыты 2024–2025 гг. – 100 г/м²).

Учитывая, что ассимиляционная поверхность растений – важнейший физиологический показатель, потенциально указывающий на активацию ростовых процессов и повышение продуктивности растений, можно ожидать наибольшего накопления сухого вещества и зерновой продуктивности *H. vulgare* сорта Сонет в вариантах, где совместно вносились суспензия штамма и фосфатные удобрения в максимальных дозировках. Результаты полевых опытов подтвердили данное предположение: показатель сухой массы в фазу колошения при внесении суспензии штамма и фосфатов в опыте 2023 г. достоверно превышал контроль на 87–93 % (и на 7–16 % превышал вариант с внесением исключительно фосфатных удобрений), в опыте 2024 г. – на 85–93 % (и 10–12 %), в опыте 2025 г. – на 18–44 % (и 2–12 %) соответственно.

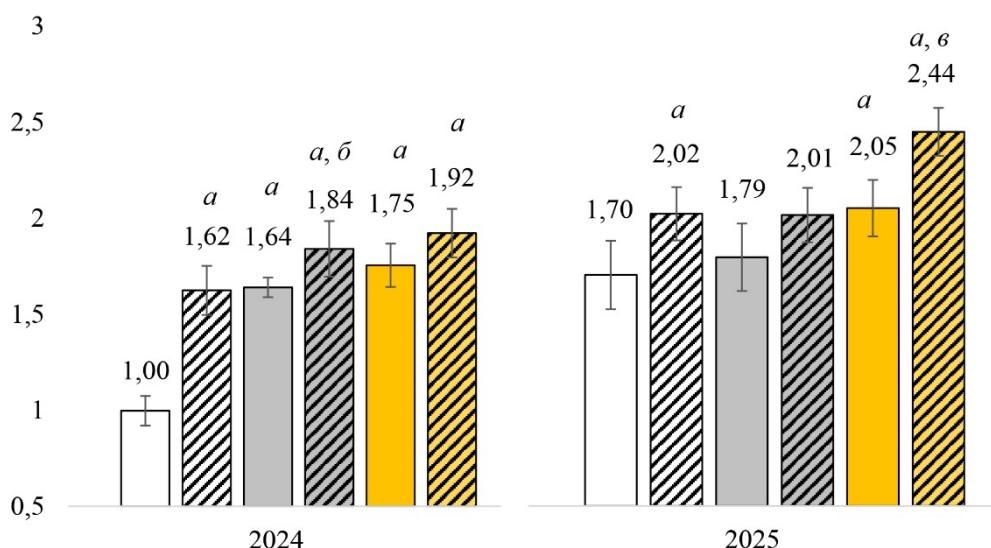


Рис. 2. Сухая масса *H. vulgare* при использовании суспензии *Pseudomonas* sp. GEOT18 и фосфорных удобрений в фазе колошения (2024–2025 гг.):

□ – Контроль; ■ – Суспензия штамма, □ – Фосфат 50 г/м²,
 ■ – Суспензия штамма + Фосфат 50 г/м²; ■ – Фосфат 100 г/м², ■ – Суспензия штамма + Фосфат 100 г/м²: а – разница по сравнению с контролем статистически достоверна при $p < 0,05$; б – разница по сравнению с вариантом, где вносились фосфаты в количестве 50 г/м², статистически достоверна при $p < 0,05$;
 в – разница по сравнению с вариантом, где вносились фосфаты в количестве 100 г/м², статистически достоверна при $p < 0,05$

Результаты полевых опытов 2023–2025 гг. по изучению действия суспензии штамма в присутствии фосфатных удобрений демонстрируют благоприятное действие штамма и на зерновую урожайность *H. vulgare* сорта Сонет (табл. 3).

Таблица 3

Зерновая продуктивность и структура урожая *H. vulgare*
при внесении суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18
совместно с фосфатными удобрениями

Вариант	Количество зерновок в колосе, шт.	Масса 1000 зерновок, г	Зерновая продуктивность	
			ц/га	% отн. контр. (+ %)*
Опыт 2023 г.				
Контроль	17,5 ± 0,2	54,7 ± 2,3	14,2 ± 0,1	—
Суспензия штамма	18,5 ± 0,2 ^a	56,7 ± 1,2	16,5 ± 1,6 ^a	116
Фосфаты 25 г/м ²	18,2 ± 0,2 ^a	57,5 ± 1,0	21,8 ± 0,6 ^a	154
Суспензия штамма + Фосфаты 25 г/м ²	19,0 ± 0,3 ^{a; b}	59,1 ± 0,6 ^a	24,4 ± 0,8 ^{a; b}	172 (+ 12 %)
Фосфаты 50 г/м ²	16,9 ± 0,2	58,6 ± 0,5 ^a	23,0 ± 0,1 ^a	162
Суспензия штамма + Фосфаты 50 г/м ²	17,6 ± 0,2 ^{a; c}	59,1 ± 0,4 ^a	25,1 ± 0,5 ^{a; c}	176 (+ 9 %)
Опыт 2024 г.				
Контроль	20,3 ± 1,0	47,3 ± 1,0	18,8 ± 1,6	—
Суспензия штамма	23,4 ± 1,1 ^a	49,2 ± 0,9	24,5 ± 2,2 ^a	130
Фосфаты 50 г/м ²	17,5 ± 0,3	51,8 ± 0,9 ^a	34,0 ± 3,6 ^a	181
Суспензия штамма + Фосфаты 50 г/м ²	18,5 ± 0,4 ^c	55,0 ± 0,9 ^{a; c}	37,8 ± 4,8 ^a	201 (+ 11 %)
Фосфаты 100 г/м ²	19,4 ± 0,3	53,5 ± 0,7 ^a	37,6 ± 3,0 ^a	200
Суспензия штамма + Фосфаты 100 г/м ²	19,5 ± 0,7	52,2 ± 1,1 ^a	39,3 ± 1,8 ^a	209 (+ 5 %)
Опыт 2025 г.				
Контроль	22,6 ± 1,0	48,7 ± 1,7	26,3 ± 1,4	—
Суспензия штамма	25,7 ± 1,3 ^a	53,0 ± 1,2 ^a	31,1 ± 0,3 ^a	118
Фосфаты 50 г/м ²	30,2 ± 1,6 ^a	51,3 ± 0,5 ^a	47,6 ± 0,7 ^a	181
Суспензия штамма + Фосфаты 50 г/м ²	30,4 ± 1,7 ^a	51,3 ± 0,6 ^a	50,9 ± 1,0 ^{a; c}	193 (+ 7 %)
Фосфаты 100 г/м ²	33,4 ± 1,8 ^a	50,1 ± 1,7	53,3 ± 0,9 ^a	202
Суспензия штамма + Фосфаты 100 г/м ²	39,1 ± 4,5 ^a	54,9 ± 2,2 ^{a; d}	56,0 ± 2,5 ^a	213 (+ 5 %)

П р и м е ч а н и е: а – разница по сравнению с контролем статистически достоверна при $p < 0,05$; б – разница по сравнению с вариантом, где вносились фосфаты в количестве 25 г/м², статистически достоверна при $p < 0,05$; в – разница по сравнению с вариантом, где вносились фосфаты в количестве 50 г/м², статистически достоверна при $p < 0,05$; д – разница по сравнению с вариантом, где вносились фосфаты в количестве 100 г/м², статистически достоверна при $p < 0,05$; * – прибавка (в %) относительно варианта с внесением фосфатов в той же дозировке, но без внесения суспензии штамма.

Активация ростовых процессов растений при внесении суспензии штамма приводит к увеличению зерновой продуктивности на 16–30 %, что согласуется с ранее полученными результатами в опытах 2020 и 2022 гг.

Использование суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 совместно с внесением фосфатных удобрений привело к значимому увеличению зерновой продуктивности относительно контроля: в опыте 2023 г. – на 72–76 %, в опыте 2024 г. – на 101–109 %, в опыте 2025 г. – на 93–113 %, при этом зерновая продуктивность была выше, чем в вариантах с внесением тех же дозировок

фосфатных удобрений на 5–12 %. Отметим, что внесение суспензии штамма, как правило, несколько увеличивало и массу зерновки, и количество зерновок в колосе, а также количество продуктивных растений на единице площади.

Важно, что совместное внесение суспензии штамма и фосфатных удобрений позволяет сократить дозировку внесения удобрений в 2 раза, при этом сохранив активный рост (табл. 2, рис. 2) и высокую зерновую продуктивность (табл. 3) *H. vulgare* сорта Сонет в условиях Нечерноземной зоны России. Вероятно, трансформируя фосфаты, бактерии повышают доступность фосфора для растений, что может оказаться важным механизмом снижения затрат у сельхозтоваропроизводителей.

Таким образом, действие суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 активизирует рост и увеличивает зерновую продуктивность *H. vulgare* сорта Сонет в условиях Нечерноземной зоны России. Вероятно, выявленное действие может быть объяснено как синтезом бактериями ИУК, так и их способностью к трансформации фосфатов в доступную для растений форму. Данное предположение согласуется с результатами, полученными в рамках трехлетнего полевого опыта при изучении действия суспензии штамма совместно с фосфатными удобрениями.

Заключение

Многолетние полевые опыты позволяют утверждать, что суспензия штамма *Pseudomonasspp.* GEOT18 способствует увеличению ассимиляционной поверхности, содержанию фотосинтетических пигментов, накоплению сухой массы в надземных органах, а также повышению зерновой урожайности на 16–39 % *H. vulgare* сорта Сонет в условиях Нечерноземной зоны России.

При действии суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 совместно с фосфатными удобрениями превосходство ростовых процессов и зерновой продуктивности становится достоверно выше контроля. Так, разница по показателю ассимиляционной поверхности достигает 40–103 %, по показателю сухой массы – 18–93 %, по зерновой продуктивности – 72–113 % относительно контроля (и 4–45 %, 2–16 %, 5–12 % относительно вариантов с внесением тех же дозировок фосфатных удобрений, но без использования суспензии штамма).

Действие бактериальной суспензии может быть связано как со способностью бактерий синтезировать ИУК ($7,87 \pm 0,71$ мг/л), так и высвобождать фосфор из нерастворимого фосфата кальция в доступную для растений форму. Полученные результаты позволяют рассматривать суспензию штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 в качестве основы для разработки биопрепарата.

Список литературы

1. Максимов И. В., Сингх Б. П., Черепанова Е. А. [и др.]. Перспективы применения бактерий – продуктов липопептидов для защиты растений (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2020. № 56. С. 19–34. doi: 10.31857/S0555109920010134
2. Лебедев В. Н., Кондрат С. В., Ураев Г. А. Продуктивность яровых культур тритикале и пшеницы при инокуляции семян биопрепаратами // Успехи современного естествознания. 2023. № 11. С. 25–30. doi: 10.17513/use.38138
3. Завалин А. А., Сапожников С. Н., Ньямбоссе Д. Реакция яровой пшеницы на применение азотного удобрения и биопрепараторов // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2022. № 4. С. 50–54. doi: 10.31857/2500-2082/2022/4/50-54

4. Коршунов С. А., Любоведская А., Асатурова А. [и др.]. Закон об органической продукции есть: что меняется в России? // Контроль качества продукции. 2019. № 12. С. 25–31.
5. FAO. Agroecology: From Advocacy to Action: Information Document for the 14th Regular Session of the Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome: FAO, 2015. 11 p. URL: <https://www.fao.org/3/mj261e/mj261e.pdf> (дата обращения: 26.06.2025).
6. Kumari P., Meena M., Gupta P. [et al.]. Plant growth promoting rhizobacteria and their bioprimering for growth promotion in mung bean (*Vignaradiata* (L.) R. Wilczek) // Biocatalysis and agricultural biotechnology. 2018. № 16. P. 163–171. doi: 10.1016/j.bcab.2018.07.030
7. Jain R., Pandey A. A phenazine-1-carboxylic acid producing polyextremophilic *Pseudomonas chlororaphis* (MCC2693) strain, isolated from mountain ecosystem, possesses biocontrol and plant growth promotion abilities // Microbiological research. 2016. Т. 190. P. 63–71. doi: 10.1016/j.micres.2016.04.017
8. Singh P., Singh R. K., Zhou Y. [et al.]. Unlocking the strength of plant growth promoting *Pseudomonas* in improving crop productivity in normal and challenging environments: a review // Journal of Plant Interactions. 2022. № 17. P. 220–238. doi: 10.1080/17429145.2022.2029963
9. Рассохина И. И. Потенциал бактерий рода *Pseudomonas* для использования в растениеводстве // АгроЗооТехника. 2024. Т. 7, № 3. doi: 10.15838/alt.2024.7.3.3
10. Dubeikovsky A. N., Mordukhova E. A., Kochetkov V. T. [et al.]. Growth promotion of blackcurrant softwood cuttings by recombinant strain *Pseudomonas fluorescens* BSP53a synthesizing an increased amount of indole-3-acetic acid // Soil biology and Biochemistry. 1993. № 25. P. 1277–1281. doi: 10.1016/0038-0717(93)90225-Z
11. Бакаева М. Д., Кузина Е. В., Рафиков Г. Ф. [и др.]. Влияние бактерий-деструкторов углеводородов нефти на прорастание и рост растений // Экобиотех. 2019. Т. 2, № 2. С. 175–183.
12. Жардецкий С. С., Путинская А. Я., Храмцова Е. А. Ростостимулирующая активность мутантного штамма бактерий *Pseudomonas mendocina* // Вестник Белорусского государственного университета. 2005. № 3. С. 32–35.
13. Кузьмина Л. Ю., Гуватова З. Г., Ионина В. И. [и др.]. Мобилизация ортофосфата кальция бактериями родов *Advenella* и *Pseudomonas* // Вестник защиты растений. 2016. № 89. С. 90–91.
14. Uzair B., Kausar R., Bano S. A. [et al.]. Isolation and molecular characterization of a model antagonistic *Pseudomonas aeruginosa* divulging in vitro plant growth promoting characteristics // BioMed Research International. 2018. doi: 10.1155/2018/6147380
15. Tiwari P., Singh J. S. A plant growth promoting rhizospheric *Pseudomonas aeruginosa* strain inhibits seed germination in *Triticum aestivum* (L.) and *Zea mays* (L.) // Microbiology Research. 2017. Vol. 8, № 2. P. 7233.
16. Chen Y. P., Rekha P. D., Arun A. B. [et al.]. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities // Applied Soil Ecology. 2006. № 34. P. 33–41. doi: 10.1016/j.apsoil.2005.12.002
17. Vyas P., Gulati A. Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas* // BMC microbiology. 2009. № 9. P. 1–15.
18. Воробьев В. Н., Невмержицкая Ю. Ю., Хуснетдинова Л. З. Якушенкова Т. П. Практикум по физиологии растений : учеб.-метод. пособие. Казань : Казанский университет, 2013. 80 с.
19. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2: Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры / под ред. В. И. Головачева, Е. В. Кириловской. М., 1989. 195 с.
20. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования). М. : Альянс, 2011. 352 с.

21. Bychkova A. A., Zaitseva Y. V., Sidorov A. V. [et al.]. Biotechnological potential of phosphate-solubilizing *Pseudomonas migulae* strain GEOT18 // International Journal of Agricultural Technology. 2022. № 18 (4). P. 1403–1414.
22. Рассокхина И. И., Мараев О. А., Платонов А. В. Ростостимулирующая активность штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 из тубероида орхидеи *Dactylorhizaincarnata* // Известия Иркутского государственного университета. Сер.: Биология. Экология. 2025. Т. 51. С. 3–15. doi: 10.26516/2073-3372.2025.51.3

References

1. Maksimov I.V., Singkh B.P., Cherepanova E.A. et al. Prospects for the use of bacteria – products of lipopeptides for plant protection (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied biochemistry and microbiology*. 2020;(56):19–34. (In Russ.). doi: 10.31857/S0555109920010134
2. Lebedev V.N., Kondrat S.V., Urayev G.A. Productivity of spring crops of triticale and wheat with seed inoculation with biopreparations. *Uspekhi sovremennoego yestestvoznaniya = Advances in modern natural science*. 2023;(11):25–30. (In Russ.). doi: 10.17513/use.38138
3. Zavalin A.A., Sapozhnikov S.N., N'yambose D. Response of spring wheat to the use of nitrogen fertilizers and biopreparations. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki = Bulletin of Russian Agricultural Science*. 2022;(4):50–54. (In Russ.). doi: 10.31857/2500-2082/2022/4/50-54
4. Korshunov S.A., Lyubovedskaya A., Asaturova A. et al. There's a law on organic products: what's changing in Russia? *Kontrol' kachestva produktsii = Product quality control*. 2019;(12):25–31. (In Russ.)
5. FAO. *Agroecology: From Advocacy to Action: Information Document for the 14th Regular Session of the Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture*. Rome: FAO, 2015:11. Available at: <https://www.fao.org/3/mj261e/mj261e.pdf> (accessed 26.06.2025).
6. Kumari P., Meena M., Gupta P. et al. Plant growth promoting rhizobacteria and their bioprimering for growth promotion in mung bean (*Vignaradiata* (L.) R. Wilczek). *Biocatalysis and agricultural biotechnology*. 2018;(16):163–171. doi: 10.1016/j.bcab.2018.07.030
7. Jain R., Pandey A. A phenazine-1-carboxylic acid producing polyextremophilic *Pseudomonas chlororaphis* (MCC2693) strain, isolated from mountain ecosystem, possesses biocontrol and plant growth promotion abilities. *Microbiological research*. 2016;190:63–71. doi: 10.1016/j.micres.2016.04.017
8. Singh P., Singh R.K., Zhou Y. et al. Unlocking the strength of plant growth promoting *Pseudomonas* in improving crop productivity in normal and challenging environments: a review. *Journal of Plant Interactions*. 2022;(17):220–238. doi: 10.1080/17429145.2022.2029963
9. Rassokhina I.I. Potential of *Pseudomonas* bacteria for use in plant production. *AgroZooTekhnika = AgroZooTekhnika*. 2024;7(3). (In Russ.). doi: 10.15838/alt.2024.7.3.3
10. Dubeikovsky A.N., Mordukhova E.A., Kochetkov V.T. et al. Growth promotion of blackcurrant softwood cuttings by recombinant strain *Pseudomonas fluorescens* BSP53a synthesizing an increased amount of indole-3-acetic acid. *Soil biology and Biochemistry*. 1993;(25):1277–1281. doi: 10.1016/0038-0717(93)90225-Z
11. Bakayeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F. et al. The influence of hydrocarbon-degrading bacteria on plant germination and growth. *Ekobiotekh*. 2019;2(2):175–183. (In Russ.)
12. Zhardetskiy S.S., Putinskaya A.Ya., Khramtsova E.A. Growth-promoting activity of a mutant strain of *Pseudomonas mendocina* bacteria. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Belarus State University*. 2005;(3):32–35. (In Russ.)
13. Kuz'mina L.Yu., Guvatova Z.G., Ionina V.I. et al. Mobilization of calcium orthophosphate by bacteria of the genera *Advenella* and *Pseudomonas*. *Vestnik zashchity rasteniy = Plant Protection Bulletin*. 2016;(89):90–91. (In Russ.)

14. Uzair B., Kausar R., Bano S. A. et al. Isolation and molecular characterization of a model antagonistic *Pseudomonas aeruginosa* divulging in vitro plant growth promoting characteristics. *BioMed Research International*. 2018. doi: 10.1155/2018/6147380
15. Tiwari P., Singh J.S. A plant growth promoting rhizospheric *Pseudomonas aeruginosa* strain inhibits seed germination in *Triticum aestivum* (L.) and *Zea mays* (L.). *Microbiology Research*. 2017;8(2):7233.
16. Chen Y.P., Rekha P.D., Arun A.B. et al. Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*. 2006;(34):33–41. doi: 10.1016/j.apsoil.2005.12.002
17. Vyas P., Gulati A. Organic acid production in vitro and plant growth promotion in maize under controlled environment by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. *BMC microbiology*. 2009;(9):1–15.
18. Vorob'yev V.N., Nevmerzhitskaya Yu.Yu., Khusnetdinova L.Z. Yakushenkova T.P. *Praktikum po fiziologii rasteniy: ucheb.-metod. posobiye* = Practical training in plant physiology: textbook. Kazan: Kazanskiy universitet, 2013:80. (In Russ.)
19. Golovachev V.I., Kirillovskaya E.V. (eds.). *Metodika gosudarstvennogo sotoispytaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Vyp. 2: Zernovyye, krupyanye, zernobobovyye, kukuruz i kormovyye kul'tury* = Methodology of state variety testing of agricultural crops. Issue 2: Cereals, grains, legumes, corn and forage crops. Moscow, 1989:195. (In Russ.)
20. Dospelkov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniya)* = Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results). Moscow: Al'yans, 2011:352. (In Russ.)
21. Bychkova A.A., Zaitseva Y.V., Sidorov A.V. et al. Biotechnological potential of phosphate-solubilizing *Pseudomonas* sp. strain GEOT18. *International Journal of Agricultural Technology*. 2022;(18):1403–1414.
22. Rassokhina I.I., Marakayev O.A., Platonov A.V. Growth-promoting activity of the strain *Pseudomonas* sp. GEOT18 from the tuberoid of the orchid *Dactylorhiza incarnata*. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Biologiya. Ekologiya* = Proceedings of Irkutsk State University. Series: Biology. Ecology. 2025;51:3–15. (In Russ.). doi: 10.26516/2073-3372.2025.51.3

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Игоревна Рассокхина

научный сотрудник лаборатории
биоэкономики и устойчивого развития,
Вологодский научный центр
Российской академии наук
(Россия, г. Вологда, ул. Горького, 56а)
E-mail: rasskhinairina@mail.ru

Irina I. Rassokhina

Researcher of the laboratory
of bioeconomics and sustainable development,
Vologda Research Center
of the Russian Academy of Sciences
(56a Gorkogo street, Vologda, Russia)

Олег Анатольевич Маракаев

кандидат биологических наук,
декан факультета биологии и экологии,
Ярославский государственный
университет имени П. Г. Демидова
(Россия, г. Ярославль,
Советский пр-кт, 14)
E-mail: olemar@yandex.ru

Oleg A. Marakaev

Candidate of biological sciences,
dean of the biology and ecology faculty,
P.G. Demidov Yaroslavl State University
(14 Sovetsky avenue, Yaroslavl, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 18.11.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 24.11.2025

Принята к публикации / Accepted 11.12.2025