



Серия «Биология. Экология»
2025. Т. 51. С. 3–15
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiabio.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 581.14+579.64+633.16
<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.51.3>

Ростостимулирующая активность штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 из тубероида орхидеи *Dactylorhiza incarnata*

И. И. Рассохина¹, О. А. Маракаев², А. В. Платонов^{1,3*}

¹Вологодский научный центр РАН, г. Вологда, Россия

²Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, г. Ярославль, Россия

³Вологодский институт права и экономики ФСИН России, г. Вологда, Россия

E-mail: rasskhinairina@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты лабораторных и полевых экспериментов, выполненных с целью оценить стимулирующее влияние бактерий *Pseudomonas* на рост и продуктивность зерновых культур. Проанализирована способность *Pseudomonas* sp. штамма GEOT18, выделенного из тубероидов орхидеи *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, колонизировать ризосферу растений ячменя *Hordeum vulgare* L. сорта Сонет, влиять на их морфофизиологические параметры в разные фазы вегетации, на содержание фотосинтетических пигментов в листьях и характеристики зерновой продуктивности ячменя. Обсуждаются перспективы биопрепарата, созданного на основе изучаемого штамма.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare*, *Pseudomonas*, штамм, рост, продуктивность, фотосинтетические пигменты.

Для цитирования: Рассохина И. И., Маракаев О. А., Платонов А. В. Ростостимулирующая активность штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 из тубероида орхидеи *Dactylorhiza incarnata* // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2025. Т. 51. С. 3–15. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.51.3>

Research article

Growth-Stimulating Activity of *Pseudomonas* sp. Strain GEOT18 from the Tuberoide Orchid *Dactylorhiza incarnata*

I. I. Rassokhina¹, O. A. Marakaev², A. V. Platonov^{1,3*}

¹Vologda Research Center RAS, Vologda, Russian Federation

²P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russian Federation

³Vologda Institute of Law and Economics of the Federal Penitentiary Service of Russia, Vologda, Russian Federation

Abstract. Currently, microorganisms that can increase agricultural crop yields, particularly bacteria of the *Pseudomonas* genus, are generating interest as an alternative to chemical intensification agents in agricultural production. The growth-promoting effect of these bacteria is associated with the synthesis of various metabolites, which can possess signaling and phytohormonal activity, increase nu-

trient availability for plants, stimulate systemic resistance, or suppress the development of phytopathogens. The aim of our work was to evaluate the possibility of using a suspension of *Pseudomonas* sp. GEOT18 strain, isolated from the tuberosoids of *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó (Orchidaceae), for cultivating *Hordeum vulgare* L. The study included an evaluation of the bacterial colonization potential (laboratory trial) and its effect on the growth and productivity (field trials) of barley variety Sonet. The laboratory trial was carried out by soil culture method, the evaluation of colonization capacity included the search for PA-GS and PsEG genes in barley rhizosphere samples. For the control in the laboratory study, a cell culture of the studied strain grown on Miller's LB medium was used. In the field experiment, the bacterial suspension was applied twice: through pre-sowing seed soaking and by spraying the phyllosphere during the tillering phase. We determined the morphophysiological and production parameters of barley during the growing season. At the beginning of the waxy ripeness stage, the final grain yield of the experimental and control plants was determined, and the yield structure was assessed (number of kernels per ear and the weight of 1,000 kernels). The results of the laboratory experiment demonstrate the presence of the PA-GS and PsEG genes both in the pure GEOT18 culture sample and in the barley rhizosphere sample 11 days after seed inoculation and planting. This indicates the ability of the studied bacteria to successfully colonize the barley root system after pre-sowing seed treatment. The field research shows that *Pseudomonas* sp. GEOT18 strain contributes to an increase in leaf surface area, photosynthetic pigment content, dry weight, and net photosynthetic productivity of barley. For instance, the dry weight of the Sonet barley variety increased by 29–64 % at the heading stage and by 70–88 % at the flowering stage following the application of the bacterial suspension. Grain productivity of the experimental variants of *H. vulgare* variety Sonet exceeded the control by 20–40 %. It can be assumed that a preparation based on this strain will be highly effective, considering that the studied bacteria are able to establish themselves in the barley rhizosphere.

Keywords: *Hordeum vulgare*, *Pseudomonas*, strain, growth, productivity, photosynthetic pigments.

For citation: Rassokhina I.I., Marakaev O.A., Platonov A.V. Growth-Stimulating Activity of *Pseudomonas* sp. Strain GEOT18 from the Tu-beroid Orchid *Dactylorhiza incarnata*. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2025, vol. 51, pp. 3–15. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.51.3> (in Russian)

Введение

В настоящее время в России ассортимент биологических удобрений, пестицидов и регуляторов роста растений по сравнению с химическими крайне недостаточен. Например, доля сельскохозяйственных организаций европейского севера России, где применяются биологические методы защиты растений, составляет всего 9,4 % [Иванов, 2023]. При этом в официальных государственных документах¹ отмечается важность и необходимость развития экологически чистого агропроизводства.

Серьёзный интерес в качестве альтернативы химическим средствам интенсификации агропроизводства вызывают микроорганизмы, способные повышать урожайность сельскохозяйственных культур, в частности, бактерии рода *Pseudomonas*, многих представителей которого относят к бактериям PGPR-группы (Plants Growth-Promoting Rhizobacteria). Имеются данные, что почвы, на которых используются препараты с PGPR-бактериями, требуют на 50–80 % меньше вклада химических веществ, что повышает возможности для ведения экологически чистого сельского хозяйства и сохранения устой-

¹ О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации : указ Президента РФ от 28 февр. 2024 г. № 145 // Гарант : справочная правовая система. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408518353/> ; Стратегия развития производства органической продукции до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 4 июля 2023 г. № 1788-р // Там же. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407297286/>

чивых систем земледелия [Максимов, Абизгильдина, Пусенкова, 2011; Plant ... , 2018; Whole ... , 2021; Sun, Shahrajabian, Soleymani, 2024]. PGPR-бактерии синтезируют разнообразные метаболиты, которые обладают сигнальной и фитогормональной активностью, способностью увеличивать доступность элементов питания для сельскохозяйственных культур, а также стимулировать системную устойчивость или угнетать развитие грибных и бактериальных фитопатогенов [Максимов, Абизгильдина, Пусенкова, 2011; Sah, Krishnani, Singh, 2021; Investigating ... , 2024; Lazarus, Easwaran, 2024]. Эти свойства свидетельствуют о высоком потенциале бактерий с точки зрения разработки на их основе биопрепаратов сельскохозяйственного назначения. Однако, чтобы отнести штамм к эффективным PGPR-организмам, он должен обладать способностью к успешной колонизации корней, что позволит бактериям успешно закрепиться в ризосфере. Стоит отметить, что многие неудачи в исследованиях стимулирования роста растений в полевых условиях часто связаны именно с недостаточной колонизацией бактериями корней [Pyroloquinoline ... , 2008; Whole ... , 2021].

Для оценки стимулирующей способности бактерий хорошо подходит ячмень обыкновенный *Hordeum vulgare* L. – важнейшая хозяйственно значимая культура мирового земледелия и одна из основных, возделываемых на территории северо-запада России. Так, в Вологодской области на долю ячменя приходится 17–19 % посевных площадей². Актуальность производства *H. vulgare* обусловлена широкими возможностями использования и его адаптационными способностями [Влияние ... , 2022].

Цель настоящей работы – оценить действие суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18, изолированного из тубероида орхидеи *Dactylorhiza incarnata*, на ростовые и продуктивные показатели ячменя *Hordeum vulgare*.

Материалы и методы

Объектом исследования послужили растения ячменя сорта Сонет, который допущен к возделыванию на территории Северо-Западного региона.

Бактерии *Pseudomonas* sp. GEOT18 выделены из внутренних тканей стеблекорневых тубероидов генеративных особей *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó в лаборатории молекулярной генетики и биотехнологии Ярославского госуниверситета. Штамм идентифицирован с помощью молекулярно-генетического анализа нуклеотидной последовательности гена 16S рРНК, а полученная последовательность депонирована в базу данных GenBank (MT180656). Ранее показано, что этот штамм способен к синтезу индолилуксусной кислоты (ИУК) (до 21,1 мг/л), а также обладает способностью активировать растворение и транспортировку минеральных компонентов, в том числе фосфора [Biotechnological potential ... , 2022]. Суспензию штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 получали на среде LB в условиях постоянного пе-

² Посевные площади сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий Вологодской области // Федеральная служба государственной статистики. 2024. URL: <https://35.rosstat.gov.ru/sel%27skoe%20hozyajstvo>

ремешивания (160 об/мин) при температуре 24 °С в течение 16–18 ч (плотность клеток достигала $2,5 \times 10^9$ КОЕ/мл). В исследовании использовался раствор, который получали путём разбавления суспензии водопроводной водой в соотношении 1:20.

Для оценки возможности штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 колонизировать корни ячменя был поставлен лабораторный опыт методом почвенной культуры в лаборатории ВолНИЦ РАН. В качестве субстрата использовали грунт с содержанием питательных элементов в 1 литре не менее: $\text{NH}_2 + \text{NO}_3$ – 150 мг, P_2O_5 – 270 мг, K_2O – 300 мг; кислотность – 6,0–6,5. Почвогрунт перед использованием стерилизовали в паровом стерилизаторе ГКа-25 ПЗ (Касимовский приборный завод, Россия) при температуре 121 °С. Опыт проводили в двух вариантах: 1 – внесение бактерий путём предпосевного замачивания посевного материала в суспензии, 2 – внесение бактерий путём опрыскивания филлосферы. Культивирование растений в рамках опыта осуществляли в климатостате КС-200 (Смоленское СКТБ СПУ, Россия) при температуре 23 °С днём и 17 °С ночью, освещении 16 ч в сутки.

Оценку колонизационной способности осуществляли по присутствию ДНК *Pseudomonas* sp. (гены PA-GS и PsEG) в образцах ризосферы ячменя с применением реакции ПЦР и гель-электрофореза. В качестве контрольного гена присутствия бактериальной ДНК был выбран ген Eub338-518 (размер фрагмента 180 п. н.). ПЦР-исследования образцов ризосферы ячменя проводили в молекулярно-генетической лаборатории ООО «Биотроф» (г. Санкт-Петербург). Образцы из почвенной культуры отбирали в стерильные пробирки на 7-е и 11-е сут. после инокуляции и посева в грунт (вариант 1), а также на 1-е и 4-е сут. после внесения суспензии штамма путём опрыскивания филлосферы (вариант 2). В качестве контроля использовали культуру клеток изучаемого штамма, выращенную на среде LB по Miller. Выбор сроков отбора растительных проб для оценки способности бактерий колонизировать ризосферу ячменя был обусловлен следующими факторами:

- на 7-е сут. после инокуляции и посева в грунт растения ячменя достигают фазы проростка;

- на 11-е сут. после инокуляции и посева в грунт растения достаточно развились, титр бактерий при условии их успешной колонизации, вероятно, должен соответствовать пороговому значению выбранного метода;

- на 1-е сут. после внесения суспензии штамма путём опрыскивания филлосферы (12-е сутки после инокуляции и посева в грунт растения) планировалось оценить способность бактерий успешно и быстро мигрировать в ризосферу ячменя;

- на 4-е сут. после внесения суспензии штамма путём опрыскивания филлосферы (15-е сут. после инокуляции и посева в грунт растения) растения достигают максимальных размеров в условиях климатической камеры, далее условия культивирования оказывают лимитирующее действие на их рост.

Исследования действия суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 на рост и продуктивность *H. vulgare* проводили при постановке опыта на экспериментальном участке ВолНИЦ РАН в течение вегетационных периодов

2020 и 2022 гг. Площадь учётной делянки составляла 2 м², повторность опыта – трёхкратная. Посев культур и уход за ними осуществляли вручную, дополнительно минеральные удобрения, гербициды и пестициды не вносили. Обработку растений суспензией штамма проводили дважды: перед посевом (инокуляция семян в течение 30 мин.) и в фазу кушения (опрыскивание филлосферы до появления капель мелкодисперсной росы). Для обработки растений в контрольном варианте по той же схеме использовали воду.

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

Среднемесечная температура в мае 2020 и 2022 гг. была ниже средних многолетних значений на 2–3 °C (9,0 и 8,0 °C соответственно), при этом количество осадков в мае 2020 г. превзошло средние значения втрое (137 мм). В период активного роста растений в оба года температура соответствовала норме (16 °C в июне и 17,0–19,2 °C в июле), по количеству осадков от других лет отличался июль 2020 г., в котором этот показатель был превышен более чем вдвое (142 мм). Август 2020 г. оказался прохладным (14,1 °C) и умеренно влажным (71 мм), а 2022 г. – жарким (19,3 °C) и сухим (27 мм).

В рамках исследования проводили оценку морфофизиологических параметров растений опытной и контрольной групп. Для этого в фазах кушения, колошения и цветения оценивали количество побегов и листьев на одном растении, среднюю площадь одного листа (путём измерения длины и ширины листовой пластинки) и суммарную ассимиляционную поверхность растений. Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) в листьях определяли спектрофотометрическим методом при длинах волн 663, 644 и 452,5 нм, в качестве растворителя использовали 85%-ный ацетон, расчёт проводили по формулам Реббелена [Гавриленко, Жигалова, 2003]. На основании полученных данных по содержанию фотосинтетических пигментов и ассимиляционной поверхности растения проводили расчёт содержания пигментов на единицу площади листа. Также оценивали сырую и сухую массу надземной части растения, приросты сухой массы и чистую продуктивность фотосинтеза [Ничипорович, 1956]. В фазу начала восковой спелости определяли зерновую продуктивность опытных и контрольных растений, а также количество зерновок в колосе ($n = 50$) и массу 1000 зерновок ($n = 5$)³ [Доспехов, 2011].

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

³ Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2. Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры / ред. В. И. Головачев, Е. В. Кириловская. М., 1989. 195 с.

Результаты и обсуждение

Результаты определения присутствия генов PA-GS и PsEG в образцах, полученных в рамках постановки лабораторного опыта по оценке способности штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 колонизировать ризосферу ячменя сорта Сонет, отражены на рис. 1.

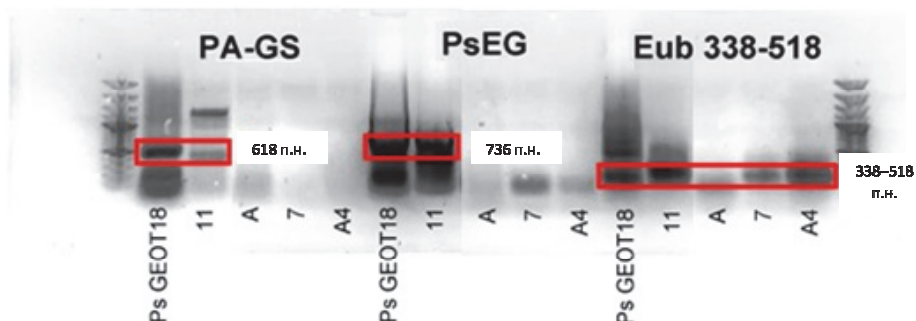


Рис. 1. Результаты гель-электрофоретического определения присутствия генов PA-GS и PsEG *Pseudomonas* sp. в образцах ризосферы ячменя. Размер фрагмента PA-GS – 618 п. н., PsEG – 736 п. н., Eub 338-518 – 180 п. н.

Полученные данные демонстрируют присутствие генов *Pseudomonas* в образце с культурой GEOT18 (контроль) и образце ризосферы ячменя, полученной на 11-е сут. после инокуляции семян и посадки в грунт. Это указывает на способность изучаемых бактерий успешно колонизировать корневую систему ячменя при предпосевном замачивании семян. Отметим, что в образце ризосферы, полученном на 7-е сут. после инокуляции семян и посева их в грунт, искомые бактерии не обнаружены (или их содержание ниже предела обнаружения – 1000 клеток/г). Аналогичная ситуация наблюдалась и в варианте 2, где отсутствовало предпосевное замачивание семян в суспензии штамма (растения опрыскивали по филлосфере суспензией штамма). Вероятно, именно инокуляция семян суспензией позволила бактериям *Pseudomonas* sp. GEOT18 закрепиться и развиваться в количестве выше предела обнаружения в ризосфере ячменя на 11-е сут. после посева.

Одним из наиболее значимых физиологических параметров, связанным с продуктивностью фотосинтеза и отражающим рост растений, является сухая масса. При вегетации в 2020 г. её значения у надземной части ячменя в фазе кущения находятся на уровне контроля (различия в пределах 3 %), в фазу колошения растения опытного варианта превосходят контроль на 29 %, в фазу цветения различия возрастают и достигают 70 %. По показателю сырой массы картина в целом аналогична. В опыте 2022 г. уже в фазу кущения наблюдаются достоверные различия по значениям сухой массы у опытных и контрольных растений (превышение на 42 %), в фазу колошения и цветения различия, аналогично результатам 2020 г., возрастают относительно фазы кущения и составляют 64 и 88 % соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Морфофизиологические параметры растений ячменя *H. vulgare* в процессе вегетации

Параметр	Год эксперимента			
	2020		2022	
	Контроль	Опыт	Контроль	Опыт
<i>Кущение</i>				
Количество побегов на растении, шт.	1,3±0,09	1,2±0,08	1,1±0,08	1,3±0,11
Количество листьев на растении, шт.	5,6±0,18	5,7±0,23	6,9±0,10	7,4±0,23
Площадь одного листа, см ²	3,1±0,16	2,9±0,11	3,1±0,19	5,2±0,22*
Площадь всех листьев растения, см ²	17,5±0,27	17,7±1,16	21,8±1,40	36,5±1,94*
Сырая масса надземных органов растения, г	0,70±0,024	0,68±0,023	0,91±0,084	1,65±0,101*
Сухая масса надземных органов растения, г	0,159±0,0013	0,150±0,0010	0,297±0,0211	0,423±0,0244*
<i>Колошение</i>				
Количество побегов на растении, шт.	1,5±0,17	1,6±0,15	1,3±0,10	1,5±0,11
Количество продуктивных побегов на растении, шт.	1,2±0,11	1,3±0,09	1,2±0,09	1,3±0,11
Количество листьев на растении, шт.	8,0±0,51	8,3±0,48	8,7±0,18	9,2±0,29
Площадь одного листа, см ²	3,4±0,18	4,3±0,20*	3,9±0,12	5,9±0,13*
Площадь всех листьев растения, см ²	27,3±2,03	33,0±2,30	33,3±0,93	53,2±0,99*
Сырая масса надземных органов растения, г	1,20±0,078	1,74±0,202*	1,44±0,119	2,31±0,164*
Сухая масса надземных органов растения, г	0,352±0,0394	0,453±0,0542*	0,543±0,0460	0,888±0,0667*
<i>Цветение</i>				
Количество побегов на растении, шт.	1,6±0,13	1,6±0,09	1,3±0,11	1,5±0,13
Количество продуктивных побегов на растении, шт.	1,3±0,11	1,4±0,10	1,2±0,09	1,3±0,10
Количество листьев на растении, шт.	8,0±0,24	8,2±0,22	8,2±0,25	9,0±0,29
Площадь одного листа, см ²	3,6±0,18	4,2±0,17*	3,8±0,14	5,4±0,16*
Площадь всех листьев растения, см ²	28,9±1,47	34,7±1,84	30,7±1,09	48,2±1,63*
Сырая масса надземных органов растения, г	4,85±0,150	5,77±0,250*	3,29±0,297	6,25±0,431*
Сухая масса надземных органов растения, г	0,841±0,0532	1,428±0,1152*	0,975±0,0935	1,833±0,1374*

Примечание для табл. 1–3: * – разница по сравнению с контролем статистически достоверна при $p < 0,05$.

Площадь ассимиляционной поверхности – важнейший параметр, определяющий потенциальную продуктивность растений. Показано, что после внесения суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 в фазу кущения у растений ассимиляционная поверхность в условиях эксперимента 2020 г. остаётся на уровне контроля, в 2022 г. опытный вариант достоверно превосходит контрольные значения на 67 %. В фазу колошения значения средней площади листа у растений опытных вариантов в оба года исследования превышали контрольные на 27–51 %, а по общей площади – на 21–60 %. В фазу цветения выявленная картина сохраняется: различия в 2020 г. достигают 17–20 %, в 2022 г. – 42–57 %. В результате проведённых исследований выявлено, что внесение суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 увеличивает площадь листовой поверхности ячменя, однако не оказывает значительного действия на число побегов и листьев (различия с контролем статистически недостоверны).

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений отражает потенциальную энергообеспеченность фотосинтеза. В фазу кущения опытных растений в 2020 г. уровень фотосинтетических пигментов в листьях ячменя был выше контроля на 54–57 %, в опыте 2022 г. различия достигали 25 %. В фазу колошения в 2020 г. разница между контрольными и опытными растениями по содержанию пигментов в листьях уменьшается (16–33 %), в 2022 г., наоборот, увеличивается (40–42 %). В фазу цветения в листьях растений опытного варианта содержание хлорофилла *a* было больше, чем у растений контрольного варианта, на 25 и 54 %, хлорофилла *b* – на 41 и 41 %, каротиноидов – на 28 и 42 % соответственно в 2020 и 2022 гг. (табл. 2).

Таблица 2

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях ячменя *H. vulgare*, мг/г сырой массы

Параметр		Год эксперимента			
		2020		2022	
		Контроль	Опыт	Контроль	Опыт
<i>Кущение</i>					
Хлорофиллы	<i>a</i>	0,61±0,067	0,95±0,052*	0,36±0,049	0,45±0,019*
	<i>b</i>	0,19±0,018	0,30±0,024*	0,18±0,017	0,20±0,035
	<i>a+b</i>	0,81±0,085	1,25±0,075*	0,54±0,036	0,65±0,019*
	<i>a/b</i>	3,1±0,06	3,2±0,10	2,4±0,44	2,8±0,43
Каротиноиды		0,37±0,037	0,58±0,036*	0,28±0,007	0,28±0,005
<i>Колошение</i>					
Хлорофиллы	<i>a</i>	1,13±0,092	1,31±0,073	0,50±0,053	0,70±0,026*
	<i>b</i>	0,35±0,055	0,47±0,025*	0,15±0,015	0,21±0,015*
	<i>a+b</i>	1,34±0,173	1,77±0,098*	0,64±0,067	0,91±0,041*
	<i>a/b</i>	2,3±0,23	2,8±0,03*	3,4±0,12	3,5±0,14
Каротиноиды		0,56±0,099	0,74±0,028*	0,30±0,023	0,40±0,007*
<i>Цветение</i>					
Хлорофиллы	<i>a</i>	1,28±0,057	1,60±0,125*	0,61±0,006	0,94±0,081*
	<i>b</i>	0,41±0,018	0,58±0,063*	0,29±0,015	0,41±0,048*
	<i>a+b</i>	1,69±0,075	2,18±0,188*	0,90±0,017	1,35±0,124*
	<i>a/b</i>	3,1±0,01	2,9±0,12	2,2±0,11	2,4±0,11
Каротиноиды		0,77±0,015	0,98±0,058*	0,36±0,007	0,51±0,031*

Индекс отношения хлорофиллов *a/b* свидетельствует о степени сформированности фотосинтетического аппарата и активности хлорофилла *a* [Титова, 2010], увеличение значения индекса может указывать на более интенсивный фотосинтез. В нашем исследовании индекс отношения хлорофиллов *a/b* в листьях опытных растений в фазу кущения превышал соответствующий показатель в контроле на 3–17 %, в фазу колошения – на 3–22 %.

Содержание фотосинтетических пигментов в единице площади листа (см²), характеризующее способность поглощать солнечную энергию, у опытных растений в оба года исследования существенно превышает контрольные значения в течение всего срока вегетации (рис. 2).

Так, различия значений опытного и контрольного вариантов в 2020 г. составили 25–56 %, в 2022 г. – 4–102 %. При этом в 2020 г. разница между значениями опытного и контрольного вариантов в процессе вегетации уменьшалась, а в 2022 г., напротив, увеличивалась (см. рис. 2).

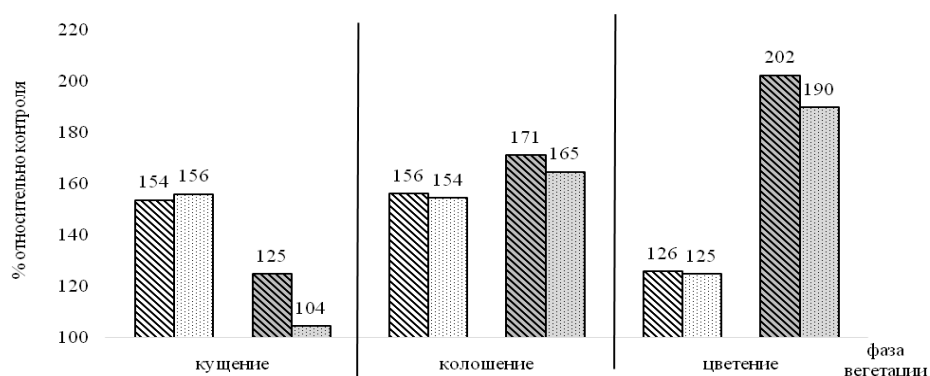


Рис. 2. Содержание фотосинтетических пигментов в единице площади листа ячменя *H. vulgare*, % относительно контроля:

□ – 2020 г.; ■ – 2022 г.; ▨ – сумма хлорофиллов а и b; ░ – каротиноиды

Значения площади ассимиляционной поверхности, содержания фотосинтетических пигментов, индекса отношения хлорофиллов *a/b* в листьях ячменя при действии суспензии штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 превышают показатели в контрольных вариантах на всём протяжении вегетации, что свидетельствует о потенциально большей продуктивности опытных растений относительно контроля.

Важным параметром, характеризующим накопление сухой массы единицей площади листа в течение вегетации, является чистая продуктивность фотосинтеза. У растений опытных вариантов она выше в фазу кушения на 3–34 %, колошения – на 15–79 %, цветения – на 49–66 % по отношению к контролю (рис. 3).

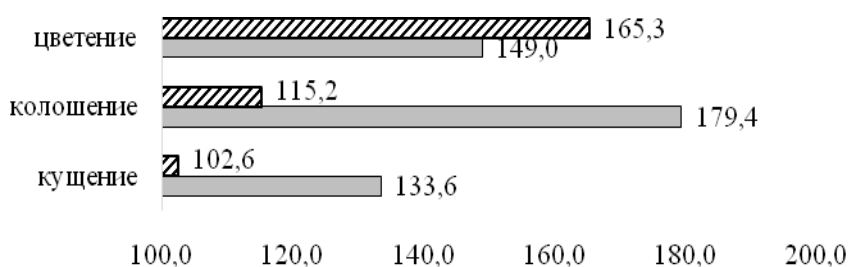


Рис. 3. Динамика чистой продуктивности фотосинтеза у ячменя *H. vulgare* в процессе вегетации, % относительно контроля: ▨ – 2020 г.; ■ – 2022 г.

Выявленная картина указывает на более активное накопление сухой массы опытными растениями. Можно полагать, что наблюдаемый ростостимулирующий эффект связан со способностью бактерий исследуемого штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18 синтезировать ИУК [Biotechnological ... , 2022]. Отметим, что аналогичное действие этого штамма нами было выявлено и для

других зерновых культур в условиях Вологодской области [Рассохина, Платонов, 2021; Рассохина, Платонов, Платонов, 2022].

Наблюдаемые различия по ряду морфофизиологических параметров у ячменя в опытном и контрольном вариантах согласуются и с его зерновой продуктивностью (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики зерновой продуктивности ячменя *H. vulgare*

Показатель	Год эксперимента			
	2020		2022	
	Контроль	Опыт	Контроль	Опыт
Количество зерновок в колосе, шт.	17,5±0,2	18,5±0,2*	16,2±0,2	18,4±0,9
Масса 1000 зерновок, г	53,4±1,3	54,9±1,3	50,1±1,1	54,6±1,3*
Масса зерна с одного растения, г	0,93	1,12	0,89	1,21
Масса зерна, г/м ²	223,4	267,9	216,1	302,5

В фазе восковой спелости у опытных растений наряду с увеличением массы зерновки (на 3–9 %) отмечено большее число продуктивных побегов (до 10 %) и зерновок в колосе (на 6–14 %). К завершению вегетации масса зерна у опытных растений и их урожайность с квадратного метра увеличились по отношению к контролю на 20–40 % в зависимости от года постановки эксперимента (см. табл. 3).

Заключение

Полученные данные свидетельствуют, что суспензию штамма *Pseudomonas* sp. GEOT18, изолированного из тубероида *D. incarnata*, можно использовать в качестве основы биопрепарата для стимулирования роста и повышения зерновой урожайности *H. vulgare* в условиях Вологодской области. Двукратное внесение бактерий способствовало увеличению общей листовой поверхности растений в фазу цветения на 20–57 %, содержания фотосинтетических пигментов – на 25–54 % и чистой продуктивности фотосинтеза – на 49–66 %. Это одновременно способствовало увеличению сухой массы, что наблюдалось в полевых опытах (сухая масса опытных растений в фазу цветения превышала контроль на 70–88 %). Наблюдаемый ростостимулирующий эффект может быть связан как со способностью бактерий исследованного штамма синтезировать ИУК, так и высвобождать фосфор из нерастворимого трифосфата кальция. Активация роста при использовании суспензии штамма оказывала влияние и на зерновую продуктивность *H. vulgare*, которая превосходила контроль на 20–40 %.

Кроме того, результаты показывают, что бактерии *Pseudomonas* sp. GEOT18 способны закрепляться в ризосфере ячменя и, следовательно, эффективность препарата, созданного на основе этого штамма, может быть достаточно высокой.

Список литературы

Влияние агрометеорологических изменений климата на зерновую продуктивность ярового ячменя в условиях Нечерноземной зоны РФ / О. В. Левакова, И. А. Дедушев,

Л. М. Ерошенко, М. М. Ромахин, А. Н. Ерошенко, Н. А. Ерошенко, М. А. Болдырев, О. В. Гладышева // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17, № 1 (62). С. 128–135.

Гавриленко В. Ф., Жигалова Т. В. Большой практикум по фотосинтезу. М.: Академия, 2003. 256 с.

Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования). М.: Альянс, 2011. 352 с.

Иванов В. А. Стратегия развития сельского хозяйства Европейского Севера России. Сыктывкар: Принт, 2023. 140 с.

Максимов И. В., Абизгильдина Р. Р., Пусенкова Л. И. Стимулирующие рост растений микроорганизмы как альтернатива химическим средствам защиты от патогенов // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47, № 4. С. 373–385.

Ничипорович А. А. Фотосинтез и теория получения высоких урожаев. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 94 с.

Рассохина И. И., Платонов А. В. Действие бактерий рода *Pseudomonas* sp. на биологическую и хозяйственную продуктивность пшеницы мягкой в условиях Вологодской области // Int. Agric. J. 2021. Т. 4, № 5. С. 37–49.

Рассохина И. И., Платонов А. В., Платонов А. А. Действие бактерий рода *Pseudomonas* sp. на рост и продуктивность тритикале // Вестник КрасГАУ. 2022. № 1(178). С. 93–99. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-1-93-99>

Титова М. С. Содержание фотосинтетических пигментов в хвое *Picea abies* и *Picea koraiensis* // Вестник ОГУ. 2010. № 12. С. 9–12.

Biotechnological potential phosphate-solubilizing *Pseudomonas migulae* strain GEOT18 / A. A. Bychkova, Y. V. Zaitseva, A. V. Sidorov, A. S. Aleksandrova, O. A. Marakaev // IJAT. 2022. Vol. 18, N 4. P. 1403–1414.

Lazarus H. P. S., Easwaran N. Molecular insights into PGPR fluorescent *Pseudomonads* complex mediated intercellular and interkingdom signal transduction mechanisms in promoting plant's immunity // Res. Microbiol. 2024. Vol. 175, Is. 7. 104218. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2024.104218>

Investigating the genomic and metabolic abilities of PGPR *Pseudomonas fluorescens* in promoting plant growth and fire blight management / M. Mankoti, N. K. Pandit, S. S. Meena, A. Mohanty // Mol. Genet. Genomics. 2024. N 299. 110. <https://doi.org/10.1007/s00438-024-02198-3>

Plant growth promoting rhizobacteria and their biopriming for growth promotion in mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) / P. Kumari, M. Meena, P. Gupta, M. K. Dubey, G. Nath, R. Upadhyay // Biocatal. Agric. Biotechnol. 2018. Vol. 16. P. 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.030>

Pyrrroloquinoline quinone is a plant growth promotion factor produced by *Pseudomonas fluorescens* B16 / O. Choi, J. Kim, J. G. Kim, Y. Jeong, J. S. Moon, C. S. Park, I. Hwang // Plant Physiol. 2008. Vol. 146, Is. 2. P. 657–668. <https://doi.org/10.1104/pp.107.112748>

Sah S., Krishnani S., Singh R. *Pseudomonas* mediated nutritional and growth promotional activities for sustainable food security // Curr. Res. Microb. Sci. 2021. Vol. 2. Art. N 100084. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100084>

Sun W., Shahrajabian M. H., Soleymani A. The Roles of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)-Based Biostimulants for Agricultural Production Systems // Plants. 2024. Vol. 13, Is. 5. Art. N 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>

Whole genome analysis of sugarcane root-associated endophyte *Pseudomonas aeruginosa* B18-A plant growth-promoting bacterium with antagonistic potential against *Sporisorium citamini* / P. Singh, R. K. Singh, D.-J. Guo, A. Sharma, R. N. Singh, D.-P. Li, M. K. Malviya, X.-P. Song, P. Lakshmanan, L.-T. Yang, Y.-R. Li // Front. Microbiol. 2021. Vol. 12. Art. N 628376. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628376>

References

Levakova O.V., Dedushev I.A., Yeroshenko L.M., Romakhin M.M., Yeroshenko A.N., Yeroshenko N.A., Boldyrev M.A., Gladysheva O.V. Vliyanie agrometeorologicheskikh izmenenii klimata na zernovuyu produktivnost' yarovogo yachmenya v usloviyakh Nechernozemnoi zony RF [The influence of agrometeorological climate changes on the grain productivity of spring barley in the

conditions of the Non-Chernozem Zone of the Russian Federation]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye* [South of Russia: Ecology, Development], 2022, no. 17 (62), pp. 128-135. (in Russian)

Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V. *Bolshey praktikum po fotosintezu* [Large workshop on photosynthesis]. Moscow, Akademiya Publ., 2003, 256 p. (in Russian)

Dospikhov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniya)* [Field experience methodology (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow, Alyans Publ., 2011, 352 p. (in Russian)

Ivanov V.A. *Strategiya razvitiya selskogo khozyaystva Yevropeyskogo Severa Rossii* [Strategy for the development of agriculture in the European North of Russia]. Syktyvkar, Print Publ., 2023, 140 p. (in Russian)

Maksimov I.V., Abizgildina R.R., Pusenkova L.I. Stimuliruyushhie rost rastenij mikroorganizmy kak alternativa khimicheskim sredstvam zashhity ot patogenov [Microorganisms that stimulate plant growth as an alternative to chemical means of protection against pathogens.]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2011, vol. 47, no. 4, pp. 373-385. (in Russian)

Nichiporovich A.A. *Fotosintez i teoriya polucheniya vysokikh urozhayev* [Photosynthesis and the theory of obtaining high yields]. Moscow, AS USSR Publ., 1956, 94 p. (in Russian)

Rassokhina I.I., Platonov A.V. Deystviye bakteriy roda *Pseudomonas* sp. na biologicheskuyu i khozyaystvennuyu produktivnost pshenitsyagkoy v usloviyakh Vologodskoy oblasti [The effect of bacteria of the genus *Pseudomonas* sp. on the biological and economic productivity of soft wheat in the conditions of the Vologda region]. *Int. Agric. J.*, 2021, vol. 64, no. 5, pp. 37-49. (in Russian)

Rassokhina I.I., Platonov A.V., Platonov A.A. Deystviye bakteriy roda *Pseudomonas* sp. na rostiproduktivnost' triticales [Effect of bacteria of the genus *Pseudomonas* sp. on the growth and productivity of triticales]. *Bulletin of KSAU*, 2022, no. 1(178), pp. 93-99. (in Russian) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-1-93-99>

Titova M.S. Soderzhaniye fotosinteticheskikh pigmentov v khvoye *Picea abies* i *Picea koraiensis* [Content of photosynthetic pigments in the needles of *Picea abies* and *Picea koraiensis*]. *Vestnik Orenburg St. Univ.*, 2010, no. 12, pp. 9-12. (in Russian)

Bychkova A.A., Zaitseva Y.V., Sidorov A.V., Aleksandrova A.S., Marakaev O.A. Biotechnological potential of phosphate-solubilizing *Pseudomonas migulae* strain GEOT18. *IJAT*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 1403-1414.

Lazarus H.P.S., Easwaran N. Molecular insights into PGPR fluorescent *Pseudomonads* complex mediated intercellular and interkingdom signal transduction mechanisms in promoting plant's immunity. *Res Microbiol.*, 2024, vol. 175, is. 7, 104218. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2024.104218>

Mankoti M., Pandit N.K., Meena S.S., Mohanty A. Investigating the genomic and metabolic abilities of PGPR *Pseudomonas fluorescens* in promoting plant growth and fire blight management. *Mol. Genet. Genomics*, 2024, no. 299, 110. <https://doi.org/10.1007/s00438-024-02198-3>

Kumari P., Meena M., Gupta P., Dubey M.K., Nath G., Upadhyay R. Plant growth promoting rhizobacteria and their biopriming for growth promotion in mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek). *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 2018, vol. 16, pp. 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.cbac.2018.07.030>

Choi O., Kim J., Kim J.G., Jeong Y., Moon J.S., Park C.S., Hwang I. Pyrroloquinoline quinone is a plant growth promotion factor produced by *Pseudomonas fluorescens* B16. *Plant Physiol.*, 2008, vol. 146, is. 2, pp. 657-668. <https://doi.org/10.1104/pp.107.112748>

Sah S., Krishnani S., Singh R. *Pseudomonas* mediated nutritional and growth promotional activities for sustainable food security. *Curr. Res. Microb. Sci.*, 2021, vol. 2, 100084. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100084>

Sun W., Shahrajabian M. H., Soleymani A. The Roles of Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)-Based Biostimulants for Agricultural Production Systems. *Plants*, 2024, vol. 13, is. 5, 613. <https://doi.org/10.3390/plants13050613>

Singh P., Singh R.K., Guo D.-J., Sharma A., Singh R.N., Li D.-P., Malviya M.K., Song X.-P., Lakshmanan P., Yang L.-T., Li Y.-R. Whole genome analysis of sugarcane root-associated endophyte *Pseudomonas aeruginosa* B18-A plant growth-promoting bacterium with antagonistic potential against *Sporisorium citamini*. *Front. Microbiol.*, 2021, vol. 12, 628376. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628376>

Сведения об авторах

Рассохина Ирина Игоревна

научный сотрудник
Вологодский научный центр РАН
Россия, 160014, г. Вологда, ул. Горького, 56а
e-mail: rasskhinairina@mail.ru

Маракаев Олег Анатольевич

кандидат биологических наук, доцент
Ярославский государственный университет
им. П. Г. Демидова
Россия, 150003, г. Ярославль, ул. Советская,
14
e-mail: marakaev@uniyar.ac.ru

Платонов Андрей Викторович

кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник
Вологодский научный центр РАН
Россия, 160014, г. Вологда, ул. Горького, 56а
доцент
Вологодский институт права и экономики
ФСИН России
Россия, 160002, г. Вологда, ул. Щетинина, 2
e-mail: platonov70@yandex.ru

Information about the authors

Rassokhina Irina Igorevna

Research Scientist
Vologda Research Center RAS
56A, Gorky st., Vologda, 160014,
Russian Federation
e-mail: rasskhinairina@mail.ru

Marakaev Oleg Anatolyevich

Candidate of Science (Biology),
Associate Professor
P. G. Demidov Yaroslavl State University
14, Sovetskaya st., Yaroslavl, 150003,
Russian Federation
e-mail: marakaev@uniyar.ac.ru

Platonov Andrei Viktorovich

Candidate of Science (Biology),
Leading Research Scientist
Vologda Research Center RAS
56A, Gorky st., Vologda, 160014,
Russian Federation
Associate Professor
Vologda Institute of Law and Economics of the
Federal Penitentiary Service of Russia
2, Schetinin st., Vologda, 160002,
Russian Federation
e-mail: platonov70@yandex.ru