

Влияние Zn-солюбилизирующих PGP-ризобактерий на рост и содержание биогенных элементов в сеянцах пшеницы озимой в условиях микрокосма

Г. Г. Борисова¹, М. Г. Малева^{1✉}, М. Дарказанли¹, А. В. Собенин², М. Ю. Карпухин³

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

³ Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ E-mail: maria.maleva@mail.ru

Аннотация. Одним из наиболее перспективных подходов к решению проблемы сбалансированного питания населения является биофортификация растительного сырья и продуктов растениеводства. **Цель исследования** – оценить влияние двух селективных штаммов Zn-солюбилизирующих ростстимулирующих ризобактерий на морфофизиологические характеристики сеянцев *Triticum aestivum* L. (пшеница мягкая озимая, сорт Еланчик) и содержание в них биогенных элементов. **Методы.** Изучены ростстимулирующие свойства двух штаммов PGPR: *Pantoea* sp. STF1 и *Pseudomonas* sp. STF13, выделенных из ризосферной почвы *Tussilago farfara* L. (мать-и-мачеха обыкновенная, сем. Asteraceae). В модельных условиях выполнена оценка морфофизиологических характеристик сеянцев пшеницы при инокуляции этими штаммами. Растения выращивали в горшечных культурах в течение 18 суток в контролируемых условиях: фотопериод 14 : 10 (день : ночь), температура 25 ± 2 °С. Оценивали процент всхожести семян и индекс энергии сеянцев. По окончании эксперимента определяли надземную и подземную биомассу пшеницы, содержание в листьях фотосинтетических пигментов, накопление в побегах макро- (азота, фосфора, калия) и микро-элементов (цинк, железо), а также их содержание в почве. **Результаты.** Доказана способность изученных штаммов ризобактерий солюбилизовать недоступные соединения цинка и фосфора, продуцировать сидерофоры, индолил-3-уксусную кислоту и аммиак. Установлено, что инокулирование семян пшеницы селективными штаммами PGPR повышало индекс энергии сеянцев (на 25 % по сравнению с контролем), способствовало увеличению их биомассы и содержания фотосинтетических пигментов, а также биогенных элементов. **Научная новизна.** Впервые выполнена оценка ростстимулирующей активности и биофортификационного потенциала двух новых штаммов ризобактерий, выделенных на территории Уральского региона, и доказана возможность их использования для улучшения роста сеянцев пшеницы и обогащения биогенными элементами.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., PGP-ризобактерии, фотосинтетические пигменты, биофортификация, макро- и микроэлементы

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00292, <https://rscf.ru/project/23-26-00292/>

Для цитирования: Борисова Г. Г., Малева М. Г., Дарказанли М., Собенин А. В., Карпухин М. Ю. Влияние Zn-солюбилизирующих PGP-ризобактерий на рост и содержание биогенных элементов в сеянцах пшеницы озимой в условиях микрокосма // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 12. С. 1636–1647. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-12-1636-1647>.

Дата поступления статьи: 23.09.2024, **дата рецензирования:** 22.10.2024, **дата принятия:** 05.11.2024.

Effect of Zn-solubilizing PGP-rhizobacteria on growth and content of biogenic elements in winter wheat seedlings under microcosm conditions

G. G. Borisova¹, M. G. Maleva^{1✉}, M. Darkazanli¹, A. V. Sobenin², M. Yu. Karpukhin³

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

³Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: maria.maleva@mail.ru

Abstract. One of the most promising approaches to solving the problem of balanced nutrition of the population is biofortification of plant materials and products. **The purpose** of the study was to evaluate the effect of two selective strains of Zn-solubilizing growth-stimulating rhizobacteria on the morphophysiological characteristics of *Triticum aestivum* L. seedlings (soft winter wheat, variety Elanchik) and the content of biogenic elements in them. **Methods.** The growth-stimulating properties of two PGPR strains were studied: *Pantoea* sp. STF1 and *Pseudomonas* sp. STF13, isolated from the rhizosphere soil of *Tussilago farfara* L., Asteraceae family. Under model conditions, the morphophysiological characteristics of wheat seedlings inoculated with these strains were assessed. The plants were grown in pot cultures for 18 days under controlled conditions: photoperiod 14 : 10 (day : night), temperature 25 ± 2 °C. The percentage of seed germination and seedling energy index were estimated. At the end of the experiment, the aboveground and underground biomass of seedlings, the content of photosynthetic pigments in leaves, macro- (nitrogen, phosphorus, potassium) and microelements (zinc, iron) in shoots were determined. **Results.** The ability of the studied rhizobacteria strains to solubilize inaccessible zinc and phosphorus compounds, to produce siderophores, indole-3-acetic acid and ammonia was proven. It was found that inoculation of wheat seeds with selective PGPR strains increased the seedling energy index (by 25 % compared to the control), contributed to an increase in their biomass, photosynthetic pigment content as well as the concentration of biogenic elements in seedlings and soil. **Scientific novelty.** For the first time, an assessment of the growth-stimulating activity and biofortification potential of two new rhizobacteria strains isolated in the Ural region was performed, and the possibility of their use for improving the growth of wheat seedlings and enriching them with biogenic elements was proven.

Keywords: *Triticum aestivum* L., PGP-rhizobacteria, photosynthetic pigments, biofortification, macro- and microelements

Acknowledgements. The study was supported and funded by Russian Science Foundation, Project No. № 23-26-00292, <https://rscf.ru/project/23-26-00292/>

For citation: Borisova G. G., Maleva M. G., Darkazanli M., Sobenin A. V., Karpukhin M. Yu. Effect of Zn-solubilizing PGP-rhizobacteria on growth and content of biogenic elements in winter wheat seedlings under microcosm conditions. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (12): 1636–1647. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-12-1636-1647>. (In Russ.)

Date of paper submission: 23.09.2024, **date of review:** 22.10.2024, **date of acceptance:** 05.11.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Одной из актуальных проблем современности, имеющей существенное значение как для развивающихся, так и для развитых стран, является несбалансированное питание населения [1–3].

Дефицит эссенциальных элементов, витаминов, антиоксидантов и других биологически активных соединений в пищевых продуктах вызывает риски многих заболеваний, связанных с нарушением обмена веществ [4–6]. Важной составляющей здорового образа жизни является ежедневное употребление микрорзелени и зеленых культур, содержащих

клетчатку, витамины, макро- и микроэлементы и т. д. Обогащение рациона человека такими веществами является одним из наиболее эффективных способов обеспечения населения полноценными и сбалансированными продуктами [2; 4; 7].

В настоящее время одним из наиболее перспективных подходов к решению проблемы «скрытого голода» является биофортификация, или обогащение растительного сырья и продуктов растениеводства дефицитными макро- и микроэлементами, а также биологически активными соединениями и антиоксидантами [1; 2; 8].

Особый интерес представляет микробиологическая биофортификация, которая предполагает использование бактерий для повышения биологической ценности сырья и пищевых продуктов [9–11]. Наиболее перспективное направление в этой области – подбор и применение широкого спектра эндофитных и ризосферных бактерий, стимулирующих рост растений (от англ. Plant Growth Promoting, PGP), которые увеличивают биодоступность макро- и микроэлементов в почве, способствуют поглощению питательных веществ, росту растений и повышают их устойчивость к абиотическим и биотическим стрессовым факторам [12–14].

Цинк (Zn) и железо (Fe) относятся к минеральным элементам, которых чаще всего не хватает в рационе человека, при этом их дефицит представляет серьезную угрозу для здоровья населения во всем мире [1; 5; 6].

Цинк – жизненно важный микроэлемент для растений, поскольку является кофактором большого количества ферментов, участвующих во многих биохимических путях [8]. Дефицит цинка приводит к значительным потерям урожайности сельскохозяйственных культур и снижению его поступления в пищевой рацион, что может вызвать задержку роста, нарушение моторного развития и когнитивных функций человека [1; 5; 8]. Проблемы, связанные с неполноценным питанием из-за дефицита цинка, имеют системный характер и вызывают серьезную озабоченность по всему миру [5; 6]. Цинк-соллюбилизирующие PGP-ризобактерии (PGPR) могут помочь преодолеть нехватку этого микроэлемента, превращая нерастворимые соединения цинка в доступные для растений [11; 14–16].

Железо также является важным микроэлементом для всех живых организмов. Дефицит железа в рационе человека является основной причиной анемии и вызывает нарушение когнитивного развития, снижение иммунитета и др. [17–19]. В аэробных условиях этот элемент встречается преимущественно в форме трехвалентного иона (Fe^{3+}), который часто образует нерастворимые гидроксиды, недоступные как для растений, так и для некоторых микроорганизмов [12; 19]. Однако ряд бактерий обладает механизмами, с помощью которых они могут получать недоступное железо, включая продуцирование различных форм низкомолекулярных хелаторов Fe, известных как сидерофоры. Эти вещества обладают высоким сродством к связыванию с трехвалентным Fe. При этом они образуют стабильные комплексы на плазматической мембране корня, где Fe^{3+} восстанавливается до Fe^{2+} и поступает в клетку через белки-переносчики [12].

Поэтому особенно перспективными для биообогащения растительного сырья цинка и железа являются PGPR, обладающие такими возможностями, как соллюбилизация недоступных для растений

форм цинка, фосфора и т. д., а также продуцирование сидерофоров и фитогормонов [12; 14].

В последние годы исследователями многих стран проведены эксперименты по оценке эффективности использования Zn-соллюбилизирующих PGP-бактерий для улучшения роста сельскохозяйственных культур и их биообогащения [9; 11; 14–16]. Имеются также данные об исследованиях, направленных на изучение роли сидерофор-продуцирующих бактерий в стимулировании роста разных видов культурных растений [17–19]. Так, например, была доказана возможность использования некоторых штаммов *Bacillus subtilis*, продуцирующих сидерофоры, для биообогащения железом, улучшения роста и урожайности арахиса [17]. Выделены и изучены бактерии рода *Thiobacillus*, которые могут усиливать Fe-биообогащение соевых бобов в известняковой почве с повышенным уровнем сульфата железа [18].

Однако, несмотря на проявленный интерес со стороны ученых разных стран к данной тематике, микробиологическая биофортификация не получила широкого распространения, а эффекты использования Zn-соллюбилизирующих и сидерофор-продуцирующих PGPR на морфофизиологические характеристики культурных растений и накопление биогенных элементов остаются мало изученными.

Цель исследования – изучить влияние двух селективных штаммов Zn-соллюбилизирующих PGPR на морфофизиологические характеристики семян *Triticum aestivum* L. (пшеница мягкая озимая, сорт Еланчик) и содержание в них биогенных элементов.

Методология и методы исследования (Methods)

Два штамма PGPR – *Pantoea* sp. STF1 и *Pseudomonas* sp. STF13 – были выделены из ризосферной почвы растения *Tussilago farfara* L., Asteraceae (мать-и-мачеха обыкновенная), произрастающего на территории Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения, в 9 км к северо-востоку от г. Режа Свердловской области. В конце мая 2023 г. цветущие растения *T. farfara* были аккуратно выкопаны, а ризосферная почва была собрана в пластиковые пакеты, перенесена в лабораторию и хранилась в холодильнике при 4 °С.

Для проверки способности выделенных штаммов к соллюбилизации недоступных форм цинка изоляты были помещены на солевой агар (Mineral Salt Medium, MSM) с добавлением 0,1 % одной из трех нерастворимых форм цинка: $ZnCO_3$, $Zn_3(PO_4)_2$ или ZnO в течение 2 дней при 28 °С [20]. Зона ореола вокруг колонии бактерий подтверждала соллюбилизацию цинка. Эффективность Zn-соллюбилизации рассчитывали как отношение диаметра соллюбилизированной зоны (гало + колония) к диаметру колонии, умноженное на 100 %.

Продукцию сидерофоров оценивали с использованием хромазурол S (Fe-CAS) агара [21]. Среду

помещали в чашки Петри и инокулировали по 5 мкл молодой культуры (10^8 КОЕ/мл) бактерий. Планшеты инкубировали при 28 °С в течение 5–9 дней, до момента обнаружения галозоны, свидетельствующей о способности бактерий продуцировать сидерофоры. Эффективность продукции сидерофоров рассчитывали как отношение диаметра солюбилизированной зоны (гало + колония) к диаметру колонии $\times 100$ %.

Для определения способности выделенных штаммов к солюбилизации фосфатов бактерии инкубировали на жидкой среде NBRIP (National Botanical Research Institute's phosphate growth medium). В качестве контроля использовали среду NBRIP без добавления бактерий. Солюбилизация фосфатов подтверждалась появлением желтого цвета после взаимодействия бактерий с ванадомolibденовым реагентом и измерялась при 420 нм с помощью спектрофотометра UV-Vis (Tecan, Thermo Scientific, США). В качестве стандарта для построения калибровочной кривой использовали растворимую форму фосфата KH_2PO_4 [21].

Продукцию индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) оценивали по появлению розового цвета после добавления реагента Сальковского к свежеприготовленным культурам бактерий (10^8 КОЕ/мл) и измеряли при 530 нм [21]. Для построения калибровочной кривой использовали коммерческую ИУК (Sigma-Aldrich, Германия).

Способность к продукции аммиака определяли по изменению цвета с желтого на красновато-коричневый после инкубации свежеприготовленного бактериального инокулята (10^8 КОЕ/мл) с реактивом Несслера [21].

В качестве модельного вида растений была выбрана *Triticum aestivum* L., Gramineae (пшеница мягкая озимая, сорт Еланчик). Эксперимент по оценке влияния Zn-солюбилизирующих PGPR на морфофизиологические показатели *T. aestivum* проводили в двух независимых повторах (апрель – май 2023 года).

Эксперимент включал 3 варианта: контрольный (без инокуляции) и опытные – с использованием пшеницы, семена которой были инокулированы PGPR-штаммами STF1 и STF13. Зрелые семена, сходные по размеру и форме, подвергали поверхностной стерилизации (70-процентным этанолом в течение 30 с, затем 2 минуты 4-процентным гипохлоритом натрия), промывали стерильной дистиллированной водой и инокулировали отобранными штаммами PGPR в течение 2 часов. Культуры бактерий предварительно выращивали на среде Лурия – Бергана (LB), затем отделяли от нее центрифугированием и разводили в стерильной дистиллированной воде до оптической плотности 10^8 КОЕ/мл.

Семена высаживали на предварительно дважды автоклавированный (130 °С) нейтрализован-

ный низинный торфяной субстрат (производитель ГК «Селигер-Агро», Тверь, Россия) в пластиковые контейнеры объемом 3 л (по 150 семян в каждый, 3 контейнера на один вариант). Физико-химические свойства исходного субстрата: pH $5,42 \pm 0,01$, удельная электропроводность – $716,25 \pm 4,53$ мкСм/см, общее содержание солей – $342,0 \pm 7,7$ мг/л. Растения выращивали в фитокамерах в следующих контролируемых условиях: освещенность – 180 ± 20 мкмоль/м² с, обеспечиваемая фитолампами (ULI-P10-18W/SPFR IP40); фотопериод 14 : 10 (день : ночь), температура 25 ± 2 °С.

Общее время выращивания семян пшеницы составляло 18 дней. Характеристики прорастания определяли согласно В. Kumar с соавторами [22]. Процент всхожести семян рассчитывали как отношение количества проросших семян к их общему количеству, умноженное на 100 %. В конце эксперимента побеги отделяли от корней, промывали дистиллированной водой и измеряли сырую и сухую биомассу. Индекс энергии (vigor index) семян рассчитывали как произведение процента всхожести и их сухой биомассы (г).

Фотосинтетические пигменты экстрагировали из свежих листьев (50 мг) в 80-процентном растворе ацетона. Содержание хлорофиллов *a*, *b* (Хл *a*, Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически (APEL PD-303UV, Япония) при 470, 647 и 663 нм [23] и рассчитывали в мг на 1 г сухого веса.

Общее содержание азота и фосфора в надземной биомассе определяли после мокрого озоления сухого растительного материала смесью концентрированных серной и хлорной кислот (10 : 1, по объему). Содержание азота в растительных образцах определяли на планшетном спектрофотометре (Infinite 200 PRO, Tecan, Австрия) при 400 нм после проведения реакции с реактивом Несслера [24]. Содержание общего фосфора в биомассе определяли при 660 нм после проведения реакции с молибдатом аммония в кислой среде [24]. Содержание общего калия, цинка и железа в побегах семян измеряли на атомно-абсорбционном спектрометре AA240FS (Varian Australia Pty Ltd., Австралия) после озоления 70-процентной азотной кислотой (осч).

Содержание общего азота в почвенных образцах после завершения эксперимента определяли методом мокрого озоления по Кьельдалю (с использованием Heating Digestor DK 20 Velp и Distillation Unit UDK 127 Velp, Италия) и титриметрическим окончанием. Содержание подвижного фосфора в почве определяли спектрофотометрически (UV Probe-1650, Япония) [25].

Содержание доступных форм калия, цинка и железа в почве определяли при помощи атомно-абсорбционного спектрометра AA240FS (Varian Australia Pty Ltd., Австралия) после экстракции 2,5 г почвы в 50 мл 5-процентной HNO_3 (осч).

Измерения сырой и сухой биомассы семян пшеницы проводили в трехкратной биологической и 20-кратной аналитической повторностях. Определение содержания пигментов в листьях и биогенных элементов (N, P, K, Zn и Fe) в побегах проводили в четырехкратной повторности из композитных навесок каждого варианта опыта. Содержание биогенных элементов в сухих почвенных образцах определяли в трехкратной повторности из композитных проб. Данные двух независимых экспериментов усреднялись. Полученные результаты анализировали с использованием компьютерных программ Excel 16.0 и Statistica 13.0. После оценки нормальности распределения, значимость различий между вариантами оценивали с использованием апостериорного критерия Дункана (Duncan's test) для множественного сравнения. На рисунках и в таблицах представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки, разными латинскими буквами обозначены достоверные различия между вариантами при $p < 0,05$.

Результаты (Results)

В таблице 1 представлены основные PGP-свойства изученных штаммов. Ризобактерии *Pseudomonas* sp. STF13 продемонстрировали способность солубилизовать все три формы нерастворимых соединений цинка, в то время как *Pantoea* sp. STF1 растворяли только оксид и карбонат цинка. Отобранные штаммы были способны к фосфат-солубилизации, продукции сидерофоров, ИУК и аммиака. Наибольшей эффективностью цинк- и фосфат-солубилизации отличался штамм STF13, в то время как продукцией сидерофоров – STF1 (таблица 1). Таким образом, оба штамма продемонстрировали наличие ярко выраженных PGP-свойств, а следовательно, способность положительно влиять на рост растений и их биомассу.

Наблюдения за прорастанием семян пшеницы, проводимые в течение первых 120 часов, показали, что у семян, инокулированных штаммом STF1, динамика всхожести была аналогична контрольным значениям, в то время как при использовании штамма STF13 шла с небольшой задержкой (рис. 1, а).

На 5-е сутки вегетации всхожесть неинокулированных семян, а также семян, инокулированных STF1, составляла 100 %, тогда как в случае заражения STF13 – 96 % (рис. 1, а). Индекс энергии инокулированных семян был на 25 % выше по сравнению с контролем, причем его максимальным значением отличались STF1-инокулированные семена (рис. 1, б).

Средняя величина сырой и сухой надземной биомассы инокулированных семян пшеницы была выше по сравнению с контрольными растениями на 15 и 12 % соответственно (рис. 1, в, г). Однако заражение семян PGPR в большей степени влияло на биомассу корней, которая была на 48 % выше, чем в контроле (рис. 1, в, г).

Продуктивность культурных растений в значительной степени определяется состоянием их фотосинтетического аппарата, важными компонентами которого являются фотосинтетические пигменты [23]. Исследование показало, что наибольшее количество хлорофиллов было характерно для пшеницы, семена которой инокулировали штаммом STF13, а каротиноидов – штаммом STF1 (соответственно на 14 и 17 % выше, чем в контроле, рис. 2). Отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам в среднем составляло 7,8. Максимальным значением этого соотношения отличались растения, инокулированные штаммом STF13, а минимальным – STF1, поскольку в этом случае у растений отмечено более высокое содержание каротиноидов (рис. 2).

Таблица 1
Основные PGP-характеристики изученных штаммов ризобактерий

Штамм	Эффективность Zn-солубилизации*, %			Эффективность продукции сидерофоров*, %	Фосфат-солубилизация ¹ , мг PO ₄ ³⁻ /л	Синтез ИУК ¹ , мг/л
	ZnO	ZnCO ₃	Zn ₃ (PO ₄) ₂			
<i>Pantoea</i> sp. STF1	200	220	CO	310	115,3 ± 8,5	10,3 ± 1,0
<i>Pseudomonas</i> sp. STF13	186	350	375	270	289,2 ± 11,1	14,3 ± 0,3

Примечание. * Отношение диаметра солубилизированной зоны (гало + колония) к диаметру колонии × 100 %.

¹ Среднее арифметическое значение ± стандартная ошибка (n = 3). CO – солубилизация отсутствует.

Table 1
Main PGP-characteristics of the rhizobacteria strains studied

Strain	Efficiency of Zn solubilization*, %			Efficiency of siderophore production*, %	Phosphate solubilization ¹ , mg PO ₄ ³⁻ /l	IAA production ¹ , mg/l
	ZnO	ZnCO ₃	Zn ₃ (PO ₄) ₂			
<i>Pantoea</i> sp. STF1	200	220	NS	310	115.3 ± 8.5	10.3 ± 1.0
<i>Pseudomonas</i> sp. STF13	186	350	375	270	289.2 ± 11.1	14.3 ± 0.3

Note. * Ratio of solubilized zone diameter (halo + colony) to the colony diameter × 100 %. ¹ Mean value ± standard error (n = 3).

NS – not solubilization.

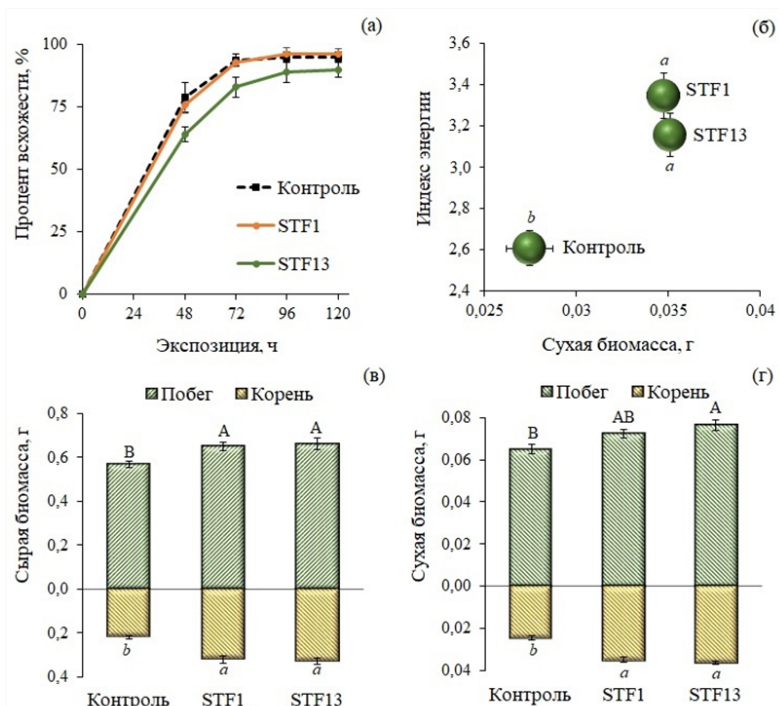


Рис. 1. Процент всхожести семян (а), индекс энергии (б), сырая (в) и сухая (г) биомасса сеянцев пшеницы

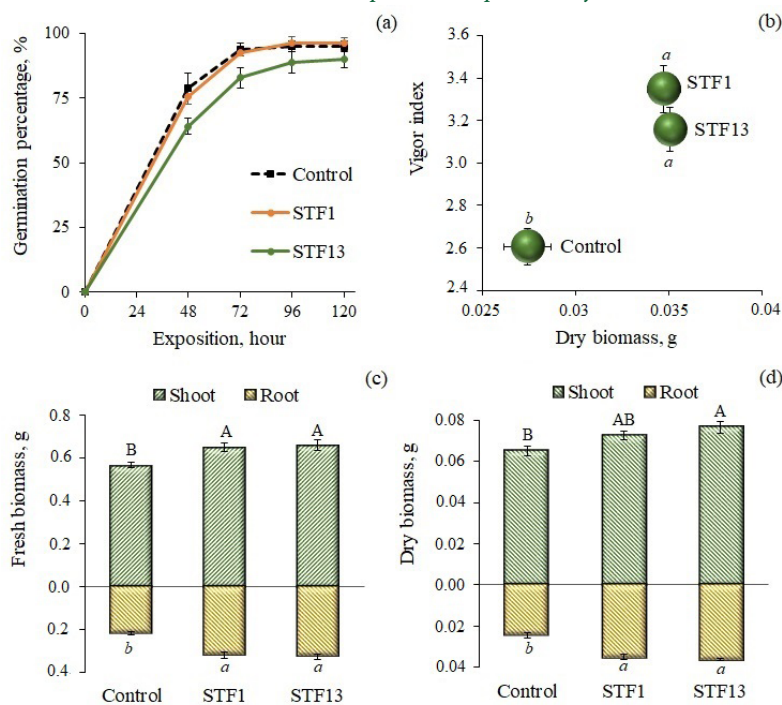


Fig. 1. Percentage of seed germination (a), vigor index (b), raw (c) and dry (d) biomass of wheat seedlings

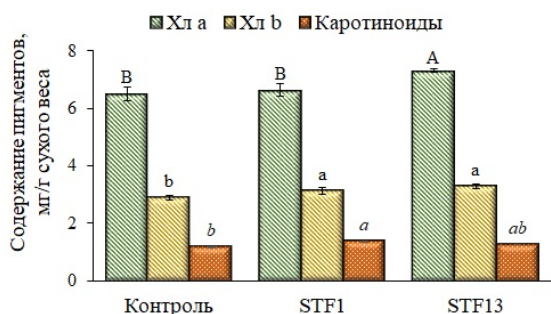


Рис. 2. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях сеянцев пшеницы

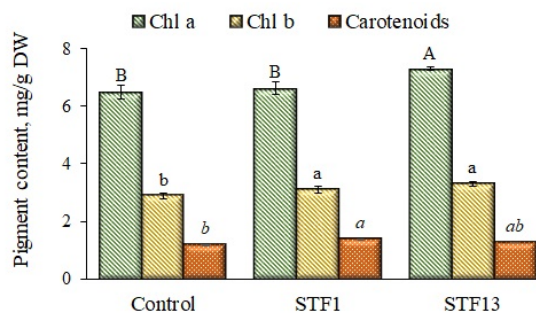


Fig. 2. Content of photosynthetic pigments in the leaves of wheat seedlings

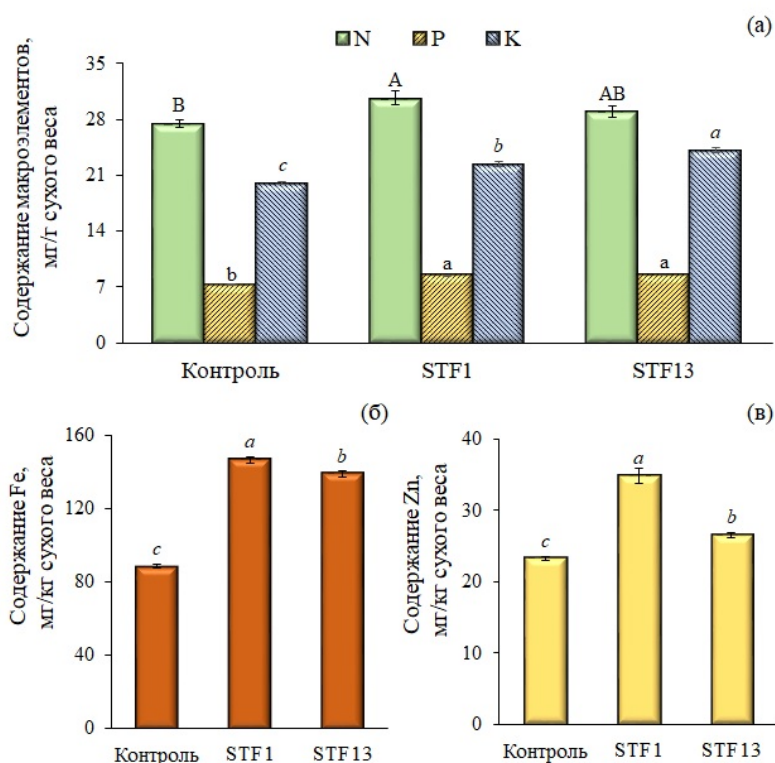


Рис. 3. Содержание общего азота, фосфора и калия (а), железа (б) и цинка (в) в сеянцах пшеницы

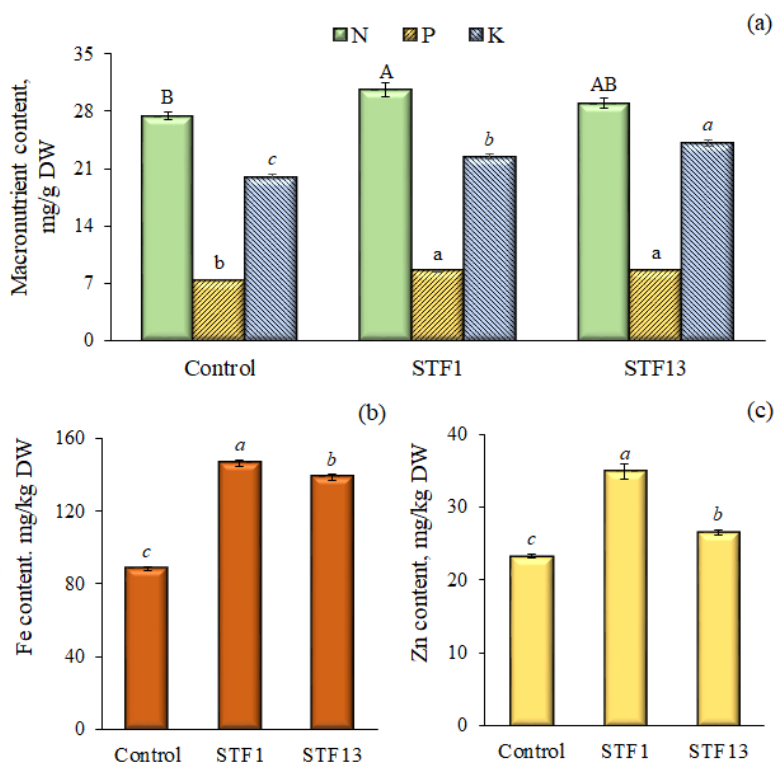


Fig. 3. Content of total nitrogen, phosphorus and potassium (a), iron (b) and zinc (c) in wheat seedlings

Содержание общего азота в сеянцах пшеницы, инокулированных ризобактериями, было на 9 % выше, чем в контрольных (рис. 3, а). По содержанию общего фосфора и калия отмечена аналогич-

ная тенденция, однако превышение составляло 17 % (рис. 3, а). Между вариантами эксперимента с разными штаммами существенной разницы по содержанию азота, фосфора и калия в сеянцах не обнаружено.

Таблица 2

Содержание общего азота и доступных форм фосфора, калия, цинка и железа в почве

Вариант	N, %	P, O ₃ , мг/кг	K, мг/кг	Zn, мг/кг	Fe, мг/кг
Контроль	0,96 ± 0,003a	263,0 ± 0,9b	518,7 ± 16,1c	3,09 ± 0,10a	322,8 ± 4,4b
<i>Pantoea</i> sp. STF1	1,07 ± 0,03a	332,2 ± 1,0ab	600,9 ± 5,3a	3,34 ± 0,05a	386,5 ± 18,1a
<i>Pseudomonas</i> sp. STF13	0,98 ± 0,02a	302,0 ± 1,0a	589,6 ± 4,8a	3,17 ± 0,04a	327,2 ± 6,7b

Table 2

Содержание общего азота и доступных форм фосфора, калия, цинка и железа в почве

Treatment	N, %	P, O ₃ , mg/kg	K, mg/kg	Zn, mg/kg	Fe, mg/kg
Control	0.96 ± 0.01a	263.0 ± 0.9b	518.7 ± 16.1c	3.09 ± 0.10a	322.8 ± 4.4b
<i>Pantoea</i> sp. STF1	1.07 ± 0.03a	332.0 ± 1.0ab	600.9 ± 5.3a	3.34 ± 0.05a	386.5 ± 18.1a
<i>Pseudomonas</i> sp. STF13	0.98 ± 0.02a	302.0 ± 1.0a	589.6 ± 4.8a	3.17 ± 0.04a	327.2 ± 6.7b

Заражение PGPR способствовало биообогащению семян такими эссенциальными микроэлементами, как Zn и Fe. В среднем содержание Zn в инокулированных семенах было в 1,3 раза (рис. 3, б), а Fe – в 1,6 раза (рис. 3, в) выше по сравнению с контролем. При этом максимальными концентрациями как цинка, так и железа отличались STF1-сеянцы (рис. 3, б, в).

Содержание макро- и микроэлементов в сухих почвенных образцах после завершения эксперимента представлено в таблице 2. Содержание общего азота во всех вариантах отличалось незначительно и в среднем составляло около 1 %. Содержание доступного фосфора в почве после выращивания пшеницы, инокулированной селективными штаммами PGPR, увеличивалось в среднем на 20 % по сравнению с контролем. Содержание в почве доступных форм калия и железа при заражении ризобактериями тоже возрастало, однако в меньшей степени: в среднем на 15 и 10 %, соответственно. По содержанию доступного цинка в почве достоверных различий между вариантами не выявлено.

Таким образом, оба изученных штамма Zn-соллюбилизирующих PGPR представляют как научный, так и практический интерес и могут быть использованы в дальнейшем для улучшения роста культурных растений и их биофортификации, поскольку инокуляция ими достоверно повышала содержание в них важнейших макро- и микроэлементов.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Способность многих штаммов ризосферных и эндофитных бактерий стимулировать рост растений и повышать их устойчивость в условиях стресса давно доказана, что делает их востребованными при создании бактериальных удобрений [6; 12–14; 26]. Однако эффективность использования PGP-бактерий для обогащения растений, включая их микрозелень, макро- и микроэлементами к настоящему времени изучена недостаточно, что предопределяет особый интерес к решению проблемы скрытого голода.

Настоящее исследование направлено на оценку биофортификационного потенциала двух селективных штаммов PGPR: *Pantoea* sp. STF1 и *Pseudomonas* sp. STF13. Поскольку эти штаммы были выделены и исследованы впервые, представляется целесообразным сопоставить их ростстимулирующие характеристики со свойствами других изученных штаммов ризобактерий.

Эффективность Zn-соллюбилизации у изученных штаммов была сопоставима с ее средними значениями, полученными разными авторами на других видах PGPR [11; 14; 27]. Однако в отношении соллюбилизации разных форм цинка результаты неоднозначные. Так, например, при изучении 15 ризобактериальных изолятов [11] было отмечено, что они соллюбилизировали Zn₃(PO₄)₂, но не способны были растворять ZnO и ZnCO₃, тогда как у V. S. Saravanan с соавторами [14], M. Srithaworn с соавторами [27] и в нашем исследовании PGPR успешно соллюбилизировали эти нерастворимые соединения цинка.

Производство сидерофоров у использованных штаммов было достаточно высоко: в среднем она составляла 290 % (таблица 1). Следует отметить, что в исследовании E. Eshaghi с соавторами [28] уровень производства сидерофоров у разных штаммов, принадлежавших роду *Pseudomonas*, был существенно ниже полученных нами значений.

Уровень фосфат-соллюбилизации у селективных штаммов был достаточно высоким: в среднем составлял 202,3 мг PO₄³⁻/л, что в целом соответствует значениям, отмеченным другими авторами при изучении разных видов PGPR [26; 29]. Так, например, в исследовании S. Shaikh с соавторами количество доступных фосфатов варьировало от 30 до 45 мг PO₄³⁻/л [16], в исследовании M. Ali с соавторами – от 65 до 105 мг PO₄³⁻/л [29], а по данным G. Sood с соавторами – от 93,0 до 190,0 мг PO₄³⁻/л [26].

Изученные штаммы проявляли способность к синтезу ИУК (в среднем 12,3 мг/л), что согласуется с литературными данными. Ранее было показано, что продукция ИУК у разных бактерий может варьировать от 6,2 до 17,2 мг/л [11], от 17,3 до 29,7 мг/л [26] и от 11,4 до 33,4 мг/л [27].

Инокуляция Zn-солубилизирующими PGPR достоверно увеличивала биомассу семян пшеницы и способствовала повышению содержания в листьях фотосинтетических пигментов, особенно каротиноидов. Очевидно, это связано с ростом доступности для растений важнейших нутриентов под влиянием ризобактерий, а также проявлением ими других PGP-свойств. Улучшение ростовых характеристик семян пшеницы, инокулированных Zn-солубилизирующими бактериями, было показано и другими авторами [11; 16; 29]. Так, например, исследования, проведенные в Индии [11], показали, что из четырех протестированных штаммов PGPR два улучшали прорастание семян и повышали индекс энергии семян в 2,0–2,5 раза.

Проведенное исследование показало, что штаммы ризобактерий STF1 и STF13 способствовали увеличению общего содержания макро- (N, P, K)

и микроэлементов (Zn и Fe) в надземной биомассе пшеницы и их доступного количества в почве. Аналогичная тенденция была отмечена и другими авторами при изучении биофортификационного потенциала разных штаммов Zn-солубилизирующих PGPR [11; 16].

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что инокуляция семян пшеницы штаммами *Pantoea* sp. STF1 и *Pseudomonas* sp. STF13 является эффективной стратегией для усиления роста ее семян и повышения их биологической ценности. В дальнейшем отобранные штаммы PGPR можно использовать в качестве биоресурса для повышения продуктивности культурных растений и их биообогащения биогенными элементами как в сочетании с химическими удобрениями, так и без них.

Библиографический список

1. Ofori K. F., Antonello S., English M. M., Aryee A. N. A. Improving nutrition through biofortification – a systematic review // *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. Article number 1043655. DOI: 10.3389/fnut.2022.1043655.
2. Raut D. A., Afrayeem S., Singh V., Jejal A. D., Sachan P., Sahoo S., Pandey S. K. Enhancing nutrition, crop resilience, and food security through biofortification // *International Journal of Environment and Climate Change*. 2024. Vol. 14 (2). Pp. 241–253. DOI: 10.9734/IJECC/2024/v14i23942.
3. Medrano-Macías J., Leija-Martínez P., González-Morales S., Juárez-Maldonado A., Benavides-Mendoza A. Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops // *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. Article number 1146. DOI: 10.3389/fpls.2016.01146.
4. Елисеева Л. Г., Белкин Ю. Д., Сими́на Д. В., Осман А., Молодкина П. Г., Сантурян Т. А. Новые направления разработки обогащенных пищевых продуктов для здорового питания // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. Т. 4 (118). С. 50–55. DOI: 10.23670/IRJ.2022.118.4.009.
5. White P. J., Broadley M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine // *New Phytologist*. 2009. Vol. 182. Pp. 49–84. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x.
6. Van Der Straeten D., Bhullar N. K., De Steur H., et al. Multiplying the efficiency and impact of biofortification through metabolic engineering // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11 (1). DOI: 10.1038/s41467-020-19020-4.
7. Малева М. Г., Борисова Г. Г., Трипти, Кумар А., Собенин А. В. Влияние биоудобрения на биомассу и содержание низкомолекулярных антиоксидантов у *Brassica oleracea* при биофортификации медью // *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2023. Т. 84. С. 130–142. DOI: 10.31360/2225-3068-2023-84-130-142.
8. García-Bañuelos M. L., Sida-Arreola J. P., Sánchez E. Biofortification – promising approach to increasing the content of iron and zinc in staple food crops // *Journal of Elementology*. 2014. Vol. 19, No. 3. Pp. 865–888. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.3.708.
9. Ahmad M., Hussain A., Dar A., et al. Combating iron and zinc malnutrition through mineral biofortification in maize through plant growth promoting *Bacillus* and *Paenibacillus* species // *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 13. Article number 1094551. DOI: 10.3389/fpls.2022.1094551.
10. Князева И. В., Вершинина О. В., Титенков А. В. Влияние бактериальной инокуляции на биохимические показатели китайской капусты в условиях регулируемой агроэкосистемы // *Аграрный вестник Урала*. 2023. № 08 (237). С. 59–67. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-237-08-59-67.
11. Yadav R. C., Sharma S. K., Varma A., et al. Modulation in biofertilization and biofortification of wheat crop by inoculation of zinc-solubilizing rhizobacteria // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article number 777771. DOI: 10.3389/fpls.2022.777771.
12. Aloo B. N., Tripathi V., Makumba B. A., Mbega E. R. Plant-growth promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article number 1002448. DOI: 10.3389/fpls.2022.1002448.
13. Chandran H., Meena M., Swapnil P. Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture // *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (19). Article number 10986. DOI: 10.3390/su131910986.

14. Saravanan V. S., Subramoniam S. R., Raj S. A. Assessing in vitro solubilization potential of different zinc solubilizing bacteria (ZSB) isolates // *Brazilian Journal of Microbiology*. 2003. Vol. 34 (1). Pp. 121–125.
15. Hussain A., Arshad M., Zahir Z. A., Asghar M. Prospects of zinc solubilizing bacteria for enhancing growth of maize // *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2015. Vol. 52, No. 4. Pp. 915–922.
16. Shaikh S., Saraf M. Biofortification of *Triticum aestivum* through the inoculation of zinc solubilizing plant growth promoting rhizobacteria in field experiment // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2017. Vol. 9. Pp. 120–126. DOI: 10.1016/j.bcab.2016.12.008.17. Sarwar S., Khaliq A., Yousra M., Sultan T. Iron biofortification potential of siderophore producing rhizobacterial strains for improving growth, yield, and iron contents of groundnut // *Journal of Plant Nutrition*. 2022. Vol. 45, No. 15. Pp. 2332–2347. DOI: 10.1080/01904167.2022.2063733.
18. Daliran T., Halajnia A., Lakzian A. Thiobacillus bacteria-enhanced iron biofortification of soybean in a calcareous soil enriched with ferrous sulfate, mill scale, and pyrite // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2022. Vol. 22 (2). Pp. 2221–2234. DOI: 10.1007/s42729-022-00804-0.
19. Sun Z., Yue Z., Liu H., Ma K., Li C. Microbial-assisted wheat iron biofortification using endophytic *Bacillus altitudinis* WR10 // *Frontiers in Nutrition*. 2021. Vol. 8. Article number 476. DOI: 10.3389/fnut.2021.704030.
20. Bhakat K., Chakraborty A., Islam E. Characterization of zinc solubilization potential of arsenic tolerant *Burkholderia* spp. isolated from rice rhizospheric soil // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021. Vol. 37. Article number 39. DOI: 10.1007/s11274-021-03003-8.
21. Kumar A., Tripti, Voropaeva O., et al. Bioaugmentation with copper tolerant endophyte *Pseudomonas luri-da* strain EOO26 for improved plant growth and copper phytoremediation by *Helianthus annuus* // *Chemosphere*. 2021. Vol. 266. Article number 128983. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128983.
22. Kumar B., Verma S. K., Ram G., Singh H. P. Temperature relations for seed germination potential and seedling vigor in Palmarosa (*Cymbopogon martinii*) // *Journal of Crop Improvement*. 2012. Vol. 26. Pp. 791–801. DOI: 10.1080/15427528.2012.689799.
23. Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes // *Methods in Enzymology*. 1987. Vol. 148. Pp. 350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.
24. Биохимия: практикум: учебно-методическое пособие / Сост. Г. Г. Борисова, Н. В. Чукина, И. С. Киселева, М. Г. Малева. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2017. 116 с.
25. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Издательство МГУ, 1970. 487 с.
26. Sood G., Kaushal R., Sharma M. Significance of inoculation with *Bacillus subtilis* to alleviate drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Vegetos*. 2020. Vol. 33, No. 4. Pp. 782–792. DOI: 10.1007/s42535-020-00149-y.
27. Srithaworn M., Jaroenthanayakorn J., Tangjitjaroenkun J., Suriyachadkun C., Chunhachart O. Zinc solubilizing bacteria and their potential as bioinoculant for growth promotion of green soybean (*Glycine max* L. Merr.) // *Peer Journal*. 2023. Vol. 11, No. 6. Article number e15128. DOI: 10.7717/peerj.15128.
28. Eshaghi E., Nosrati R., Owlia P., Malboobi M. A., Ghaseminejad P., Ganjali M. Zinc solubilization characteristics of efficient siderophore-producing soil bacteria // *Iranian Journal of Microbiology*. 2019. Vol. 11, No. 5. Pp. 419–430.
29. Ali M., Ahmed I., Tariq H., Abbas S., Zia M., Mumtaz A., Sharif M. Growth improvement of wheat (*Triticum aestivum*) and zinc biofortification using potent zinc solubilizing bacteria // *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article number 1140454. DOI: 10.3389/fpls.2023.1140454.

Об авторах

Галина Григорьевна Борисова, доктор географических наук, профессор кафедры экспериментальной биологии и биотехнологий, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0001-6663-9948, AuthorID 64374. E-mail: G.G.Borisova@urfu.ru

Мария Георгиевна Малева, кандидат биологических наук, доцент кафедры экспериментальной биологии и биотехнологий, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0003-1686-6071, AuthorID 152548. E-mail: maria.maleva@mail.ru

Мохаммад Дарказанли, ассистент департамента биологии и фундаментальной медицины ИЕНиМ УрФУ, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-4254-6410, AuthorID 1123115. E-mail: mdarkazanli@urfu.ru

Артем Вячеславович Собенин, научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0001-5513-5680, AuthorID 860953.

E-mail: arsob@yandex.ru

Михаил Юрьевич Карпухин, кандидат сельскохозяйственных наук, проректор по научной работе и инновациям, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия; ORCID 0000-0002-8009-9121, AuthorID 339196. E-mail: mkarpukhin@yandex.ru

References

1. Ofori K.F., Antonietto S., English M. M., Aryee A. N. A. Improving nutrition through biofortification – a systematic review. *Frontiers in Nutrition*. 2022; 9: 1043655. DOI: 10.3389/fnut.2022.1043655.
2. Raut D. A., Afrayeem S., Singh V., Jejal A. D., Sachan P., Sahoo S., Pandey S. K. Enhancing nutrition, crop resilience, and food security through biofortification. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2024; 14 (2): 241–253. DOI: 10.9734/IJECC/2024/v14i23942.
3. Medrano-Macias J., Leija-Martinez P., Gonzalez-Morales S., Juarez-Maldonado A., Benavides-Mendoza A. Use of iodine to biofortify and promote growth and stress tolerance in crops. *Frontiers in Plant Science*. 2016; 7: 1146. DOI: 10.3389/fpls.2016.01146.
4. Eliseeva L. G., Belkin Yu. D., Simina D. V., Osman A., Molodkina P. G., Santuryan T. A. New directions for the development of fortified food products for healthy nutrition. *International Research Journal*. 2022; 4 (118): 50–55. DOI: 10.23670/IRJ.2022.118.4.009. (In Russ.)
5. White P. J., Broadley M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*. 2009; 182: 49–84. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x.
6. Van Der Straeten D., Bhullar N. K., De Steur H., et al. Multiplying the efficiency and impact of biofortification through metabolic engineering. *Nature Communications*. 2020; 11 (1). DOI: 10.1038/s41467-020-19020-4.
7. Maleva M. G., Borisova G. G., Tripti, Kumar A., Sobenin A. V. Effect of biofertilizer on biomass and content of low molecular weight antioxidants in *Brassica oleracea* under copper biofortification. *Subtropical and Ornamental Gardening*. 2023; 84: 130–142. DOI: 10.31360/2225-3068-2023-84-130-142. (In Russ.)
8. Garcia-Bañuelos M. L., Sida-Arreola J. P., Sanchez E. Biofortification – promising approach to increasing the content of iron and zinc in staple food crops. *Journal of Elementology*. 2014; 19 (3): 865–888. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.3.708.
9. Ahmad M., Hussain A., Dar A., et al. Combating iron and zinc malnutrition through mineral biofortification in maize through plant growth promoting *Bacillus* and *Paenibacillus* species. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 13: 1094551. DOI: 10.3389/fpls.2022.1094551.
10. Knyazeva I. V., Vershinina O. V., Titenkov A. V. Effect of bacterial inoculation on biochemical parameters of *Chinese cabbage* in conditions of controlled agroecosystem. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023; 08 (237): 59–67. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-237-08-59-67. (In Russ.)
11. Yadav R. C., Sharma S. K., Varma A., et al. Modulation in biofertilization and biofortification of wheat crop by inoculation of zinc-solubilizing rhizobacteria. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 777771. DOI: 10.3389/fpls.2022.777771.
12. Aloo B. N., Tripathi V., Makumba B. A., Mbega E. R. Plant-growth promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. *Frontiers in Plant Science*. 2022; 13: 1002448. DOI: 10.3389/fpls.2022.1002448.
13. Chandran H., Meena M., Swapnil P. Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. *Sustainability*. 2021; 13 (19): 10986. DOI: 10.3390/su131910986.
14. Saravanan V. S., Subramoniam S. R., Raj S. A. Assessing in vitro solubilization potential of different zinc solubilizing bacteria (ZSB) isolates. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2003; 34 (1): 121–125.
15. Hussain A., Arshad M., Zahir Z. A., Asghar M. Prospects of zinc solubilizing bacteria for enhancing growth of maize. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2015; 52 (4): 915–922.
16. Shaikh S., Saraf M. Biofortification of *Triticum aestivum* through the inoculation of zinc solubilizing plant growth promoting rhizobacteria in field experiment. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2017; 9: 120–126. DOI: 10.1016/j.bcab.2016.12.008.17. Sarwar S., Khaliq A., Yousra M., Sultan T. Iron biofortification potential of siderophore producing rhizobacterial strains for improving growth, yield, and iron contents of groundnut. *Journal of Plant Nutrition*. 2022; 45 (15): 2332–2347. DOI: 10.1080/01904167.2022.2063733.
18. Daliran T., Halajnia A., Lakzian A. Thiobacillus bacteria-enhanced iron biofortification of soybean in a calcareous soil enriched with ferrous sulfate, mill scale, and pyrite. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2022; 22 (2): 2221–2234. DOI: 10.1007/s42729-022-00804-0.
19. Sun Z., Yue Z., Liu H., Ma K., Li C. Microbial-assisted wheat iron biofortification using endophytic *Bacillus altitudinis* WR10. *Frontiers in Nutrition*. 2021; 8: 476. DOI: 10.3389/fnut.2021.704030.
20. Bhakat K., Chakraborty A., Islam E. Characterization of zinc solubilization potential of arsenic tolerant *Burkholderia* spp. isolated from rice rhizospheric soil. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021; 37: 39. DOI: 10.1007/s11274-021-03003-8.
21. Kumar A., Tripti, Voropaeva O., et al. Bioaugmentation with copper tolerant endophyte *Pseudomonas lurida* strain EOO26 for improved plant growth and copper phytoremediation by *Helianthus annuus*. *Chemosphere*. 2021; 266: 128983. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128983.

22. Kumar B., Verma S. K., Ram G., Singh H. P. Temperature relations for seed germination potential and seedling vigor in Palmarosa (*Cymbopogon martinii*). *Journal of Crop Improvement*. 2012; 26: 791–801. DOI: 10.1080/15427528.2012.689799.
23. Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes. *Methods in Enzymology*. 1987; 148: 350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1.
24. Borisova G. G., Chukina N. V., Kiseleva I. S., Maleva M. G. (compilers) *Biochemistry: workshop: teaching aid*. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo un-ta, 2017. 116 p. (In Russ.)
25. Arinushkina E. V. *Guide to chemical analysis of soils*. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1970. 487 p. (In Russ.)
26. Sood G., Kaushal R., Sharma M. Significance of inoculation with *Bacillus subtilis* to alleviate drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Vegetos*. 2020; 33 (4): 782–792. DOI: 10.1007/s42535-020-00149-y.
27. Srithaworn M., Jaroenthanyakorn J., Tangjitjaroenkun J., Suriyachadkun C., Chunchachart O. Zinc solubilizing bacteria and their potential as bioinoculant for growth promotion of green soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Peer Journal*. 2023; 11 (6): e15128. DOI: 10.7717/peerj.15128.
28. Eshaghi E., Nosrati R., Owlia P., Malboobi M. A., Ghaseminejad P., Ganjali M. Zinc solubilization characteristics of efficient siderophore-producing soil bacteria. *Iranian Journal of Microbiology*. 2019; 11 (5): 419–430.
29. Ali M., Ahmed I., Tariq H., Abbas S., Zia M., Mumtaz A., Sharif M. Growth improvement of wheat (*Triticum aestivum*) and zinc biofortification using potent zinc solubilizing bacteria. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 14: 1140454. DOI: 10.3389/fpls.2023.1140454.

Authors' information:

Galina G. Borisova, doctor of geographical sciences, professor of the department of experimental biology and biotechnology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0001-6663-9948, AuthorID 64374. *E-mail*: G.G.Borisova@urfu.ru

Mariya G. Maleva, candidate of biological sciences, associate professor of department of experimental biology and biotechnology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0003-1686-6071, AuthorID 152548. *E-mail*: maria.maleva@mail.ru

Mohamad Darkazanli, associate professor of the department of biology and fundamental medicine, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-4254-6410, AuthorID 1123115. *E-mail*: mdarkazanli@urfu.ru

Artem V. Sobenin, scientific researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0001-5513-5680, AuthorID 860953. *E-mail*: arsob@yandex.ru

Mikhail Yu. Karpukhin, candidate of agricultural sciences, vice rector for scientific work and innovations, Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia; ORCID 0000-0002-8009-9121, AuthorID 339196. *E-mail*: mkarpukhin@yandex.ru