

Актуальные проблемы развития пищевых и биотехнологий

Topical issues of development of food and biological technologies

Научная статья
УДК 633.11: 579.64
DOI: 10.14529/food250201

ОБЗОР БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К БИООБОГАЩЕНИЮ *TRITICUM AESTIVUM* L.

Ю.Р. Серазетдинова, serazetdinova2000@mail.ru

Л.К. Асякина, alk_kem@mail.ru

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Аннотация. «Скрытый голод» (длительный дефицит микронутриентов в питании человека) – глобальная проблема, затрагивающая треть населения планеты. Оптимизация питания населения выступает приоритетной задачей многих стран мира. Для решения этой задачи может применяться эффективная стратегия – биофортификация, которая представляет собой процесс повышения содержания биодоступных микроэлементов в сельскохозяйственных культурах до сбора урожая. Целью исследования является анализ современных достижений в области повышения биологической ценности зерна пшеницы. Анализ современных новых источников показал, что существует несколько подходов к биофортификации. К ним относят генетическую трансформацию, а также агрономические методы. Каждый из методов обладает рядом преимуществ и недостатков. Генетические подходы являются эффективными и экономичными, однако сталкиваются с недоверием общественности. Агрономическая биофортификация активно применяется в сельскохозяйственной практике и позволяет не только обогатить культуры необходимыми микро- и макроэлементами, но также повысить урожайность культур. Однако этот способ сопряжен с большими экономическими затратами, а также негативным влиянием на состояние окружающей среды. Наиболее перспективным способом является биообогащение пшеницы с помощью микроорганизмов. Они способны повышать доступность биогенных элементов для растений благодаря выделению различных метаболитов, включая органические кислоты, фитогормоны и сидерофоры. Кроме того, они способны влиять на транспортные системы растения, усиливая поглощение определенных элементов. Микробная биофортификация представляет собой экологически безопасный и экономически эффективный метод обогащения пшеницы микроэлементами для борьбы со «скрытым голодом».

Ключевые слова: биофортификация, пшеница, скрытый голод, генетическая трансформация, селекция, агрономический метод, микроорганизмы, пищевая ценность

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках национального проекта «Наука и университеты» по теме «Исследование потенциала ростостимулирующих бактерий для повышения агрономической биофортификации пшеницы» (шифр FZSR-2024-0009).

Для цитирования: Серазетдинова Ю.Р., Асякина Л.К. Обзор биотехнологических подходов к биообогащению *Triticum Aestivum* L. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2025. Т. 13, № 2. С. 5–15. DOI: 10.14529/food250201

Original article
DOI: 10.14529/food250201

REVIEW OF BIOTECHNOLOGICAL APPROACHES TO BIO-ENRICHMENT OF *TRITICUM AESTIVUM* L.

Yu.R. Serazetdinova, *serazetdinova2000@mail.ru*

L.K. Asyakina, *alk_kem@mail.ru*

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Abstract. “Hidden hunger” (prolonged micronutrient deficiency in human nutrition) is a global problem affecting a third of the world's population. Optimizing the nutrition of the population is a priority task in many countries around the world. To solve this problem, an effective strategy can be applied – biofortification, which is the process of increasing the content of bioavailable trace elements in agricultural crops before harvest. The purpose of the study is to analyze modern achievements in the field of increasing the biological value of wheat grain. An analysis of modern new sources has shown that there are several trips to biofortification. These include genetic transformation, as well as agronomic methods. Each method has a number of advantages and disadvantages. Genetic approaches are effective and cost-effective, but they face public distrust. Agronomic biofortification is actively used in agricultural practice and allows not only to enrich crops with essential micro- and macronutrients, but also to increase crop yields. However, this method is associated with high economic costs, as well as a negative impact on the environment. The most promising method is bio-enrichment of wheat with the help of microorganisms. They are able to increase the availability of biogenic elements for plants due to the release of various metabolites including organic acids, phytohormones and siderophores. In addition, they are able to influence the plant's transport systems by enhancing the absorption of certain elements. Microbial biofortification is an ecologically safe and economically effective method of enriching wheat with trace elements to combat “hidden hunger”.

Keywords: biofortification, wheat, hidden hunger, genetic transformation, breeding, agronomic method, microorganisms, nutritional value

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state task on the topic «Research of the potential of growth-stimulating bacteria to increase the agronomic biofortification of wheat» (code FZSR-2024-0009).

For citation: Serazetdinova Yu.R., Asyakina L.K. Review of biotechnological approaches to bio-enrichment of *Triticum Aestivum* L. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2025, vol. 13, no. 2, pp. 5–15. (In Russ.) DOI: 10.14529/food250201

Введение

Недостаток микро- и макроэлементов в питании, называемый «скрытый голод», представляет собой глобальную проблему общественного здравоохранения, затрагивающую около 33 % населения Земли [1]. Вследствие этого оптимизация питания населения является приоритетной задачей для многих стран. В последние годы наблюдается стремительный рост алиментарно зависимых заболеваний, ассоциированных со «скрытым голодом». Беременные женщины и дети до пяти лет представляют собой группы повышенного риска развития тяжелых последствий, связанных с дефицитом микроэлементов. Согласно современным данным, около 45 % случаев детской смертности в возрасте до пяти лет в мире

ассоциировано с нарушениями питания [2]. В связи с этим одним из ведущих трендов пищевой промышленности является разработка биообогащенных продуктов, процесс получения которых называют биофортификацией.

Биофортификация представляет собой процесс повышения внутренней пищевой ценности сельскохозяйственных культур путем увеличения содержания биодоступных микроэлементов *in vivo*, то есть до момента сбора урожая. В отличие от традиционного обогащения, предполагающего добавление витаминов и минералов на этапе постуроборочной обработки, биофортификация модифицирует метаболические процессы растения. Это достигается за счет усиления поглощения минералов из почвы, стимуляции синтеза вторичных мета-

болитов, а также изменения транспорта и метаболизма микроэлементов или соединений, влияющих на их биодоступность [3].

Учитывая, что базовые продукты питания являются основным источником энергии и потребляются в значительных количествах вне зависимости от уровня дохода, их биофортификация представляется наиболее рациональной стратегией борьбы со «скрытым голодом». В связи с этим биообогащение наиболее рационально для продуктов массового употребления. В Российской Федерации к таким продуктам относятся продукты переработки зерновых культур, в частности пшеницы, обеспечивающей до 40 % суточной потребности человека в пище [4]. Несмотря на высокую энергетическую и пищевую ценность, традиционные сорта пшеницы характеризуются низким содержанием эссенциальных микроэлементов (Fe, Zn, Se, Cu) и высоким уровнем антинутриентов, лимитирующих биодоступность [2].

Целью настоящего исследования является анализ современных достижений в области

повышения биологической ценности зерна пшеницы.

Объекты и методы исследований

В настоящем исследовании проведен обзор релевантных тематике научных публикаций из авторитетных отечественных и международных реферативных баз данных, включая PubMed, Scopus, ScienceDirect, Elsevier, eLIBRARY.RU и др. Поисковый запрос включал следующие слова и сочетания слов: биофортификация, биообогащение, пшеница, цинк, железо, селен, biofortification, processing and enrichment, wheat, zinc, iron, selenium, *Triticum aestivum* L. В ходе поиска обнаружено 104 публикации, из которых для дальнейшего анализа отобрано 33.

Обзор литературы ограничен публикациями с открытым доступом к полному тексту. Статьи, не удовлетворяющие этому критерию, а также дубликаты и публикации, не соответствующие тематике исследования (по названию, аннотации или полному тексту), не рассматривались. Критерии отбора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии отбора источников

Критерий	Включено	Исключено	Причины
Популяция	Пшеница (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Другие сельскохозяйственные культуры	Целью настоящего обзора является обобщение и систематизация знаний о подходах к биообогащению пшеницы
Концепция	Исследования направленные на изучение накопления биогенных элементов в зерне пшеницы, а также способов интенсификации данного процесса	Исследования направленные на повышение продуктивности пшеницы, защиты от инфекционных заболеваний	Данное исследование фокусируется на методах повышения содержания биогенных веществ в пшенице. Другие агротехнические приемы выращивания пшеницы находятся за пределами рассматриваемой области
Язык	Любой	Ограничения отсутствуют	Ввиду глобального распространения ростостимулирующих микроорганизмов, трансформирующих биогенные вещества, и повсеместного выращивания пшеницы, лингвистические ограничения при отборе научных работ не применялись
Временной период	С 2019 по 2024 гг.	После декабря 2024 г.	Для обеспечения актуальности данных, поиск литературы ограничен публикациями последних пяти лет
География	Любые страны	Ограничения отсутствуют	Изучаемая тематика актуальна для всех стран мира

Библиографические данные извлекали с помощью программного обеспечения Zotero (формат .ris), а также обрабатывали в VOSviewer для анализа ключевых слов. Из 391 извлеченных ключевых слов (34 публикации) отобраны 29, встречающиеся более двух раз. Визуализация взаимосвязи и частоты встречаемости ключевых слов представлена на рис. 1 и 2 соответственно. Размер точки соответствует частоте встречаемости ключевого слова. Семантические связи между ключевыми словами визуализированы линиями различного цвета.

Методологическая база исследования включала структурно-логический, аналитиче-

ский и аксиоматический подходы. Обобщение сведений, полученных с помощью данных методов, приведено ниже.

Результаты и обсуждения

Понимание механизмов транспорта и накопления микроэлементов, таких как Zn, Fe, и Se, является необходимым условием для биофортификации любых культур, включая пшеницу. Как правило, процесс поглощения включает извлечение микроэлементов из ризосферы и их радиальный транспорт в ксилему корня. В период налива эти элементы транспортируются в зерно акропетально, то есть по побегу [5].

Поглощение ионов Zn^{2+} пшеницей осуще-

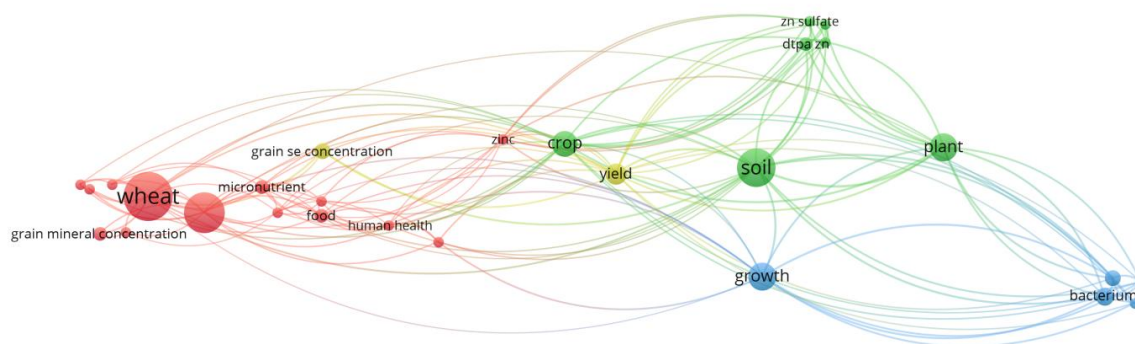


Рис. 1. Карта взаимосвязи ключевых слов

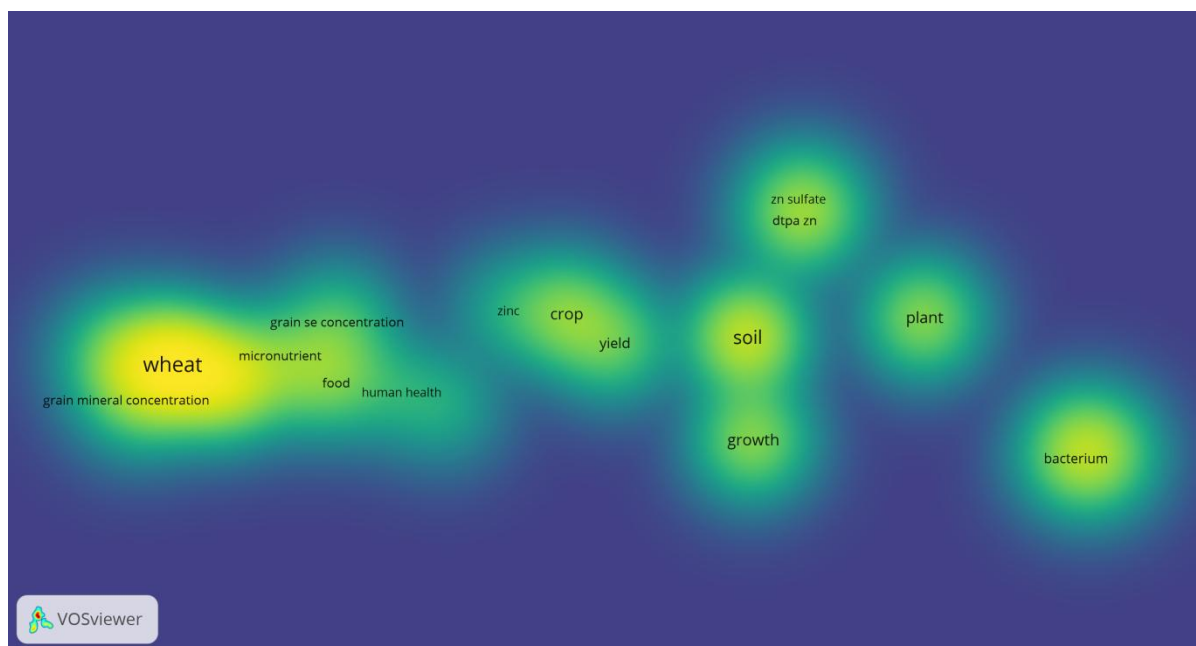


Рис. 2. Частота встречаемости ключевых слов

ствляется двумя путями. Первый – активный, селективный и энергозависимый (за счет фотосинтеза) транспорт через мембрану корневых клеток. Второй механизм активируется при дефиците цинка: корни выделяют комплексообразователи, например, муравьиную кислоту, которые связывают Zn, увеличивая его концентрацию и подвижность в почвенном растворе. При низкой доступности Zn роль влажности почвы существенно возрастает. Ключевым фактором, определяющим доступность Zn для поглощения, является pH почвы, влияющий на растворимость этого элемента. Низкие значения pH способствуют адсорбции Zn на катионообменных участках почвенных компонентов (например, оксидах металлов), что снижает его доступность в почвенном растворе [6].

Доступность железа определяется pH и окислительно-восстановительным потенциалом почвы. В условиях высокого pH железо легко окисляется, образуя нерастворимые оксиды. Напротив, при низком pH ионы Fe^{3+} высвобождаются из оксидов, становясь доступным для поглощения корнями. Существуют три стратегии усвоения Fe растениями: восстановление, хелатирование а также комбинация первых двух стратегий. Пшеница для усвоения железа преимущественно использует стратегию хелатирования [7].

Среди злаковых культур пшеница демонстрирует высокую эффективность накопления селена. В настоящее время механизмы поглощения этого элемента растениями до конца не изучены, поскольку он не является для них жизненно необходимым. Однако, учитывая химическое сходство селена и серы, предполагается, что поглощение Se^{5+} происходит аналогично сульфату, преимущественно через активный транспорт с помощью переносчиков SULTR1;1 и SULTR1;2. При этом установлено, что селен как в форме селенита, так и селената может поглощаться не только через почву, но и с поверхности листа [8].

Накопление металлов, таких как Zn, Fe и Se в зерне является сложным физиологическим признаком, регулируемым кумулятивной экспрессией гена для поглощения, транспортирования, распределения и секвестрации в различных частях растения. Металлы аккумулируются в зерне с помощью трансмембранных транспортеров HMA и CDF, часто называемых MTP и NRAMPS. Микроэлементы откладываются в двух компартментах зер-

на: в связанной форме, в виде белка ферритина (накопление Fe) и в вакуоли (Zn и Fe) [9]. Таким образом, повышение уровня или мобильности Zn, Fe и Se в почве, а также оптимизация транспортных систем микроэлементов в растении представляют собой два основных подхода к увеличению их содержания в зерне пшеницы.

Биофортификация может быть достигнута агрономическими методами (внесение удобрений в почву, листовые подкормки) или методами генетической модификации. Различные геномные подходы, такие как картирование локусов количественных признаков (QTL), селекция с помощью маркеров и геномная селекция, широко используются для биофортификации пшеницы [10]. Преимущества и недостатки этого метода биофортификации представлены в табл. 2.

Биофортификация путем селекции осуществляется для тех культур, генетическая изменчивость которых легко доступна из ее первичного, вторичного или третичного генофонда. У пшеницы есть большое количество неиспользуемых диких предков, которые могли бы способствовать генетическому улучшению пшеницы. Геном пшеницы трудно интерпретировать, поскольку он имеет широко распространенные повторяющиеся последовательности, гетерозиготность и полиплоидию [11]. Тем не менее развитие методологий секвенирования, снижение стоимости секвенирования и достижения в вычислительных ресурсах позволили сделать эти ресурсы более доступными [12].

Селекция с помощью маркеров (QTL) является потенциальной стратегией для разработки биообогащенной Fe и Zn пшеницы. Гены, действующие на одном или нескольких этапах, например, поглощение корнями, транслокация из корня в побег, хранение и ремобилизация, могут быть отражены QTL, отвечающими за концентрацию минералов в зерне. Различные исследования по картированию QTL позволили идентифицировать множество QTL как для Fe, так и для Zn. Несколько исследований выявили и картировали QTL для высоких концентраций GFe и GZn на разных хромосомах, 1A, 1B, 1D, 2A, 2B, 3A, 3B, 3D, 4A, 4B, 4D, 5A, 5B, 5D, 6A, 6B, 7A, 7B и 7D, обнаруженных в разных диплоидных, тетраплоидных и гексаплоидных видах пшеницы [13, 14]. Например, Gorafi и др. [15] оценили 47 линий синтетической пшеницы,

Таблица 2

Преимущества и недостатки генетической биофортификации *Triticum aestivum* L.

Преимущества	Источник	Недостатки	Источник
Современные методы секвенирования делают метод более доступным и эффективным	[12]	Сложность генома пшеницы затрудняет разработку биообогащенных сортов	[11]
Высокая экономическая эффективность, ввиду отсутствия необходимости внесения дополнительных препаратов.	[12]	Недостаточно исследований по картированию QTL, противоречия в данных о генетической вариабельности содержания элементов	[16]
Генетическое разнообразие у диких предков пшеницы, могут стать основой для разработки модифицированных сортов	[11]	Недоверие со стороны потребителей и государства	[20]

полученных в результате скрещивания тетраплоидного сорта пшеницы «Лэнгдон» и 47 линий *A. tauschii*, собранных в разных географических районах. Содержание Fe и Zn в зерне варьировалось от 22,2 до 78,5 (мг/кг) и от 20,6 до 65,8 (мг/кг) соответственно. Разработанные авторами образцы могут использоваться в качестве потенциальных генетических ресурсов для выведения сортов пшеницы с высоким содержанием минералов.

Понимание генетических механизмов, регулирующих накопление Se в зерне пшеницы, является фундаментальной предпосылкой для разработки стратегий генетической биофортификации этим микроэлементом. В литературе представлены противоречивые данные относительно степени генетической вариабельности содержания Se в зерне среди сортов пшеницы. Некоторые исследования не выявили значимой генетической изменчивости, в то время как другие указывают на наличие генотипов с повышенной аккумуляцией Se [16]. Картирование QTL представляет собой эффективный инструмент для изучения генетической архитектуры данного признака, однако количество исследований, посвященных картированию QTL, ассоциированных с концентрацией Se в зерне пшеницы, остается ограниченным [17, 18].

Помимо недостаточного объема исследований, генетическая биофортификация пшеницы сопряжена с рядом серьезных трудностей. Так, селекция представляет собой долгосрочный и трудоемкий процесс, требующий большого количества ресурсов [19]. В то время как генная трансформация

культур сравнительно быстрее, но сталкивается с общественным неодобрением, а также сложностями государственного регулирования. Например, широко известная генномодифицированная культура – «золотой рис», обогащенный провитамином A (β -каротин), разработан более 20 лет назад, но до сих пор не получил разрешение на реализацию в большинстве стран мира [20].

Ввиду указанных ограничений, в настоящее время для получения биофортифицированных сортов пшеницы преимущественно применяются агрономические методы, основанные на внесении удобрений. Преимущества и недостатки этого метода биофортификации представлены в табл. 3.

Данный подход демонстрирует эффективность для повышения содержания ряда микроэлементов в зерне. Например, G.H. Lyons и соавторы установили, что концентрация Se в зерне коррелирует с уровнем внесения Se, независимо от способа применения (в почву или путем листовой подкормки). При этом внесение селена в форме селенита натрия в почву во время посева оказалось более эффективным, чем внекорневая обработка после цветения [21]. Yadav et al. [22] продемонстрировали возможность повышения концентрации Zn в цельном зерне пшеницы до 60 мг/кг путем внекорневой или комбинированной (почвенной и внекорневой) обработки солями Zn. При этом использование наночастиц Zn (наночастицы Zn и хитозана) показало более высокую эффективность по сравнению с сульфатом цинка. Авторы также установили, что аккумуляция Zn в зерне регу-

Таблица 3

Преимущества и недостатки агрономической биофортификации *Triticum aestivum* L.

Преимущества	Источник	Недостатки	Источник
Внесение микроэлементов может не только повысить питательную ценность зерна, но и увеличить урожайность	[23]	Применение удобрений требует значительных финансовых вложений. Большая часть удобрений со временем становится недоступной для растений	[24]
Подтвержденная эффективность в полевых условиях.	[21–23]	Негативное воздействие на окружающую среду	[25, 26]

лируется ремобилизацией из вегетативных органов и продолжающимся поглощением в период налива зерна. Внекорневая подкормка Zn на ранних стадиях налива зерна способствует транспорту Zn в эндосперм, являющийся основной потребляемой частью зерна.

В исследовании M.U. Hassan и соавторов оценивалась эффективность различных методов внесения Zn (в почву – 10 кг ZnSO₄/га, протравливание семян – 0,3 М ZnSO₄, внекорневая подкормка – 0,5 % ZnSO₄) для повышения урожайности и биофортификации пшеницы. Все методы увеличили урожайность (максимально на 6,60 т/га при внесении в почву) и концентрацию Zn в зерне (максимально на 70 % при внекорневой подкормке). Внекорневое внесение показало наибольшую эффективность использования Zn, хотя внесение в почву оказалось наиболее экономически выгодным. Авторы отметили, что для повышения урожайности пшеницы рекомендуется внесение Zn в почву, в то время как для целей биофортификации наиболее эффективна внекорневая подкормка [23].

К недостаткам агрономической биофортификации относят высокие экономические затраты, а также негативное воздействие на окружающую среду, обусловленную низкой биоусвояемостью внесенных микроэлементов. Так, только 20 % внесенного Zn доступно для растений, остальная часть адсорбируется на частицах почвы и переходит в нерастворимую форму) [24]. Продолжительное применение минеральных удобрений негативно сказывается на плодородии почв, изменяя их физико-химические свойства. Накопление основных биогенных элементов (N, P, K) нарушает агрегацию и дисперсию почвенных частиц, способствуя уплотнению почвенного профиля. Избыточное внесение удобрений также ведет к изменениям элементного состава, сдвигу pH и аккумуляции токсичных элементов, вклю-

чая тяжелые металлы, что отрицательно влияет на плодородие почв [25, 26].

В связи с этим возрастает интерес исследователей к использованию микроорганизмов для повышения пищевой ценности сельскохозяйственных культур, в частности пшеницы. Преимущества и недостатки этого метода биофортификации представлены в табл. 4.

Ризобактерии, стимулирующие рост растений (PGPR), и некоторые эндофиты обладают способностью фиксировать атмосферный азот, а также способствовать усвоению других микроэлементов. Более того, для многих сельскохозяйственных культур наблюдается опосредованное PGPR стимулирование роста, повышение урожайности и увеличение содержания питательных веществ в зерне [27].

Ключевым механизмом микробной мобилизации питательных веществ в почве является продукция органических кислот и сидерофоров. Снижение pH почвы, обусловленное выделением органических кислот микроорганизмами, способствует растворению таких питательных веществ, как P, K и Zn, за счет разрушения их комплексов с другими металлами или ионами. Сидерофоры, продуцируемые микроорганизмами, повышают биодоступность Fe путем хелатирования с образованием комплекса сидерофор-Fe, играя важную роль в усвоении Fe растениями. Продукция фитогормонов, таких как ИУК и цитокинины, микроорганизмами может оказывать существенное влияние на морфологию и анатомию корневой системы, способствуя более эффективному поглощению питательных веществ [28].

Арбускулярные микоризные (AM) грибы, усиливая поглощение питательных веществ растениями-хозяевами, используются для биофортификации Se. Геном арбускулярно микоризных грибов кодирует высокоаффинные транспортеры фосфата, кроме того при симбиотических взаимоотношениях они спо-

собны индуцировать специфичные транспортеры фосфата в растении-хозяине, усиливая поглощение и транспорт фосфата. Например, *Rhizophagus irregularis* и *Laccaria bicolor* кодируют транспортеры и пермеазы сульфата. Ввиду химического сходства Se и S, Se усваивается в форме селената/селенита и метаболизируется по пути ассимиляции серы, образуя SeCys, SeMet и другие селено-аналоги метаболитов S. Вследствие чего эти микроорганизмы способствуют повышенному накоплению Se в растениях [29].

P. Durán и др. [30] исследовали влияние совместной инокуляции пшеницы селенобактериями *Stenotrophomonas* sp. B19, *Enterobacter* sp. B16, *Bacillus* sp. R12, *Pseudomonas* sp. R8 (отдельно и в смеси) и арбускулярным микоризным грибом *Glomus claroideum* на усвоение Se. Инокуляция значительно повышала концентрацию Se в тканях растений по сравнению с контролем. Независимо от присутствия *G. claroideum*, обработка пшеницы *Enterobacter* sp. B16 обеспечивала наибольшее накопление Se в зерне. Наблюдался синергетический эффект от совместного использования PGPR и АМГ на концентрацию Se: совместная инокуляция увеличивала содержание Se в зерне на 23,5 % по сравнению с растениями, обработанными только бактериальным штаммом. Этот синергизм предположительно обусловлен трофическими связями между ними.

Глюконовая и кетоглюконовая кислоты, синтезируемые бактериями филумов Firmicutes, Protobacteria и Actinobacteria, играют важную роль в растворении Zn [31]. Вклад в этот процесс также вносят лимонная, яблочная, щавелевая, винная, муравьиная и уксусная кислоты. Увеличение поглощения и накопления Zn в зерне пшеницы, опосредованное

продукцией органических кислот, показано на примере *Pseudomonas fluorescens* Psd [32] и *Exiguobacterium aurantiacum* [33].

Несмотря на изучение физиологических и молекулярных механизмов микробного обеспечения растений питательными веществами, практическое применение микроорганизмов для управления питанием сельскохозяйственных культур все еще ограничено [34]. Дальнейшие полевые исследования необходимы для эффективной интеграции микробной биофортификации в сельскохозяйственное производство.

Микробная биофортификация представляет собой экологически безопасную, экономически эффективную и устойчивую альтернативу другим стратегиям обогащения сельскохозяйственных культур микроэлементами. Кроме того, внедрение микробных препаратов в сельскохозяйственную практику сопряжено с дополнительными преимуществами, такими как стимуляция роста растений и повышение их устойчивости к стрессам [35].

Выводы

Анализ генетических, агрономических и микробных стратегий биофортификации пшеницы выявил специфические преимущества и ограничения каждого подхода. Генетическая биофортификация, предлагая устойчивое повышение содержания микронутриентов, сталкивается с трудностями практической реализации и потенциальным неприятием генетически модифицированных организмов. Агрономические методы, несмотря на доказанную эффективность, характеризуются высокой стоимостью и негативным воздействием на агроэкосистемы. Микробная биофортификация, представляя собой экологически безопасную альтернативу, требует углубленных исследований для оптимизации и масштабирования. Макси-

Таблица 4
Преимущества и недостатки микробной биофортификации *Triticum aestivum* L.

Преимущества	Источник	Недостатки	Источник
Комплексное действие (один препарат может применяться как для биофортификации, так и для защиты от фитопатогенов, повышения продуктивности)	[27]	Требуются дополнительные полевые исследования для эффективной интеграции микробной биофортификации в сельское хозяйство	[35]
Высокая экологичность	[34]	Зависимость эффективности от факторов окружающей среды	[34]

мальный потенциал, вероятно, принадлежит интегрированным стратегиям, комбинирующим различные подходы.

Поиск и характеристика новых штаммов ризобактерий, эндофитов и арбускулярных микоризных грибов с повышенной способностью к мобилизации и трансфера микронутриентов является приоритетной задачей. Разработка комплексных микробных инокулянтов с синергетическим действием, а также оптимизация агротехнологических приемов для повышения биодоступности микроэлементов и снижения экологической нагрузки, представляют значительный научный интерес.

Необходимо дополнительное изучение геномных основ механизмов симбиотического взаимодействия ризосферных и эндофитных микроорганизмов с растением-хозяином, проведение масштабных полевых экспериментов, оценка биодоступности микронутриентов из биофортифицированного зерна и анализ социально-экономических последствий внедрения биологически обогащенных культур в питание населения. Стратегической целью является разработка комплексных, устойчивых и экономически обоснованных решений, гарантирующих повышение пищевой ценности пшеницы для обеспечения глобальной продовольственной безопасности.

Список литературы / References

1. Zulfiqar U., Ayub A., Hussain S., Ahmad M., Rehman A., Ishfaq M., Ali M. F., Shabaan M., Yong J. W. H. Iron biofortification in cereal crops: Recent progress and prospects. *Food and Energy Security*, 2024, vol. 13, I. 4, p. e547. DOI: 10.1002/fes3.547
2. Kumar J., Saini D. K., Kumar A., Kumari S., Gahlaut V., Rahim M. S., Pandey A. K., Garg M., Roy J. Biofortification of *Triticum species*: a stepping stone to combat malnutrition. *BMC Plant Biology*, 2024, vol. 24, Article no. 668. DOI: 10.1186/s12870-024-05161-x
3. Gulyas B. Z., Mogeni B., Jackson P., Walton J., Caton S. J. Biofortification as a food-based strategy to improve nutrition in high-income countries: a scoping review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, pp. 1–22. DOI: 10.1080/10408398.2024.2402998
4. Масалов В.Н., Березина Н.А., Червонова И.В. Состояние зернового хозяйства России, роль зерновых в кормлении сельскохозяйственных животных и питании человека // Вестник аграрной науки. 2021. № 2(89). С. 3–15. [Masalov V.N., Berezina N.A., Chervonova I.V. The state of the Russian grain industry, the role of grain in feeding farm animals and human nutrition. *Bulletin of Agrarian Science*, 2021, no. 2(89), pp. 3–15. (In Russ.)] DOI: 10.17238/issn2587-666X.2021.2.3
5. Gupta P.K., Balyan H.S., Sharma S., Kumar R. Biofortification and bioavailability of Zn, Fe and Se in wheat: present status and future prospects. *Theoretical and Applied Genetics*, 2021, vol. 134, pp. 1–35. DOI: 10.1007/s00122-020-03709-7
6. Recena R., García-López A. M., Delgado A. Zinc Uptake by Plants as Affected by Fertilization with Zn Sulfate, Phosphorus Availability, and Soil Properties. *Agronomy*, 2021, vol. 11(2), p. 390. DOI: 10.3390/agronomy11020390
7. Kumar A., Kaur G., Singh P., Meena V., Sharma S., Tiwari M., Bauer P., Pandey A. J.. Strategies and Bottlenecks in Hexaploid Wheat to Mobilize Soil Iron to Grains. *Front. Plant Sci*, 2022, vol. 13, p. 863849. DOI: 10.3389/fpls.2022.863849
8. Subirana M.A., Boada R., Xiao T., Llugany M., Valiente M. Direct and indirect selenium speciation in biofortified wheat: A tale of two techniques. *Physiologia Plantarum*, 2022, vol. 175, pp. e13843. DOI: 10.1111/ppl.13843
9. Hu Y., Tian S., Foyer C. H., Hou D., Wang H., Zhou W., Liu T., Ge J., Lu L., Lin X. Efficient phloem transport significantly remobilizes cadmium from old to young organs in a hyperaccumulator *Sedum alfredii*. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, vol. 365, pp. 421–429. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.034
10. Dhaliwal S.S., Ram H., Shukla A.K., Mavi G.S. Zinc biofortification of bread wheat, triticale, and durum wheat cultivars by foliar zinc fertilization. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, vol. 42, iss. 8, pp. 813–822. DOI: 10.1080/01904167.2019.1584218

11. Appels R., Eversole K., Stein N., Feuillet C., Keller B., Rogers J., Pozniak C. J., Choulet F., Distelfeld A., Poland J., Ronen G., Sharpe A. G., Barad O., Baruch K., Keeble-Gagnère G. Shifting the limits in wheat research and breeding using a fully annotated reference genome. *Science*, 2018, vol. 361, iss. 6403, p. eaar7191.
12. Bhatta M., Baenziger P.S., Waters B.M., Poudel R., Belamkar V., Poland J., Morgounov A. Genome-Wide Association Study Reveals Novel Genomic Regions Associated with 10 Grain Minerals in Synthetic Hexaploid Wheat. *Int. J. Mol. Sci*, 2018, vol. 19(10), p. 3237. DOI: 10.3390/ijms19103237
13. Liu J., Huang L., Li T., Liu Y., Yan Z., Tang G., Zheng Y., Liu D., Wu B. Genome-Wide Association Study for Grain Micronutrient Concentrations in Wheat Advanced Lines Derived From Wild Emmer. *Front. Plant Sci*, 2021, vol. 12, p. 651283. DOI: 10.3389/fpls.2021.651283
14. Дубовец Н.И., Казнина Н.М., Орловская О.А., Сычева Е.А. Проблема дефицита цинка в рационе питания населения и биотехнологические подходы к ее решению // молекулярная и прикладная генетика. 2021. Т. 31. С. 147–158. [Dubovets N.I., Kaznina N.M., Orlovskaya O.A., Sycheva E.A. Problem of zinc deficiency in a diet of the population and biotechnological approaches to its slution. *Molekulyarnaya genetika*, 2021, vol. 31, pp. 147–158. (In Russ.)] DOI: 10.47612/1999-9127-2021-31-147-158
15. Gorafi Y.S.A., Ishii T., Kim J.-S., Elbashir A.A.E., Tsujimoto H. Genetic variation and association mapping of grain iron and zinc contents in synthetic hexaploid wheat germplasm. *Plant Genetic Resources*, 2016, vol. 16, iss. 1, pp. 9–17. DOI: 10.1017/S1479262116000265
16. Saini D.K., Devi P., Kaushik P. Advances in Genomic Interventions for Wheat Biofortification: A Review. *Agronomy*, 2020, vol. 10(1), p. 62. DOI: 10.3390/agronomy10010062
17. Yan J., Xue W.-t., Yang R.-z., Qin H.-r., Zhao G., Tzion F., Cheng J.-p. Quantitative trait loci conferring grain selenium nutrient in durum wheat × wild emmer wheat RIL population. *Czech J. Genet. Plant Breed*, 2018, vol. 54(2), pp. 52–58. DOI: 10.17221/112/2016-CJGPB
18. Pu Z., Pei Y., Yang J., Ma J., Li W., Liu D., Wang J., Wei Y., Zheng Y. A QTL located on chromosome 3D enhances the selenium concentration of wheat grain by improving phytoavailability and root structure. *Plant Soil*, 2018, vol. 425, pp. 287–296. DOI: 10.1007/s11104-017-3556-7
19. Vinoth A., Ravindhran R. Biofortification in Millets: A Sustainable Approach for Nutritional Security. *Front. Plant Sci*, 2017, vol. 8, pp. 29. DOI: 10.3389/fpls.2017.00029
20. Steur H., Stein A. J., Demont M. From Golden Rice to Golden Diets: How to turn its recent approval into practice. *Global Food Security*, 2022, vol. 32, p. 100596. DOI: 10.1016/j.gfs.2021.100596
21. Lyons G.H., Lewis J., Lorimer M.F., Holloway R.E., Brace D.M., Stangoulis J. C.R., Graham R.D. High-selenium wheat: agronomic biofortification strategies to improve human nutrition. *Food, Agriculture & Environment*, 2004, vol. 2(1), pp. 171–178.
22. Yadav A.K., Seth A., Kumar V., Datta A. Agronomic Biofortification of Wheat Through Proper Fertilizer Management to Alleviate Zinc Malnutrition: A Review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2023, vol. 54, iss. 2, pp. 154–177. DOI: 10.1080/00103624.2022.2110892
23. Hassan M.U., Chattha M.U., Ullah A., Khan I., Qadeer A., Aamer M., Khan A. U., Nadeem F., Khan T.A. Agronomic Biofortification to Improve Productivity and Grain Zn Concentration of Bread Wheat. *International journal of agriculture & biology*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 615–620. DOI: 10.17957/IJAB/15.0936
24. Gupta P.K., Balyan H.S., Sharma S., Kumar R. Biofortification and bioavailability of Zn, Fe and Se in wheat: present status and future prospects. *Theoretical and Applied Genetics*, 2021, vol. 134, pp. 1–35. DOI: 10.1007/s00122-020-03709-7
25. Patle P.N., Kadu P.R., Gabhane A.R., Pharande A.L., Bhagat A.P., Bhoyar S.M., Konde N.M., Rahangdale M.K. Consequences provoked due to excess application of agrochemical on soil health deterioration – A review for Sustainable Agriculture. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2019, vol. 8, iss. 2, pp. 63–66.
26. Thomas E.Y., Omueti J., Ogundayomi O. The Effect of Phosphate Fertilizer on Heavy Metal in Soils and Amaranthus Caudatus. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 2012, vol. 3(4), pp. 145–149. DOI: 10.5251/abjna.2012.3.4.145.149

27. Lobo L.L.B., Santos R.M., Rigobelo E.S. Promotion of maize growth using endophytic bacteria under greenhouse and field conditions. *AJCS*, 2019, vol. 13(12), pp. 2067–2074. DOI: 10.21475/ajcs.19.13.12.p2077
28. Verma S., Chakdar H., Kumar M., Varma A., Saxena A. K. Microorganisms as a Sustainable Alternative to Traditional Biofortification of Iron and Zinc: Status and Prospect to Combat Hidden Hunger. *J Soil Sci Plant Nutr*, 2021, vol. 21, pp. 1700–1717. DOI: 10.1007/s42729-021-00473-5
29. Ye Y., Qu J., Pu Y., Rao S., Xu F., Wu C. Selenium Biofortification of Crop Food by Beneficial Microorganisms. *J. Fungi*, 2020, vol. 6(2), p. 59. DOI: 10.3390/jof6020059
30. Durán P., Acuña J. J., Jorquera M. A., Azcón R., Borie F., Cornejo P., Mora M. L. Enhanced selenium content in wheat grain by co-inoculation of selenobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi: A preliminary study as a potential Se biofortification strateg. *Journal of Cereal Science*, 2013, vol. 57, iss. 3, pp. 275–280. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.11.012
31. Sah S. Singh N., Singh R. Iron acquisition in maize (*Zea mays* L.) using *Pseudomonas siderophore*. *3 Biotech*, 2017, vol. 7, article no. 121. DOI: 10.1007/s13205-017-0772-z
32. Sirohi G., Upadhyay A., Srivastava P.S., Srivastava S. PGPR mediated Zinc biofertilization of soil and its impact on growth and productivity of wheat. *J. Soil Sci. Plant Nutr*, 2014, vol. 15, no. 1, pp. 202–216.
33. 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
34. Fotina N.V., Serazetdinova Yu.R., Kolpakova D.E., Asyakina L.K., Atuchin V.V., Alotaibi Kh.M., Mudgal G., Prosekov A.Yu. Enhancement of wheat growth by plant growth-stimulating bacteria during phytopathogenic inhibition. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2024, vol. 60, p. 103294. DOI: 10.1016/j.bcab.2024.103294
35. Микробная биофортификация злаковых культур: перспективы и текущее развитие / Д.Е. Колпакова, Ю.Р. Серазетдинова, Н.В. Фотина и др. // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54, № 2. С. 191–211. [Kolpakova D.E., Serazetdinova Yu.R., Fotina N.V., Zaushintsena A.V., Asyakina L.K., Loseva A.I. Microbial Biofortification of Grain Crops: Current State and Prospects. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2024, vol. 54(2), pp. 191–211. (In Russ.)]. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2500

Информация об авторах

Серазетдинова Юлия Ренатовна, младший научный сотрудник Лаборатории фиторемедиации техногенно нарушенных экосистем НИУ, аспирант 2-го года обучения, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия; serazetdinova2000@mail.ru

Асякина Людмила Константиновна, заведующий Лабораторией фиторемедиации техногенно нарушенных экосистем НИУ, профессор кафедры бионанотехнологии, Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия; alk_kem@mail.ru

Information about the authors

Yulia R. Serazetdinova, Junior Researcher at the Laboratory of Phytoremediation of Technogenically Disturbed Ecosystems, of Scientific research Department, PhD student of the 2nd year of study, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia; serazetdinova2000@mail.ru

Lyudmila K. Asyakina, Head of the Laboratory of Phytoremediation of Technogenically Disturbed Ecosystems of Scientific research Department, Professor of the Department of Bionanotechnology, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia; alk_kem@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2025

The article was submitted 17.01.2025