

doi 10.18699/vjgb-25-86

Вариабельность минерального состава зерна твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) в различных экологических условиях

И.Н. Леонова ¹, П.Н. Мальчиков ^{1, 2}, Н.А. Виниченко¹, В.В. Пискарев ^{1, 3}, М.Г. Мясникова ²,
В.А. Апарина ^{1, 3}, Т.В. Чახеева ²

¹ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н.М. Тулайкова, п. г. т. Безенчук, Самарская область, Россия

³ Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, р. п. Краснообск, Новосибирская область, Россия

 leonova@bionet.nsc.ru

Аннотация. Минеральный состав зерна пшеницы играет ключевую роль в определении его питательной ценности. В данной работе проведена оценка коллекции из 133 сортов и селекционных линий яровой твердой пшеницы отечественного и иностранного происхождения по содержанию в зерне макроэлементов (Ca, Mg, K), микроэлементов (Cu, Mn, Zn, Fe, Na) и токсичных металлов (Pb, Cd, Cr) при выращивании в экологических условиях Самарской и Новосибирской областей. Результаты показали широкий размах варьирования концентрации всех элементов в зависимости от генотипических различий между образцами и региона выращивания. Значительное превышение концентрации Ca и Mg в 3.1 и 1.5 раза соответственно отмечено у сортообразцов, выращенных в Самарской области. Культивирование образцов в условиях Новосибирской области сопровождалось превышением содержания Zn, Pb и Cr в зерне более чем в два раза. Статистический анализ содержания минеральных элементов у образцов различного происхождения свидетельствует о том, что российские селекционные линии достоверно превышают отечественные сорта по содержанию Mg, но при этом уступают по концентрации K, Cu и Mn. Сортообразцы иностранной селекции отличались от российских сортов и линий повышенным содержанием K и тяжелых металлов Cd и Cr. Анализ корреляций, проведенный на основании средних значений показателей по двум регионам, указывает на наличие высокодостоверных ($p < 0.001$) положительных взаимосвязей между содержанием микроэлементов Fe/Mn ($r^2 = 0.69$), Fe/Zn ($r^2 = 0.49$) и Zn/Mn ($r^2 = 0.46$), что предполагает возможность проведения отбора генотипов по нескольким элементам одновременно. Многомерный статистический анализ разделил образцы на две группы, одна из которых включала российские сорта и селекционные линии, а также часть иностранных образцов. Отдельный кластер состоял из семи российских селекционных линий, расположенных дистантно от остальных образцов, что предполагает их различия на генетическом уровне. Сравнение этих линий по минеральному составу показало, что линии в среднем характеризуются более высокими концентрациями Mg, K, Zn и Fe. Данные по содержанию микро- и макроэлементов в изученных сортообразцах яровой твердой пшеницы могут быть использованы для генетических исследований и практической селекции для улучшения существующих сортов по минеральному составу.

Ключевые слова: твердая пшеница; макроэлементы; микроэлементы; тяжелые металлы

Для цитирования: Леонова И.Н., Мальчиков П.Н., Виниченко Н.А., Пискарев В.В., Мясникова М.Г., Апарина В.А., Чახеева Т.В. Вариабельность минерального состава зерна твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) в различных экологических условиях. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025;29(6):789-797. doi 10.18699/vjgb-25-86

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-16-00041 (<https://rscf.ru/project/23-16-00041>).

Благодарности. Размножение селекционных линий российских оригинаторов проведено в Центре коллективного пользования репродукции растений ИЦИГ СО РАН при поддержке бюджетного проекта FWN-2022-0017.

Variability of the mineral composition of durum wheat grain (*Triticum durum* Desf.) under different environmental conditions

I.N. Leonova ¹, P.N. Malchikov ^{1, 2}, N.A. Vinichenko¹, V.V. Piskarev ^{1, 3}, M.G. Myasnikova ²,
V.A. Aparina ^{1, 3}, T.V. Chaheeva ²

¹ Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Samara Federal Research Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Samara Scientific Research Agriculture Institute named after N.M. Tulaykov, Bezenchuk, Samara region, Russia

³ Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – Branch of the Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

 leonova@bionet.nsc.ru

Abstract. The composition of wheat grain plays a key role in determining its nutritional value. In this work, a collection of 133 durum wheat varieties and breeding lines was assessed for the content of macroelements (Ca, Mg, K), microelements (Cu, Mn, Zn, Fe, Na) and toxic metals (Pb, Cd, and Cr) in grain under the environmental conditions of Samara and Novosibirsk regions in 2023. The results showed a wide range of variations in the concentration of all elements depending on genotypic differences between the samples as well as the growing region. Ca and Mg contents in the varieties grown in Samara region showed a significant excess of 3.1- and 1.5-fold, respectively. Zn, Pb, and Cr content in the varieties cultivated in Novosibirsk turned out to be two times as high. Statistical analysis of element concentrations in the varieties of different origin indicates that Russian breeding lines significantly outperform Russian cultivars in Mg content, while being inferior in K, Cu, and Mn. Compared to Russian cultivars and breeding lines, foreign varieties demonstrated higher contents of K and heavy metals Cd and Cr. Correlation analysis using mean values of indicators for two environments showed highly significant ($p < 0.001$) positive relationships between the content of microelements Fe/Mn ($r^2 = 0.69$), Fe/Zn ($r^2 = 0.49$), and Zn/Mn ($r^2 = 0.46$), which suggests a feasibility of selecting genotypes for several elements at once. Multivariate statistics divided the durum wheat collection into two groups, one of them including Russian cultivars and breeding lines as well as some foreign genotypes. A separate cluster included seven Russian breeding lines placed at a distance from the other varieties, which suggested their potential differences at the genetic level. Comparing these lines with respect to mineral composition showed that they were, on average, characterized by higher Mg, K, Zn, and Fe contents. The data obtained in this study can be used for genetic research and breeding to improve the grain mineral composition of the modern durum wheat varieties.

Key words: durum wheat; macroelements; microelements; heavy metals

For citation: Leonova I.N., Malchikov P.N., Vinichenko N.A., Piskarev V.V., Myasnikova M.G., Aparina V.A., Chaheeva T.V. Variability of the mineral composition of durum wheat grain (*Triticum durum* Desf.) under different environmental conditions. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = *Vavilov J Genet Breed*. 2025;29(6):789-797. doi 10.18699/vjgb-25-86

Введение

Минеральные микро- и макроэлементы имеют большое значение в поддержании жизнедеятельности организма человека и оказывают существенное влияние на его здоровье. Функциональная роль большинства минеральных элементов разнообразна и заключается в участии в различных ферментативных реакциях в качестве кофакторов, в окислительно-восстановительных реакциях при переносе электронов, связывании и транспортировке кислорода в тканях, во взаимодействии молекул с рецепторными структурами клеток и регуляции экспрессии генов (Sigel et al., 2013; Jomova et al., 2022; Islam et al., 2023).

Несмотря на важную роль минеральных веществ, для нормального функционирования организма необходимы оптимальные дозы, поскольку как избыток, так и недостаток отдельных минералов может приводить к различным физиологическим расстройствам. Дефицит макроэлементов, таких как кальций, магний, калий, вызывает нарушение работы мышечной системы, изменение гормонального статуса и приводит к появлению злокачественных опухолей (Zoroddu et al., 2019; Ali, 2023). Дефицит железа, входящего в состав белков из класса гемопротеинов, таких как гемоглобин и ферменты метаболизма эндогенных соединений и ксенобиотиков, — одна из причин анемии, сердечно-сосудистых заболеваний и расстройств иммунной системы (Camaschella, 2019; Dixit et al., 2020). Недостаток потребления цинка влечет за собой задержку роста и полового развития, снижение иммунитета и различные психические нарушения (Hambidge, 2000). К симптомам дефицита меди можно отнести различные поражения суставов, нарушение пигментации кожи и волос (Oliveras, Uauy, 1996). С другой стороны, избыточное потребление цинка, железа и меди может приводить к фиброзу и циррозу печени, нейродегенеративным расстройствам, нарушению иммунных и когнитивных функций и тяжелым формам анемии (Wessling-Resnick, 2017; Schoofs et al., 2024).

Кроме микро- и макроэлементов, необходимых для жизнедеятельности в оптимальных концентрациях, человек подвергается воздействию ряда токсичных металлов (свинец, кадмий, ртуть, хром, алюминий), которые могут поступать в организм через пищевые продукты и оказывать негативный эффект. К основным механизмам токсического действия тяжелых металлов относят митохондриальный апоптоз, вмешательство в различные сигнальные пути и окислительный стресс, изменение регуляции активности генов за счет различных повреждений ДНК, что приводит к развитию хронических заболеваний и возникновению раковых опухолей (Kiran et al., 2022; Jomova et al., 2025).

Основные источники поступления в организм человека минеральных веществ — пищевые продукты. Для большинства населения земного шара продукты питания, производимые из мягкой и твердой пшеницы, являются главным поставщиком белка, витаминов и минеральных веществ. Мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L., $2n = 42$, геном AABBDD) принадлежит к числу наиболее ценных продовольственных зерновых культур и занимает ведущие позиции в большинстве стран мира. Ежедневное потребление продуктов из мягкой пшеницы дает человеку до 20 % необходимых калорий и до 10–15 % железа и цинка (Tadesse et al., 2019; Aghalari et al., 2022).

Твердая пшеница (*Triticum durum* Desf., $2n = 28$, геном AABB), в отличие от мягкой, является единственным сырьем для изготовления макаронных изделий высокого качества, с янтарным цветом и превосходным вкусом. Зерно твердой пшеницы характеризуется более высоким содержанием белка; значительное число культивируемых сортов твердой пшеницы превышает сорта мягкой пшеницы по содержанию цинка, железа, кальция, магния и других минеральных веществ (Cakmak et al., 2010; Del Coco et al., 2019; Saini et al., 2023). К основным производителям и потребителям продукции и зерна твердой пшеницы относятся страны Средиземноморского бассейна: Италия,

Турция, Греция, Тунис, Франция, где сосредоточено более 50 % занятых площадей. Среди других регионов выращивания твердой пшеницы крупными производителями являются Канада, США, Мексика, Индия и Казахстан. Россия до середины XX в. была одним из крупных производителей твердой пшеницы и занимала первое место в мире по площадям посевов, которые достигали 20 млн га (Martínez-Moreno et al., 2022; Мальчиков, Мясникова, 2023). Значительное сокращение посевов и сбора зерна произошло в начале 1990-х годов после распада СССР; в настоящее время занимаемые твердой пшеницей площади оцениваются в ~ 0.5 млн га, что составляет не более 1.7 % от мировых посевов (Гончаров, Курашов, 2018).

В последние годы большое внимание уделяется улучшению минерального состава зерна пшеницы. В рамках селекционных программ по биообогащению зерна пшеницы были созданы образцы мягкой пшеницы с генетически обусловленным повышенным содержанием цинка и железа (Khokhar et al., 2018; Virk et al., 2021; Tanin et al., 2024). Работы по получению биообогащенных селекционных линий мягкой пшеницы и поиску доноров высокого содержания белка, минералов и антиоксидантов ведутся и в Российской Федерации (Morgounov et al., 2022; Potapova et al., 2023; Gordeeva et al., 2024). Были систематизированы данные по многолетним испытаниям стародавних, современных сортов, селекционных и интрогрессивных линий мягкой пшеницы по признакам качества зерна и минеральному составу, на основании которых выделены образцы с целевыми признаками для использования в селекционных схемах (Shepelev et al., 2022; Orlovskaya et al., 2023; Leonova et al., 2024; Shamanin et al., 2024). Что касается твердой пшеницы, то аналогичные работы в области изучения генетического разнообразия российских сортов и селекционных линий по минеральному составу зерна практически отсутствуют (Потоцкая и др., 2023; Соколова и др., 2023).

Цель настоящей работы состояла в изучении генетической вариабельности коллекции сортов и селекционных линий яровой твердой пшеницы по содержанию в зерне микро- (цинк, железо, медь, марганец) и макроэлементов (кальций, магний, калий) и токсичных металлов (свинец, кадмий, хром) в экологических условиях Самарской и Новосибирской областей.

Материалы и методы

Растительный материал и условия полевых испытаний. В работе использована коллекция из 133 образцов твердой пшеницы, которая включала 35 российских сортов, 68 российских селекционных линий, 29 сортообразцов иностранного происхождения и туранскую пшеницу Хорасан (Приложение, табл. S1)¹. Среди российских селекционных линий 39 образцов создано в Самарском НИИСХ, 29 образцов имели происхождение из других селекционных центров. Образцы выращивали в условиях Новосибирской и Самарской областей в 2023 г. Посев образцов в условиях Новосибирской области проводили на поле СибНИИРС – филиала ИЦиГ СО РАН (54°54'51.4"N, 82°58'37.1"E). Почвы опытного участка представлены в

основном черноземами выщелоченными, средней мощности. Содержание гумуса в верхнем слое почвы составляет 5.7–6.9 %. По содержанию подвижных фосфатов и калия почвы высокообеспеченные. Содержание на 100 г почвы: P₂O₅ – 42 мг, K₂O – 35 мг. Содержание общего азота в почве перед посевом 0.31 мг/кг. Посев проводили 15 мая вручную в борозды на глубину 5–7 см. Размер делянки 0.4 м², в двух повторениях.

Экспериментальные поля Самарского НИИСХ, филиала СамНИЦ РАН, расположены в п. г. т. Безенчук (52°05'85.5"N, 49°02'55.9"E). Основная часть почв представлена обыкновенными черноземами, средне- и тяжелосуглинистого механического состава. Содержание гумуса составляет в среднем 4.8 %, азота – 5.9 мг/кг, фосфора – 279 мг/кг, калия – 203 мг/кг. Сортообразцы были посеяны рендомизированным размещением на делянках площадью 7.4 м². В качестве стандарта на обоих полях использован сорт Безенчукская 210.

Сравнение климатических условий вегетационного периода в регионах со среднемноголетними значениями продемонстрировало, что в 2023 г. в Новосибирской области отмечены повышенные температуры воздуха в течение всего вегетационного периода в среднем и лишь во второй декаде мая и августа температуры были ниже среднемноголетних (–1.3 и –2.0 °C к среднемноголетнему значению) (табл. S2). Самое значительное превышение (+8.4 °C) среднемноголетних значений температуры отмечено в первой декаде июня, при этом осадков за данный период выпало лишь 27.8 % от среднемноголетнего. В целом первая половина вегетационного периода (май–июнь) характеризовалась острой недостаточностью осадков (14.9 и 47.5 %), тогда как в июле осадков было в пределах нормы (102.1 %), а в августе – значительно больше среднемноголетних значений (167.6 %). В Самарской области в целом в период вегетации имел место дефицит осадков на фоне умеренных температур. За вегетацию – от всходов до восковой спелости – количество осадков составило 89.3 мм. За весь период вегетации наиболее благоприятные условия для продукционного процесса твердой пшеницы сложились в первой и третьей декадах июня в периоды выхода растений в трубку и колошения соответственно.

Определение содержания микро- и макроэлементов и тяжелых металлов. Зерно образцов твердой пшеницы анализировали по содержанию восьми микро- и макроэлементов (цинк, железо, медь, марганец, натрий, кальций, магний, калий) и трех токсичных металлов (свинец, кадмий и хром). Для этого к навеске зерна массой 300 мг добавляли 1 мл перекиси водорода (60 %) и 5 мл концентрированной азотной кислоты. Минерализацию проб проводили в микроволновой печи в течение 40 мин. Далее объем пробы доводили до 50 мл деионизованной водой и для измерения количества элементов пробу разводили в 50 раз. Анализ содержания химических веществ проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с атомизацией в пламени на приборе ContrAA 800 D (Analytik Jena, Германия). Анализ каждого образца выполнен в 2-кратной повторности.

Статистическая обработка результатов. Статистический анализ выполняли с использованием пакета про-

¹ Табл. S1–S4 Приложения см. по адресу:
<https://vavilovj-icg.ru/download/pict-2025-29/appx27.xlsx>

грамм Statistica v. 10 (StatSoft, Inc., США). Статистическая достоверность различий между средними значениями признака оценивали с помощью критериев Манна–Уитни и *t*-критерия Стьюдента. Показатели признаков выражены в виде средних значений (М) и стандартного отклонения ($\pm$ SD). Для оценки влияния генотипа и факторов внешней среды использовали двухфакторный дисперсионный анализ (ANOVA, Analysis of Variance). Взаимосвязи между параметрами содержания различных элементов оценивали с помощью корреляций Спирмана. Для анализа полученных результатов методом главных компонент (principle component analysis, PCA) и построения дендрограммы задействована программа PAST v. 4.03 (Hammer et al., 2001). Для построения дендрограммы применяли метод UPGMA (unweighted pair group method with arithmetic mean); для оценки достоверности кластеризации использовали тест перестановки в 1000 итераций.

Результаты

Оценка содержания минеральных элементов в зерне при выращивании сортообразцов твердой пшеницы в условиях двух регионов (Самарская и Новосибирская области) показала значительный диапазон варьирования концентраций всех элементов в образцах и различия по концентрации в зависимости от региона выращивания (табл. 1; табл. S1). Наиболее существенные региональные различия отмечены для таких элементов, как Ca и Mg, содержание которых в Самарской области превышало содержание этих элементов в Новосибирской области в 3.1 и 1.5 раза соответственно. Для образцов, выращенных в условиях Новосибирской области, установлено превышение по содержанию Zn, Pb и Cr в 2.5, 2.3 и 2.2 раза соответственно. Все различия по концентрации элементов в образцах пшеницы между регионами были достоверны ($p < 0.0001$), за исключением содержания Na (см. табл. 1), концентрация которого была одинакова. Распределение содержания большинства минералов у образцов, выращенных на обоих полях, было приближенным к нормальному, исключение составляло распределение по концентрации свинца на поле в Самарской области, которое было значительно смещено в сторону более низких значений.

Анализ ANOVA, использованный для оценки эффектов генотипа и факторов внешней среды на фенотипическое проявление признаков, установил, что основное влияние на содержание Ca и Zn оказывали полевые условия, при этом для концентрации Ca отмечен низкий недостоверный вклад генотипа (табл. S3). Наоборот, на содержание Na в зерне в основном влияли генотипические различия. Достоверный вклад генотипа показан для концентрации таких элементов, как Mg, K, Cu, Fe и Cd, который существенно превышал влияние факторов внешней среды.

Поскольку изучаемая коллекция состояла из нескольких групп образцов различного происхождения, то интересно было выяснить, отличаются ли эти группы по концентрации веществ. Из табл. 2 видно, что российские селекционные линии достоверно превышают отечественные сорта по содержанию Mg, но при этом уступают сортам по содержанию K, Cu и Mn. Сортообразцы иностранной селекции отличались от российских сортов и линий повышенным содержанием калия. Концентрация токсиче-

Таблица 1. Содержание микро- и макроэлементов и токсичных металлов (мг/кг) в зерне образцов твердой пшеницы при выращивании в экологических условиях Самарской и Новосибирской областей в 2023 г.

Элемент	Самарская область	Новосибирская область
Макроэлементы (М $\pm$ SD)		
Ca	920.4 $\pm$ 170.7****	297.4 $\pm$ 116.9
Mg	1327.0 $\pm$ 178.2***	891.4 $\pm$ 276.8
K	3977.6 $\pm$ 402.9***	4356.7 $\pm$ 577.9
Микроэлементы (М $\pm$ SD)		
Cu	3.2 $\pm$ 0.9*	3.7 $\pm$ 1.1
Mn	37.1 $\pm$ 7.9**	27.0 $\pm$ 6.5
Zn	25.8 $\pm$ 8.1****	64.0 $\pm$ 12.7
Fe	47.2 $\pm$ 6.0***	42.2 $\pm$ 8.8
Na	27.2 $\pm$ 6.3 ^{ns}	27.3 $\pm$ 12.1
Токсичные металлы (М $\pm$ SD)		
Pb	0.23 $\pm$ 0.05***	0.52 $\pm$ 0.02
Cd	0.05 $\pm$ 0.004***	0.03 $\pm$ 0.002
Cr	0.82 $\pm$ 0.05***	1.79 $\pm$ 0.11

Примечание. Данные представлены в формате: среднее значение (М) $\pm$ стандартное отклонение (SD); * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$, ns (non significant) – различия недостоверны.

ских элементов Cd и Cr была достоверно выше, в среднем в 1.9 и 1.8 раза, у иностранных сортообразцов в сравнении с российскими. Не выявлено достоверных различий между группами по концентрации Zn и Fe.

Согласно усредненным данным по двум регионам наиболее высокими показателями содержания Ca (> 700 мг/кг) отличались российские сорта Памяти Чеховича, Жемчужина Сибири, Аннушка, Краснокутка 13 и российские селекционные линии Л73, Л75 и Л76, созданные в Алтайском НИИСХ. По содержанию в зерне Mg можно выделить селекционные линии Л21, Л23, Л24, Л25 и Л26 Самарского НИИСХ, концентрация этого элемента превышала 2000 мг/кг. Российские сорта Аннушка, Безенчукская степная, Вольнодонская и образцы иностранного происхождения Нуретно и Tamaroi отличались высоким содержанием цинка и железа (> 54 и 51 мг/кг соответственно). Высокие концентрации Cd, в ряде случаев превышающие предельно допустимые концентрации, выявлены у иностранных образцов Tessadur, Achille, Fuego и селекционных линий Л51, Л56 (см. табл. S1). Также нужно отметить высокий уровень содержания таких элементов, как Mg (1598.2 мг/кг), K (4536.5 мг/кг) и Zn (56.1 мг/кг) в зерне древней пшеницы Хорасан, что подтверждает данные, полученные другими авторами, и свидетельствует о потенциале этого вида для повышения питательной ценности современных сортов твердой пшеницы (Bordoni et al., 2017).

Корреляционный анализ Спирмана, проведенный на основании средних значений показателей по двум регионам, указывает на наличие высокодостоверных положитель-

Таблица 2. Концентрация микро- и макроэлементов и токсичных металлов в зерне сортов и селекционных линий
российского и иностранного происхождения (Самарская и Новосибирская области, 2023 г.)

Элемент (мг/кг)	Российские	Иностранные сортообразцы ^б	
	сорта	селекционные линии ^а	
Ca	625.1 ± 398.3	626.2 ± 315.9	548.3 ± 336.3
Mg	1178.9 ± 330.8***b	1225.1 ± 644.5***b	1017.6 ± 317.4
K	4222.4 ± 718.2*a	4026.5 ± 382.2****b	4428.4 ± 456.1
Cu	3.73 ± 0.9****a	3.15 ± 0.9***b	3.76 ± 1.2
Mn	34.1 ± 8.2*a	30.5 ± 9.1	33.2 ± 8.1
Zn	48.8 ± 19.4	43.9 ± 23.2	42.5 ± 21.6
Fe	43.9 ± 8.4	44.9 ± 7.2	44.9 ± 8.9
Na	28.5 ± 10.1****b	29.1 ± 13.2****b	21.6 ± 5.5
Pb	0.49 ± 0.19***ab	0.35 ± 0.11	0.29 ± 0.01
Cd	0.035 ± 0.008****b	0.030 ± 0.002****b	0.064 ± 0.005
Cr	1.0 ± 0.4****b	1.2 ± 0.6****b	1.9 ± 0.6

Примечание. Данные представлены как среднее ± стандартное отклонение. Буквы (а, б) указывают на статистически значимую разницу показателей между группами образцов. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; **** $p < 0.0001$.

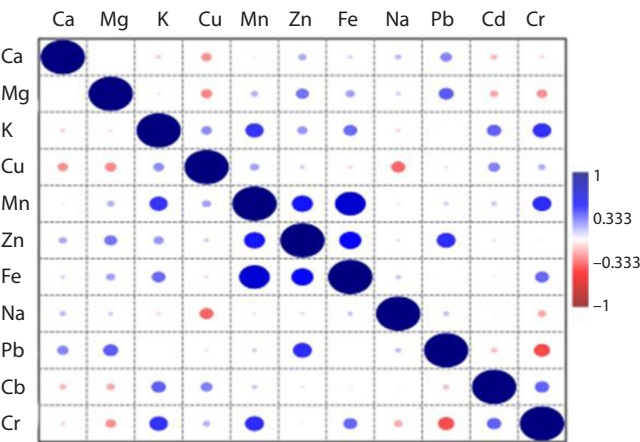


Рис. 1. Генотипические корреляции между концентрациями микро- и макроэлементов и токсичных металлов в зерне коллекции сортов и селекционных линий твердой пшеницы различного происхождения.

ных корреляций между содержанием Fe и Mn ($r^2 = 0.69$), Fe/Zn ($r^2 = 0.49$), Zn/Mn ($r^2 = 0.46$), Zn/Pb ($r^2 = 0.41$), Cr/K ($r^2 = 0.41$) (рис. 1, табл. S4). Низкие отрицательные связи отмечены между Cu/Ca, Cu/Mg, Cu/Na и Pb/Cr ($r^2 = -0.22$, -0.24 , -0.27 и -0.34 соответственно).

Результаты оценки содержания минеральных элементов в двух регионах были использованы для выявления возможной группировки образцов. Методом главных компонент (РСА) мы проанализировали взаимосвязь между концентрацией элементов в зерне и принадлежностью образцов к разным по происхождению группам: российские сорта, селекционные линии Самарского НИИСХ, селекционные линии других российских оригинаторов и иностранных сортообразцы (рис. 2).

В пространстве двух главных компонент, определяющих 64.7 и 18.7 % генетической вариации соответственно, все изученные образцы разделяются на две группы. Боль-

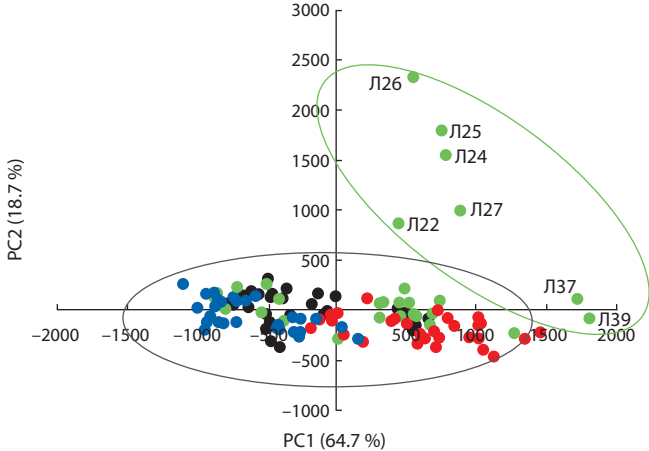


Рис. 2. Компонка образцов твердой пшеницы в пространстве двух главных компонент.

Образцы твердой пшеницы обозначены цветом: черным – российские сорта; синим – селекционные линии российских оригинаторов; зеленым – селекционные линии Самарского НИИСХ; красным – иностранные сортообразцы.

шинство образцов объединено в один большой кластер, при этом в левой части данного кластера группируются российские сорта твердой пшеницы, селекционные линии российских оригинаторов и частично линии Самарского НИИСХ. Сортообразцы иностранного происхождения находятся преимущественно в правой нижней части кластера. Семь линий, L22, L24, L25, L26, L27, L37 и L39, объединены в отдельную группу и достаточно далеко отстоят от остальных образцов, что может свидетельствовать о различиях на генетическом уровне. Сравнение этих линий по минеральному составу показало, что линии в среднем характеризуются более высокими концентрациями Mg, K, Zn и Fe (см. табл. S1).

Кластеризация образцов по методу UPGMA подтвердила наличие двух групп (рис. 3). Кластер 1 включает семь

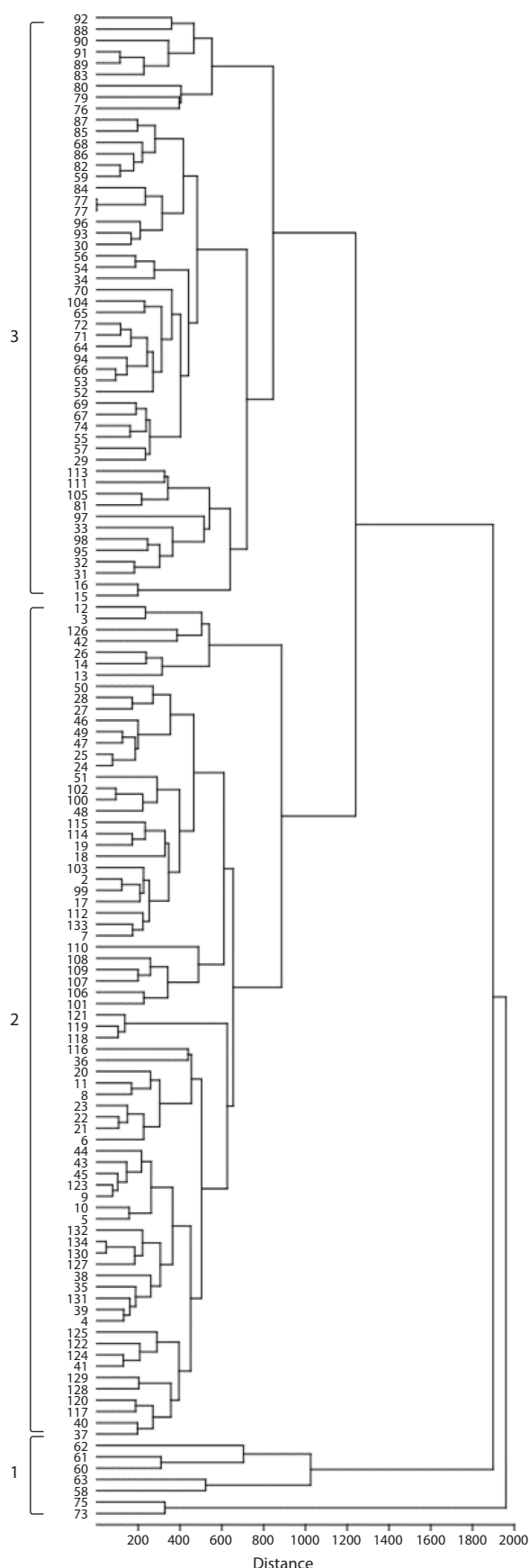


Рис. 3. Кластеризация образцов твердой пшеницы на основании результатов оценки концентрации 11 микро- и макроэлементов и токсичных металлов в зерне.

селекционных линий, Л22, Л24, Л25, Л26, Л27, Л37 и Л39, из Самарского НИИСХ и дистанционно отстоит от других образцов. Кластер 2 распадается на два субкластера (на рисунке обозначены как 2 и 3), один из которых включает в основном российские сорта и селекционные линии российских оригинаторов. Сортообразцы иностранной селекции группируются преимущественно в правой части субкластера 3.

Обсуждение

В данной работе мы исследовали концентрацию 11 микро- и макроэлементов и токсичных металлов в зерне коллекции образцов пшеницы, состоящей из российских и иностранных сортообразцов, выращенных в разных экологических условиях Самарской и Новосибирской областей. Для всех элементов показан высокий диапазон вариации, зависящий от влияния и генотипа, и условий внешней среды. Значительные региональные отличия выявлены нами по концентрации необходимых макро- и микроэлементов (Ca, K и Zn) и токсичных металлов (Pb, Cd и Cr) (см. табл. S1). Следует отметить, что размах варьирования K, Mg, Cu, Mn и Fe в обоих регионах был сравним с результатами И.В. Потоцкой с коллегами (2023), полученными при выращивании 20 российских и казахстанских сортов твердой пшеницы в Омской области. Исключение составляли параметры содержания Ca и Zn, концентрация которых была существенно выше для Ca и ниже для Zn на полях Омской области, в сравнении с Новосибирской областью.

Важным моментом является концентрация тяжелых металлов в зерне, поскольку, например, превышение в пищевых продуктах предельно допустимых концентраций (ПДК) таких необходимых для организма человека микроэлементов, как Zn и Cu, может приводить к токсическим эффектам. Для большинства образцов, выращенных в условиях Новосибирской области, концентрация цинка в зерне превышала ПДК (50 мг/кг), тогда как в образцах из Самарского региона его содержание было в пределах нормы (см. табл. S1). Возможно, что такие различия связаны с содержанием цинка в почве. Аналогично можно отметить и повышенный уровень свинца в зерне почти у половины сортообразцов, выращенных в обоих регионах.

По данным 30-летнего мониторинга минерального состава почвы в черноземах Западной Сибири не выявлено превышения ПДК подвижных форм тяжелых металлов Cu, Zn, Pb, Cd и Cr (Красницкий и др., 2024). Анализ почв в Самарской области также свидетельствует, что содержание подвижных форм свинца, никеля, хрома, меди и цинка на всех типах и подтипах почв разного состава и с разным содержанием гумуса не превышает ПДК (Обущенко, Гнеденко, 2014). Однако анализ токсичных металлов в почве полей, использованных для проведения эксперимента, не проводился, и данный вопрос требует дополнительного изучения.

Изменение концентрации тяжелых металлов в почве может быть связано с такими факторами, как система подготовки почвы, внесение органоминеральных удобрений, использование пестицидов и средств защиты растений, атмосферные осадки, различные антропогенные воздей-

ствия от промышленных предприятий, транспорта и др. В ряде работ показано, что систематическое внесение минеральных и органических удобрений способствует поступлению в почву тяжелых металлов и может влиять на минеральный состав зерна пшеницы и его концентрацию (Ryan et al., 2004; Pandino et al., 2020; Wysocka et al., 2025). Корневые и внекорневые обработки азотными удобрениями в различных концентрациях могут повышать поглощение и накопление Cd в зернах твердой пшеницы даже при низком уровне содержания Cd в почве (Özkutlu, 2024). Внесение органоминеральных удобрений под посевы ячменя в почвах Самарской области привело, например, к увеличению валового содержания тяжелых металлов (Cu, Cd, Pb, Zn) и их подвижности, а также повысило миграцию Pb в растения яровой пшеницы (Троц В.Б. и др., 2015; Троц Н.М., Бокова, 2024).

Загрязнение тяжелыми металлами может происходить в почвах, находящихся в зоне влияния промышленных предприятий (Просьянников, 2014). Механизмы переноса и накопления тяжелых металлов в системах «почва–растение» являются очень сложными, и интенсивность их накопления зависит как от типа токсичного элемента, так и от погодных условий и структуры почвы. Однако, несмотря на повышение концентраций тяжелых металлов в пахотных почвах, большинство исследователей утверждают, что это не сказывается на уровне накопления токсичных веществ в конечной сельскохозяйственной продукции (Протасова, 2005; Wang et al., 2017; Ugulu et al., 2021).

Данные, полученные для концентрации микро- и макроэлементов и тяжелых металлов, использованы для исследования группировки образцов в пространстве главных компонент и для построения филогенетического дерева. Результаты показали отсутствие четкого распределения на контрастные группы, за исключением небольшого числа линий, созданных в Самарском НИИСХ, и сортообразцов иностранной селекции (см. рис. 2 и 3). Российские линии, происходящие из разных селекционных центров, образуют единый кластер с сортами твердой пшеницы, внедренными в производство в разные годы, что может свидетельствовать о невысоком генетическом разнообразии как сортов, так и создаваемых линий. Современный мировой пул твердой пшеницы характеризуется умеренным генетическим разнообразием, что подтверждается результатами, полученными на широком наборе сортообразцов в разных странах (Zhao et al., 2009; Hakki et al., 2014; Носаоглу et al., 2020; Naseri et al., 2024).

Генетическое разнообразие российских сортов яровой твердой пшеницы, созданных за период 1929–2004 гг., было оценено с использованием данных родословных. Анализ установил, что около 20 % пула русских исконных сортов, ранее использованных для гибридизации, утеряно (Martynov et al., 2005). Аналогичный вывод можно сделать и в отношении иностранных сортов твердой пшеницы, поскольку основным направлением селекции в течение длительного времени было создание высокоурожайных генотипов, дополнительно характеризующихся устойчивостью к болезням и полеганию (Hernandez-Espinosa et al., 2020; Хуняс et al., 2020). До настоящего времени комплексных исследований генетического пула яровой

твердой пшеницы российского происхождения по минеральному составу не проводилось, поэтому сделать вывод о превосходстве стародавних сортов пока не представляется возможным.

Поиски источников генетического разнообразия заставляют обращать внимание на вовлечение в гибридизацию сородичей пшеницы, которые могут быть использованы для повышения содержания в зерне необходимых микро- и макроэлементов. Тетраплоидные виды *T. dicoccum*, *T. dicoccoides*, *T. timopheevii* и гибридные линии, полученные с их участием, отличаются значительно более высоким уровнем цинка и железа в зерне (Cakmak et al., 2010; Del Coco et al., 2019; Tekin et al., 2022; Leonova et al., 2024). Сведения о происхождении семи селекционных линий Самарского НИИСХ, выделившихся в отдельный кластер, свидетельствуют о том, что в процессе их создания были использованы тетраплоидные виды *T. dicoccum* и *T. timopheevii*. Проведенный ранее микросателлитный анализ ранних поколений этих линий показал наличие чужеродных транслокаций от *T. timopheevii* в хромосоме 6В (Мальчиков и др., 2015). Однако для установления связи между наличием чужеродных вставок в геноме и их влиянием на содержание определенных элементов необходимы дополнительные исследования.

Заключение

Оценка содержания микро- и макроэлементов и токсичных металлов в зерне сортов яровой твердой пшеницы выявила значительное варьирование большинства элементов в зависимости от генотипа и внешней среды. Наличие достоверных положительных корреляций Fe/Mn, Fe/Zn и Zn/Mn позволяет вести отбор генотипов по нескольким микроэлементам одновременно. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что российские сорта и селекционные линии отличаются умеренным генетическим разнообразием, однако размах варьирования признака позволяет отобрать образцы, которые могут быть использованы для улучшения минерального состава зерна. Показано, что содержание Cd в зерне у всех изученных образцов, за исключением пяти образцов иностранной коллекции, не превышает ПДК. Для установления у ряда изученных образцов причины высокого содержания Zn, Pb и Cr, превышающих ПДК, необходимы дополнительные сведения о концентрации этих металлов в почве экспериментальных участков.

Список литературы / References

- Гончаров С.В., Курашов М.Ю. Перспективы развития российского рынка твердой пшеницы. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2018;2(57):66-75. doi 10.17238/issn2071-2243.2018.2.66
[Goncharov S.V., Kurashov M.Yu. Prospects for the development of the Russian durum wheat market. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018;2(57):66-75. doi 10.17238/issn2071-2243.2018.2.66 (in Russian)]
- Красницкий В.М., Бобренко И.А., Шмидт А.Г., Бобренко Е.Г. Мониторинг тяжелых металлов и мышьяка в черноземах и растениях юга Западной Сибири. *Плодородие*. 2024;6(141):99-103. doi 10.25680/S19948603.2024.141.23

- [Krasnitsky V.M., Bobrenko I.A., Schmidt A.G., Bobrenko E.G. Monitoring of heavy metals and arsenic in chernozems and plants of the south of Western Siberia. *Plodorodie*. 2024;6(141):99-103. doi 10.25680/S19948603.2024.141.23 (in Russian)]
- Мальчиков П.Н., Мясникова М.Г. Развитие селекции яровой твердой пшеницы в России (странах бывшего СССР), результаты и перспективы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2023; 27(6):591-608. doi 10.18699/VJGB-23-71
- [Malchikov P.N., Myasnikova M.G. Development, results and prospects of the spring durum wheat breeding in Russia (post-Soviet states). *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = *Vavilov J Genet Breed*. 2023;27(6):591-608. doi 10.18699/VJGB-23-71]
- Мальчиков П.Н., Мясникова М.Г., Леонова И.Н., Салина Е.А. Интрогрессия устойчивости к мучнистой росе (*Blumeria graminis* DC. f. *tritici*) от *Triticum timopheevii* Zhuk. и *Triticum dicoccum* Shuebl. в геном *Triticum durum* Desf. *Зерновое хозяйство России*. 2015;2:63-67
- [Malchikov P.N., Maysnikova M.G., Leonova I.N., Salina E.A. Introgression of stability to powdery mildew (*Blumeria graminis* DC. f. *tritici*) from *Triticum timopheevii* Zhuk. and *Triticum dicoccum* Shuebl. in genome *Triticum durum* Desf. *Zernovoe Khozyajstvo Rossii* = *Grain Economy of Russia*. 2015;2:63-67 (in Russian)]
- Обущенко С.В., Гнеденко В.В. Мониторинг содержания микроэлементов и тяжелых металлов в почвах Самарской области. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014;7:30-34
- [Obuschenko S.V., Gnedenko V.V. Monitoring of micronutrient and heavy metal content in soil of Samara region. *Mezhdunarodny Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovanij* = *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014;7:30-34 (in Russian)]
- Потоцкая И.В., Кошкин М.Н., Шпигель А.Л., Шаманин В.П. Изменчивость содержания макро- и микроэлементов в зерне твердой пшеницы в условиях южной лесостепи Западной Сибири. *Вестник Омского ГАУ*. 2023;2(50):58-67
- [Pototskaya I.V., Koshkin M.N., Shpigel A.L., Shamanin V.P. Variability of the of macro- and microelements content in the grain of durum wheat under conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia. *Vestnik Omskogo GAU* = *Vestnik of Omsk SAU*. 2023;2(50):58-67 (in Russian)]
- Просьянников В.И. Эколого-агрохимическая характеристика почв пашни юго-востока Западной Сибири по содержанию тяжелых металлов. *Плодородие*. 2014;5:41-43
- [Prosyannikov V.I. Ecological-agrochemical characterization of arable soils in the south-eastern region of Western Siberia in terms of heavy metal contents. *Plodorodie*. 2014;5:41-43 (in Russian)]
- Протасова Н.А. Тяжелые металлы в черноземах и культурных растениях Воронежской области. *Агрохимия*. 2005;2:80-86
- [Protasova N.A. Heavy metals in chernozems and cultivated plants of the Voronezh region. *Agrokhimia*. 2005;2:80-86 (in Russian)]
- Сочалова Л.П., Апарина В.А., Бойко Н.И., Зуев Е.В., Морозова Е.В., Мусинов К.К., Виниченко Н.А., Леонова И.Н., Пискарев В.В. Изучение устойчивости к бурой ржавчине, урожайности и качества зерна у образцов коллекции мягкой пшеницы в экологических условиях Новосибирской области. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2023;27(8):988-999. doi 10.18699/VJGB-23-114
- [Sochalova L.P., Aparina V.A., Boyko N.I., Zuev E.V., Morozova E.V., Musinov K.K., Vinichenko N.A., Leonova I.N., Piskarev V.V. Studying a collection of common-wheat varieties for leaf rust resistance, crop yield and grain quality in the environmental conditions of Novosibirsk region. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = *Vavilov J Genet Breed*. 2023;27(8):988-999. doi 10.18699/VJGB-23-114]
- Троц В.Б., Ахматов Д.А., Троц Н.М. Влияние минеральных удобрений на аккумуляцию тяжелых металлов в почве и фитомассе зерновых культур. *Зерновое хозяйство России*. 2015;1:95-104
- [Trots V.B., Akhmatov D.A., Trots N.M. Influence of fertilizers on accumulation of heavy metal in soil and phytomass of grain crops. *Zernovoe Khozyajstvo Rossii* = *Grain Econ Russ*. 2015;1:95-104 (in Russian)]
- Троц Н.М., Бокова А.А. Влияние органоминеральных удобрений на аккумуляцию тяжелых металлов в черноземных почвах в условиях Среднего Поволжья. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024;9(1):81-88. doi 10.55170/1997-3225-2024-9-1-81-88
- [Trots N.M., Bokova A.A. Influence of organomineral fertilizers on the accumulation of heavy metals in chernozem soils under conditions of the Middle Volga region. *Bulletin of Samara State Agricultural Academy*. 2024;9(1):81-88. doi 10.55170/1997-3225-2024-9-1-81-88 (in Russian)]
- Aghalari Z., Dahms H.U., Sillanpää M. Evaluation of nutrients in bread: a systematic review. *J Heal Popul Nutr*. 2022;41(1):50. doi 10.1186/s41043-022-00329-3
- Ali A.A.H. Overview of the vital roles of macro minerals in the human body. *J Trace Elem Miner*. 2023;4:100076. doi 10.1016/j.jtemin.2023.100076
- Bordoni A., Danesi F., Di Nunzio M., Taccari A., Valli V. Ancient wheat and health: a legend or the reality? A review on KAMUT khorasan wheat. *Intern J Food Sci Nutrition*. 2017;68(3):278-286. doi 10.1080/09637486.2016.1247434
- Cakmak I., Pfeiffer W.H., McClafferty B. Biofortification of durum wheat with zinc and iron. *Cereal Chem*. 2010;87(1):10-20. doi 10.1094/CCHEM-87-1-0010
- Camaschella C. Iron deficiency. *Blood*. 2019;133(1):30-39. doi 10.1182/blood-2018-05-815944
- Del Coco L., Laddomada B., Migoni D., Mita G., Simeone R., Fanizzi F.P. Variability and site dependence of grain mineral contents in tetraploid wheats. *Sustainability*. 2019;11(3):736. doi 10.3390/su11030736
- Dixit S.P., Rajan L., Palaniswamy D., Mohankumar S.K. Importance of iron absorption in human health: an overview. *Curr Nutr Food Sci*. 2020;17(3):293-301. doi 10.2174/1573401316999200801021752
- Gordeeva E.I., Shamanin V.P., Khlestkina E.K., Shoeva O.Y. On peculiarities of breeding purple-grained wheat based on varieties with anthocyanin pigmentation of coleoptiles and stems. *Agric Biol*. 2024; 59(3):507-524. doi 10.15389/agrobiol.2024.3.507eng
- Hakki E.E., Dograr N., Pandey A., Khan M.K., Hamurcu M., Kayis S.A., Gezgin S., Ölmez F., Akkaya M.S. Molecular and elemental characterization of selected Turkish durum wheat varieties. *Not Bot Horti Agrobot Cluj-Napoca*. 2014;42(2):431-439. doi 10.15835/nbha4229621
- Hambidge M. Human zinc deficiency. *J Nutr*. 2000;130(5):1344S-1349S. doi 10.1093/jn/130.5.1344S
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol Electron*. 2001;4(1):1-9
- Hernandez-Espinosa N., Laddomada B., Payne T., Huerta-Espino J., Govindan V., Ammar K., Ibba M.I., Pasqualone A., Guzman C. Nutritional quality characterization of a set of durum wheat landraces from Iran and Mexico. *LWT*. 2020;124:109198. doi 10.1016/j.lwt.2020.109198
- Hocaoglu O., Akçura M., Kaplan M. Changes in the grain element contents of durum wheat varieties of Turkey registered between 1967–2010. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 2020;51(4):431-439. doi 10.1080/00103624.2019.1709487
- Islam M.R., Akash S., Jony M.H., Alam M.N., Nowrin F.T., Rahman M.M., Rauf A., Thiruvengadam M. Exploring the potential function of trace elements in human health: a therapeutic perspective. *Mol Cell Biochem*. 2023;478(10):2141-2171. doi 10.1007/s11010-022-04638-3
- Jomova K., Makova M., Alomar S.Y., Alwasel S.H., Nepovimova E., Kuca K., Rhodes C.J., Valko M. Essential metals in health and disease. *Chem Biol Interact*. 2022;367:110173. doi 10.1016/j.cbi.2022.110173

- Jomova K., Alomar S.Y., Nepovimova E., Kuca K., Valko M. Heavy metals: toxicity and human health effects. *Arch Toxicol.* 2025;99: 153-209. doi 10.1007/s00204-024-03903-2
- Khokhar J.S., Sareen S., Tyagi B.S., Singh G., Wilson L., King I.P., Young S.D., Broadley M.R. Variation in grain Zn concentration, and the grain ionome, in field-grown Indian wheat. *PLoS One.* 2018; 13(1):e0192026. doi 10.1371/journal.pone.0192026
- Kiran, Bharti R., Sharma R. Effect of heavy metals: an overview. *Mater Today Proc.* 2022;51:880-885. doi 10.1016/j.matpr.2021.06.278
- Leonova I.N., Kiseleva A.A., Salina E.A. Identification of genomic regions conferring enhanced Zn and Fe concentration in wheat varieties and introgression lines derived from wild relatives. *Int J Mol Sci.* 2024;25(19):10556. doi 10.3390/ijms251910556
- Martínez-Moreno F., Ammar K., Solís I. Global changes in cultivated area and breeding activities of durum wheat from 1800 to date: a historical review. *Agronomy.* 2022;12(5):1135. doi 10.3390/agronomy12051135
- Martynov S.P., Dobrovorskaya T.V., Pukhalskiy V.A. Analysis of genetic diversity of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars released in Russia in 1929–2004. *Russ J Genet.* 2005;41(10): 1113-1122. doi 10.1007/s11177-005-0208-4
- Morgounov A., Li H., Shepelev S., Ali M., Flis P., Koksel H., Savin T., Shamanin V. Genetic characterization of spring wheat germplasm for macro-, microelements and trace metals. *Plants.* 2022;11(16): 2173. doi 10.3390/plants11162173
- Naseri R., Cheghamirza K., Mohammadi R., Zarei L., Beheshti A.A. Evaluation of grain quality and its relationship with agro-physiological traits in durum wheat. *Cereal Res Commun.* 2024;52(2):813-823. doi 10.1007/s42976-023-00430-1
- Olivares M., Uauy R. Copper as an essential nutrient. *Am J Clin Nutr.* 1996;63(5):791S-796S. doi 10.1093/ajcn/63.5.791
- Orlovskaya O.A., Vakula S.I., Khotyleva L.V., Kilchevsky A.V. Mineral composition of bread wheat lines with introgressions of alien genetic material. *Proc Appl Bot Genet Breed.* 2023;184(1):42-52. doi 10.30901/2227-8834-2023-1-42-52
- Özkutlu F. Effects of applying different N sources on Cd accumulation, mineral micronutrients, and grain yield of durum wheat. *J Soil Sci Plant Nutr.* 2024;24:4261-4268. doi 10.1007/s42729-024-01831-9
- Pandino G., Mattiolo E., Lombardo S., Lombardo G.M., Mauromicale G. Organic cropping system affects grain chemical composition, rheological and agronomic performance of durum wheat. *Agriculture.* 2020;10(2):46. doi 10.3390/agriculture10020046
- Potapova N.A., Timoshchuk A.N., Tiys E.S., Vinichenko N.A., Leonova I.N., Salina E.A., Tsepilov Y.A. Multivariate genome-wide association study of concentrations of seven elements in seeds reveals four new loci in Russian wheat lines. *Plants.* 2023;12(17):3019. doi 10.3390/plants12173019
- Ryan M.H., Derrick J.W., Dann P.R. Grain mineral concentrations and yield of wheat grown under organic and conventional management. *J Sci Food Agric.* 2004;84(3):207-216. doi 10.1002/jsfa.1634
- Saini P., Kaur H., Tyagi V., Saini P., Ahmed N., Dhaliwal H.S., Sheikh I. Nutritional value and end-use quality of durum wheat. *Cereal Res Commun.* 2023;51:283-294. doi 10.1007/s42976-022-00305-x
- Schoofs H., Schmit J., Rink L. Zinc toxicity: understanding the limits. *Molecules.* 2024;29(13):3130. doi 10.3390/molecules29133130
- Shamanin V.P., Pototskaya I.V., Chursin A.S., Shepelev S.S., Nardin D.S., Pozherukova V.E., Köksel H., Morgounov A.I. Breeding spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties with functional properties of grain for environmentally friendly growing in Western Siberia. *Agric Biol.* 2024;59(3):492-506. doi 10.15389/agrobiology.2024.3.492eng
- Shepelev S., Morgounov A., Flis P., Koksel H., Li H., Savin T., Sharma R., Wang J., Shamanin V. Variation of macro- and microelements, and trace metals in spring wheat genetic resources in Siberia. *Plants.* 2022;11(2):149. doi 10.3390/plants11020149
- Sigel A., Sigel H., Sigel R. (Eds) Interrelations between Essential Metal Ions and Human Diseases. Metal Ions in Life Sciences. Vol. 13. Springer, 2013. doi 10.1007/978-94-007-7500-8
- Tadesse W., Sanchez-Garcia M., Assefa S.G., Amri A., Bishaw Z., Ogonnaya F.C., Baum M. Genetic gains in wheat breeding and its role in feeding the world. *Crop Breed Genet Genom.* 2019;1:e190005. doi 10.20900/cbgs20190005
- Tanin M.J., Saini D.K., Kumar P., Gudi S., Sharma H., Kaur J.P., Abassy O., Bromand F., Sharma A. Iron biofortification in wheat: past, present, and future. *Curr Plant Biol.* 2024;38:100328. doi 10.1016/j.cpb.2024.100328
- Tekin M., Emiralioğlu O., Yeken M.Z., Nadeem M.A., Çiftçi V., Baloch F.S. Wild relatives and their contributions to wheat breeding. In: Ancient Wheats. Springer International Publ., 2022;197-233. doi 10.1007/978-3-031-07285-7_9
- Ugulu I., Ahmad K., Khan Z.I., Munir M., Wajid K., Bashir H. Effects of organic and chemical fertilizers on the growth, heavy metal/metalloid accumulation, and human health risk of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environ Sci Pollut Res Int.* 2021;28(10):12533-12545. doi 10.1007/s11356-020-11271-4
- Virk P.S., Andersson M.S., Arcos J., Govindaraj M., Pfeiffer W.H. Transition from targeted breeding to mainstreaming of biofortification traits in crop improvement programs. *Front Plant Sci.* 2021;12: 703990. doi 10.3389/fpls.2021.703990
- Wang S., Wu W., Liu F., Liao R., Hu Y. Accumulation of heavy metals in soil-crop systems: a review for wheat and corn. *Environ Sci Pollut Res.* 2017;24(18):15209-15225. doi 10.1007/s11356-017-8909-5
- Wessling-Resnick M. Excess iron: considerations related to development and early growth. *Am J Clin Nutr.* 2017;106:1600-1605. doi 10.3945/ajcn.117.155879
- Wysocka K., Cacak-Pietrzak G., Sosulski T. Mineral concentration in spring wheat grain under organic, integrated, and conventional farming systems and their alterations during processing. *Plants.* 2025; 14(7):1003. doi 10.3390/plants14071003
- Xynias I.N., Mylonas I., Korpetis E.G., Ninou E., Tsaballa A., Avdikos I.D., Mavromatis A.G. Durum wheat breeding in the Mediterranean region: current status and future prospects. *Agronomy.* 2020; 10(3):432. doi 10.3390/agronomy10030432
- Zhao F.J., Su Y.H., Dunham S.J., Rakszegi M., Bedo Z., McGrath S.P., Shewry P.R. Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin. *J Cereal Sci.* 2009;49(2):290-295. doi 10.1016/j.jcs.2008.11.007
- Zoroddu M.A., Aaseth J., Crisponi G., Medici S., Peana M., Nurchi V.M. The essential metals for humans: a brief overview. *J Inorg Biochem.* 2019;195:120-129. doi 10.1016/j.jinorgbio.2019.03.013

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.05.2025. После доработки 25.06.2025. Принята к публикации 30.06.2025.