

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.11-021.414
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115



Стародавние сорта пшеницы – источники высокого качества и питательных свойств зерна

В. П. Шаманин¹, И. В. Потоцкая¹, С. А. Ессе¹, М. С. Гладких¹, С. С. Шепелев¹, Е. В. Зуев², Н. А. Виниченко³,
Х. Коксель⁴, А. И. Моргунов⁵

¹ Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Омск, Россия

² Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Курчатовский геномный центр, Новосибирск, Россия

⁴ Университет Истинье, Стамбул, Турция;

⁵ Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан

Автор, ответственный за переписку: Инна Владимировна Потоцкая, iv.pototskaya@omgau.org

Актуальность. Повышение качества зерна у современных сортов яровой мягкой пшеницы – весьма актуальная задача селекции, для решения которой значительный интерес представляют стародавние сорта пшеницы (landraces), богатая коллекция которых имеется в ВИР. В связи с этим цель исследования – выделить источники повышенного содержания белка, клейковины, макро- и микроэлементов из выборки образцов стародавней яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР для селекции на повышение качества зерна.

Материалы и методы. Полевые исследования выполнены в 2020–2021 гг. на опытном поле Омского ГАУ в условиях южной лесостепи Западной Сибири. Посев проводили по пару в общепринятые сроки сева. Анализ минерального состава зерна образцов стародавних сортов осуществлен в Курчатовском геномном центре ИЦиГ СО РАН методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Результаты. Показано, что образцы, представляющие стародавние сорта разных регионов России, а также Казахстана, Таджикистана и Киргизии, характеризовались высоким содержанием белка (18,4–18,8%) и клейковины (35,9–36,0%) в зерне. Образцы из Казахстана отличались низким уровнем содержания Zn (в среднем 38,3 мг/кг), из Киргизии, напротив, повышенным содержанием Zn (41,9 мг/кг) и Fe (55,1 мг/кг), а из Таджикистана – высоким уровнем K (3820 мг/кг). У образцов стародавней пшеницы выявлена положительная связь между содержанием в зерне Mg, Mn, Fe и Zn.

Заключение. Образцы стародавней пшеницы представляют интерес в качестве источников для создания высокобелковых сортов с улучшенной питательной ценностью зерна.

Ключевые слова: яровая мягкая пшеница, стародавние сорта, макро- и микроэлементный состав зерна, технологические свойства зерна

Благодарности: анализ содержания макро- и микроэлементов в зерне стародавних сортов пшеницы выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-534 от 28.05.2021); анализ и статистическая обработка экспериментальных данных проведены при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 22-16-20008 от 23.03.2022).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Шаманин В.П., Потоцкая И.В., Ессе С.А., Гладких М.С., Шепелев С.С., Зуев Е.В., Виниченко Н.А., Коксель Х., Моргунов А.И. Стародавние сорта пшеницы – источники высокого качества и питательных свойств зерна. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):103-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115

© Шаманин В.П., Потоцкая И.В., Ессе С.А., Гладких М.С., Шепелев С.С., Зуев Е.В., Виниченко Н.А., Коксель Х., Моргунов А.И., 2023

COLLECTIONS OF THE WORLD'S CROP GENETIC RESOURCES FOR THE DEVELOPMENT OF PRIORITY PLANT BREEDING TRENDS

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115

Wheat landraces as sources of high grain quality and nutritional properties

Vladimir P. Shamanin¹, Inna V. Pototskaya¹, Svetlana A. Esse¹, Marina S. Gladkih¹, Sergey S. Shepelev¹, Evgeny V. Zuev², Natalia A. Vinichenko³, Hamit Koksel⁴, Alexey I. Morgounov⁵

¹ Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia

² N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

³ Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kurchatov Genomic Center, Novosibirsk, Russia

⁴ Istinye University, Istanbul, Turkey

⁵ S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan

Corresponding author: Inna V. Pototskaya, iv.pototskaya@omgau.org

Background. Improving the grain quality of modern spring bread wheat cultivars is a highly relevant task of breeding. To solve this problem, old and local wheat varieties (landraces) are of considerable interest. A rich collection of them is available among the plant genetic resources preserved at VIR. With this in view, the aim of this research was to identify sources of high protein, gluten, macro- and micronutrient content out of the landraces from the VIR collection for improvement of wheat grain quality through breeding.

Materials and methods. Field and laboratory research were conducted in the experimental field of Omsk State Agrarian University under the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia in 2020–2021. Sowing was carried out on fallow on conventional sowing dates. Mineral composition in the grain of the studied landraces was analyzed at the Kurchatov Genomic Center, Novosibirsk, using atomic absorption spectrometry techniques.

Results. The research results showed that landraces from different regions of Russia, Kazakhstan, Tajikistan, and Kyrgyzstan were characterized by high levels of protein (18.4–18.8%) and gluten (35.9–36.0%) in grain. Landraces from Kazakhstan had low Zn content (on average 38.3 mg/kg), while those from Kyrgyzstan, on the contrary, had high content of Zn (41.9 mg/kg) and Fe (55.1 mg/kg), and landraces from Tajikistan had high K content (3820 mg/kg). A positive relationship between the concentrations of Mg, Mn, Fe, and Zn was found in the grain of wheat landraces.

Conclusion. Wheat landraces are of interest as genetic resources for the development of high-protein cultivars with improved nutritional value of grain for the milling and breadmaking industries.

Keywords: spring bread wheat, landraces, macro- and micronutrient composition of grain, technological properties of grain

Acknowledgements: the analysis of macro- and micronutrient content in the grain of wheat landraces was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2021-534 of May 28, 2021); the analysis and statistical processing of the experimental data were carried out with the support of the Russian Science Foundation (Agreement No. 22-16-20008 of March 23, 2022).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Shamanin V.P., Pototskaya I.V., Esse S.A., Gladkih M.S., Shepelev S.S., Zuev E.V., Vinichenko N.A., Koksel H., Morgounov A.I. Wheat landraces as sources of high grain quality and nutritional properties. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):103-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115

Введение

Резкое снижение генетического разнообразия мягкой пшеницы по устойчивости к биотическим и абиотическим стрессорам произошло в результате целенаправленной селекции на повышение продуктивности и многовекового отбора сельскохозяйственных растений (Sehgal et al., 2016; Pototskaya et al., 2021).

Внедрение новых высокоурожайных сортов пшеницы в сельском хозяйстве привело к снижению биологической и питательной ценности зерна. Начиная с середины 1960-х годов уровень цинка, железа, меди и магния в зерне короткостебельных высокоурожайных сортов пшеницы существенно снизился (Fan et al., 2008). В связи с массовым внедрением интенсивных технологий производства сельскохозяйственной продукции с применением химических удобрений, пестицидов, различных стимуляторов роста, гормонов также наблюдается прогрессирующее снижение уровня макро- и микроэлементов в продукции растениеводства, предназначенной для потребления человеком в виде источников питания (Morgounov et al., 2007; Shukla et al., 2018).

Стародавние сорта пшеницы (landraces) представляют собой ценный генетический ресурс для ее селекции. В этом плане коллекция яровой мягкой пшеницы Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) является уникальной. Благодаря экспедициям Н. И. Вавилова и его соратников в разные страны мира большая часть коллекции, а именно 3674 образца пшеницы, была включена в нее до 1940 г. (Zuev et al., 2019). Для любого генетического банка семян такой материал имеет особую ценность, поскольку в нем содержится значительный запас комбинаций аллелей генов, обуславливающих приспособленность пшеницы к различным почвенно-климатическим условиям, устойчивость к биотическим факторам и высокое качество зерна (Baboev et al., 2021; Husenov et al., 2021).

Однако генотипический потенциал стародавних сортов маловостребован и практически не используется в селекции, которая в основном ориентирована на высокую урожайность. Изучение обширной коллекции стародавних сортов из 32 стран Западной Европы, России, Южной Азии и Австралии, так называемой «A.E. Watkins bread wheat landrace collection» (далее: Watkins-коллекция), и реализация программы WISP (Wheat Improvement Strategic Programme) свидетельствуют о селекционной ценности стародавних сортов в качестве исходного материала (Wingen et al., 2014). Анализ генетического разнообразия образцов Watkins-коллекции с использованием ДНК-чипа 35K выявил значительное количество новых SNP-локусов, которые представляют собой неиспользованный генетический потенциал для практической селекции (Winfield et al., 2018). Также проведена оценка полиморфизма образцов Watkins-коллекции по аллелям генов пуриноидинов *Pina-D1* и *Pinb-D1*, контролирующих твердозерность зерновки (Qamar et al., 2014). В ходе анализа полиморфизма ДНК у 446 местных сортов из Афганистана с использованием метода генотипирования путем секвенирования (genotyping by sequencing, GBS) были идентифицированы новые аллельные варианты ценных для селекции генов (Manickavelu et al., 2014).

Стародавние сорта обладают более высокой питательной ценностью в сравнении с современными сортами пшеницы; выявлены генотипические различия по содержанию в зерне стародавних сортов макро- и микроэлементов: K, P, Mg, Fe и Zn (Jakobsone et al., 2015; Velu

et al., 2019). За последние 5–7 лет наблюдается повышенный интерес к стародавним сортам пшеницы, зерно которых рассматривают в качестве источника питания, оказывающего положительное влияние на здоровье человека (Morgounov et al., 2016; Shewry, 2018). Этой теме почти целиком были посвящены международные конференции в Италии в 2018 г. и Турции в 2019 г. Тем не менее количество исследований по оценке минерального состава и технологических свойств зерна стародавних сортов весьма ограничено. Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина (Омский ГАУ) получил образцы стародавних сортов яровой мягкой пшеницы, которые выращивали когда-то на территории Российской Империи и бывшего СССР, для создания целевой коллекции генотипов с улучшенными признаками качества зерна.

Цель исследования – выделить источники повышенного содержания белка, клейковины, макро- и микроэлементов из выборки образцов стародавних сортов яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР для селекции на повышение качества зерна пшеницы.

Материал и методы

Материал выращивали на опытном поле Омского ГАУ (55°01' с. ш., 73°18' в. д.) в условиях южной лесостепи Западной Сибири в период 2020–2021 гг. Изучено 75 образцов стародавних сортов пшеницы из коллекции ВИР (табл. 1).

Изученные стародавние сорта принадлежали восьми разновидностям вида *Triticum aestivum* L.: *lutescens* (Alef.) Mansf., *erythrospermum* (Koern.) Mansf., *ferrugineum* (Alef.) Mansf., *milturum* (Alef.) Mansf., *turcicum* (Koern.) Mansf., *caesium* (Alef.) Mansf., *albidum* (Koern.) Mansf., *graecum* (Koern.) Mansf. Все образцы происхождения из Российской Империи и разных регионов бывшего Советского Союза. Сбор образцов и включение их в коллекцию ВИР проводены с 1908 по 1951 г., широко представлены образцы (45 шт.), пополнившие коллекцию с 1912 по 1929 г. Российские стародавние сорта родом из Краснодарского края, Поволжья, Северо-Западного региона, Западной и Восточной Сибири, а также Дальнего Востока.

В 2020 г. семена каждого образца стародавнего сорта были посеяны вручную по одному рядку длиной 1 м. в 2-кратной повторности, расстояние между рядками – 20 см. В 2021 г. посев образцов стародавней пшеницы проводили сеялкой ССФК-7 на глубину 5 см, площадь делянки – 1 м², в 2-кратной повторности. Способ посева рядовой, норма высева – 500 зерен на 1 м². В качестве стандарта высевали сорт яровой мягкой пшеницы 'Элемент 22'.

Погодные и почвенные условия. В период вегетации яровой пшеницы в 2020 г. наблюдался недобор осадков в течение вегетационного периода – 167 мм со среднесуточной температурой воздуха 17,1°C. В 2021 г. также отмечены неблагоприятные гидротермические условия для роста и развития растений пшеницы – средняя температура – 16,7°C, сумма осадков – 170 мм. Почва опытного поля Омского ГАУ лугово-черноземная, тяжелосуглинистого гранулометрического состава, содержит 5,2% гумуса.

Метод атомно-абсорбционной спектроскопии. В 2021 г. анализ минерального состава зерна образцов стародавней пшеницы проведен в Курчатковском геномном центре ИЦиГ СО РАН по следующим макро- и микроэлементам: Ca, K, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn. Анализ каждого об-

Таблица 1. Образцы стародавних сортов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР, изученных в Омском ГАУ, 2020–2021 гг.**Table 1. Accessions of spring bread wheat landraces from the VIR collection studied at Omsk State Agrarian University, 2020–2021**

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Год включения в коллекцию / Year of inclusion into the collection	Число образцов, шт. / Number of accessions, pcs.	Происхождение / Origin
404; 1135; 1934; 1964; 1986; 2938; 4130; 4145; 8042; 8076; 8114; 8884; 9116; 9137; 9141; 9207; 9611; 9889; 11373; 14688; 16111; 22234; 22396; 22400; 22471; 22687; 23303; 23317; 23320; 23327; 23330; 23348; 24873; 24882; 24941; 24942; 24989; 25014; 26446; 26465; 26473; 30933; 31917; 32651; 35977; 37319; 38587	1908–1912 1915–1924 1926–1929 1930–1935 1938–1947	6 14 18 6 3	Россия / Russia
2998; 11358; 25051; 25565; 25567; 25568; 25571; 25769; 27968; 30317; 34278; 34304; 34351; 34418; 34504; 34506; 34507; 34605; 40793	1912–1924 1929–1931 1934–1951	2 7 10	Казахстан / Kazakhstan
22683; 24770; 24773; 29619;	1928–1932	4	Таджикистан / Tajikistan
3256; 25225; 25250; 25273; 39267	1913–1929 1948	4 1	Киргизия / Kyrgyzstan

разца выполнен в 2-кратной повторности. За окончательный результат измерений принимали среднее арифметическое результатов двух параллельных измерений в каждой повторности. Химические элементы извлекались из пробы (~300 мг) семян следующей смесью: 0,5 мл H_2O , 0,5 мл концентрированной H_2O_2 (33%), 5 мл концентрированной HNO_3 (65%). Для подготовки проб использовали микроволновую систему Milestone Ethos UP. В дальнейшем объем пробы доводили до 50 мл деионизованной водой и использовали для анализа макро- и микроэлементов. Для измерения количества макроэлементов пробу разбавляли еще в 50 раз. Анализ содержания химических элементов проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с атомизацией в пламени на приборе ContrAA 800 D (Analytik Jena, Германия). Содержание элементов приводится в мг на кг сухого вещества. Расхождение между двумя параллельными вариантами (DV) рассчитывалось как $(\max - \min) / \min$, выраженное в процентах.

Качество зерна. Анализ содержания белка и клейковины в зерне выполнен методом ИК-спектроскопии с помощью анализатора «Инфралюм ФТ 10 М» (Санкт-Петербург, Россия).

Статистическая обработка экспериментальных данных включала определение средних арифметических (\bar{X}), стандартных ошибок средних ($\pm Sx$), достоверность различий оценивали по наименьшей существенной разности на уровне значимости 5% (HCp_{05}) по результатам двухфакторного дисперсионного анализа (Dospikhov, 1985) с помощью программы STATISTICA v. 6.0 (StatSoft, Inc., США). Кластерный анализ выполнен методом парного внутригруппового невзвешенного среднего (UPGMA – Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean) с помощью программы SPSS версии PASW Statistics 20.0 (IBM, США).

Результаты

Сравнительный анализ четырех групп образцов стародавней пшеницы из России, Казахстана, Таджикистана и Киргизии (рис. 1) по основным агрономическим признакам (массе 1000 зерен, содержанию белка, клейковины и урожайности) показал небольшое преимущество по крупности зерна образцов из России и Казахстана в 2020 г. (38,8 и 38,4 г соответственно) в сравнении с образцами из Таджикистана и Киргизии (36,8 и 36,4 г).

Стандартный сорт ‘Элемент 22’ превосходил образцы стародавней пшеницы по массе 1000 зерен в 2020–2021 гг. (42,5 и 38,7 г). В 2020 г. образцы из Казахстана имели наиболее высокую урожайность (492,7 г/м²), а из Киргизии – наиболее низкую (420,9 г/м²). В 2021 г. урожайность изучаемых групп образцов варьировала от 317,6 до 342,8 г/м². По урожайности изученные образцы существенно уступали засухоустойчивому стандарту в оба года исследований (625,4 и 615 г/м²). Существенных различий между изученными группами образцов, а также в сравнении их со стандартом по накоплению белка и клейковины в зерне не выявлено. В среднем за два года исследований изученные группы образцов характеризовались высоким содержанием белка (18,7%; 18,4%; 18,8% и 18,6%) и клейковины в зерне (35,7%; 35,1%; 35,9% и 36,0%).

Минеральный состав зерна образцов, относящихся к разным по происхождению группам, существенно не различался (табл. 2).

Отмечена высокая массовая доля в зерне стародавней пшеницы Fe – 51,0–55,1 мг/кг (DV = 4,3–5,9%), а также Ca – 634,8–643,3 мг/кг (DV = 15,5–19,5%) и Zn – 40,4–41,9 мг/кг (DV = 5,4–9,6%), за исключением группы образцов из Казахстана. Средние значения концентрации K, Mg, Cu и Mn по группам образцов разного географиче-

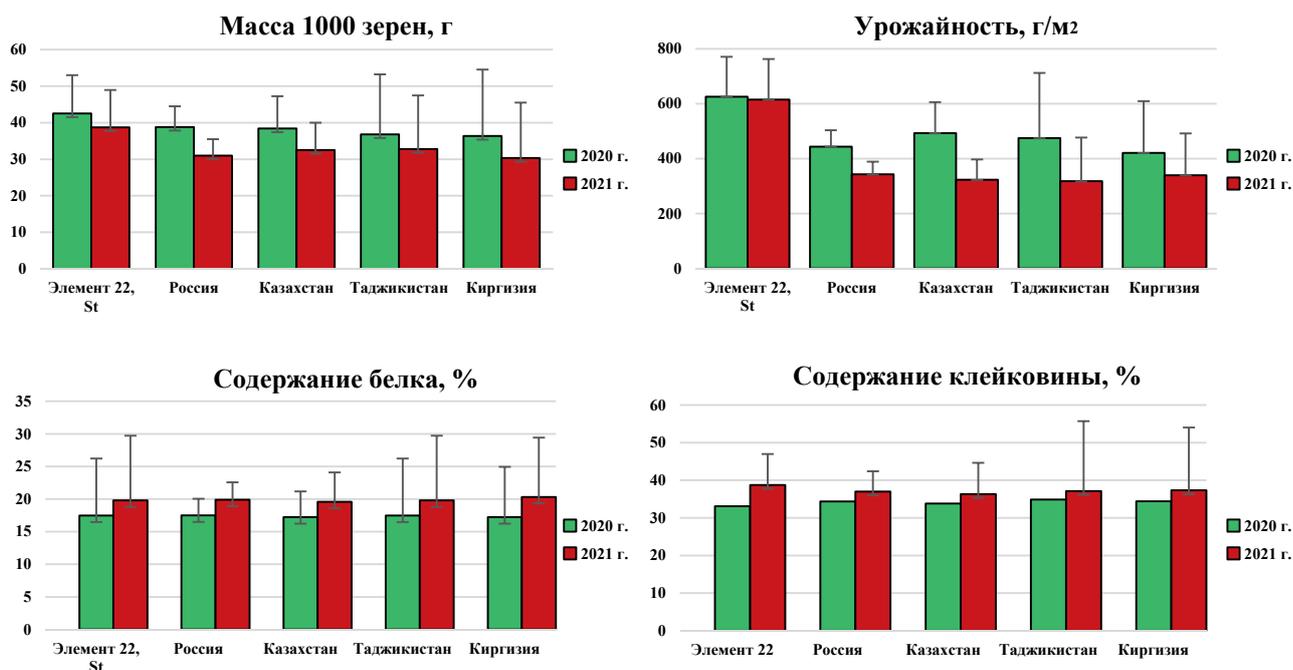


Рис. 1. Урожайность и технологические свойства зерна образцов стародавней пшеницы различного происхождения (опытное поле Омского ГАУ, 2020–2021 гг.)

Fig. 1. Grain yield and technological properties of wheat landrace accessions of various origin (experimental field of Omsk State Agrarian University, 2020–2021)

Таблица 2. Концентрация макро- и микроэлементов в зерне образцов стародавней пшеницы (опытное поле Омского ГАУ, 2021 г.)

Table 2. Concentrations of mineral macro- and micronutrients in the grain of wheat landrace accessions (experimental field of Omsk State Agrarian University, 2021)

Происхождение / Origin	Число образцов / Numbers of accessions	Урожайность, г/м ² / Yield, g/m ²	Макро- или микроэлемент / Macro- or micronutrient	Концентрация, мг/кг / Concentration, mg/kg	DV, % (разность между вариантами / difference between variants)	Min	Max	CV, % (коэффициент вариации / coefficient of variation)
Россия / Russia	47	342,8	Ca	634,8	19,0	303,7	1056,1	27,2
			K	3757,2	7,0	3011,3	5102,5	12,3
			Mg	1442,2	7,1	1269,3	1621,5	6,2
			Fe	54,7	5,5	41,1	67,7	11,2
			Zn	40,7	9,6	28,4	50,3	13,4
			Cu	3,6	13,8	2,2	5,6	19,4
			Mn	39,6	6,1	28,0	51,6	11,6
Казахстан / Kazakhstan	19	323,1	Ca	547,5	11,8	282,6	817,5	21,4
			K	3800,1	7,5	3156,3	4851,8	11,4
			Mg	1450,5	5,9	1245,8	1718,0	6,8

Таблица 2. Окончание

Table 2. The end

Происхождение / Origin	Число образцов / Numbers of accessions	Урожайность, г/м ² / Yield, g/m ²	Макро- или микроэлемент / Macro- or micronutrient	Концентрация, мг/кг / Concentration, mg/kg	DV, % (разность между вариантами / difference between variants)	Min	Max	CV, % (коэффициент вариации / coefficient of variation)
Казахстан / Kazakhstan	19	323,1	Fe	51,8	5,9	41,4	59,0	9,9
			Zn	38,3	7,6	30,7	52,7	14,3
			Cu	3,5	14,1	2,7	5,7	19,6
			Mn	39,4	6,4	32,4	47,2	9,3
Таджикистан / Tajikistan	4	317,6	Ca	639,9	19,5	424,2	1065,0	45,5
			K	3820,6	5,2	3566,8	4293,5	8,5
			Mg	1493,4	7,3	1431,3	1600,3	5,1
			Fe	51,0	5,5	47,4	53,8	5,7
			Zn	40,4	9,2	37,4	44,4	8,5
			Cu	3,8	12,0	3,7	4,0	3,9
			Mn	38,7	4,1	34,8	43,6	9,4
Киргизия / Kyrgyzstan	5	339,6	Ca	643,3	15,5	473,7	814,2	24,4
			K	3675,1	7,8	3520,5	3934,3	4,6
			Mg	1481,8	9,5	1370,3	1745,5	10,3
			Fe	55,1	4,3	50,1	64,3	10,1
			Zn	41,9	5,4	36,0	45,9	10,0
			Cu	3,9	5,4	2,6	4,4	20,1
			Mn	42,5	3,7	39,2	47,1	7,3

ского происхождения, напротив, были существенно ниже в сравнении со стандартом 'Элемент 22'. Наибольший размах изменчивости наблюдали по накоплению в зерне стародавней пшеницы Ca (CV = 21,4–45,5%), Cu (CV = 19,4–20,1%) и Zn (CV = 10,0–14,3%), за исключением образцов из Таджикистана. Низкий уровень изменчивости характерен для концентрации Mg в зерне всех групп образцов (CV = 5,1–10,3%). Не отмечено существенных различий по урожайности образцов разных географических групп – 342,8 г/м², 323,1 г/м², 317,6 г/м² и 339,6 г/м².

На рисунке 2 представлена классификация изученных образцов стародавней пшеницы различного происхождения по сходству макро- и микроэлементного состава зерна.

Дендрограмма А, построенная на основе сравнения содержания макроэлементов в зерне, имеет четыре кластера (1–4), включающих 32, 8, 21 и 14 образцов соответственно. Образцы стародавней пшеницы преимущественно сгруппировались в кластеры в зависимости от их географического происхождения. В первом кластере объединились образцы из Казахстана, Таджикистана, Восточной Сибири (Читинская, Иркутская области и Красноярский край), Дальнего Востока (Камчатская область и Приморский край), а также Алтайского края, имеющие средний уровень макроэлементов. Второй кластер содержал восемь образцов из разных регионов России и один из Таджикистана: все они характеризовались максимальным содержанием Ca (892,8–1065 мг/кг). Третий кластер включал 21 образец стародавней пшеницы с низким уровнем макроэлементов: Ca (378,6–604,5 мг/кг), K (3011,3–3876,3 мг/кг) и Mg (1295,5–1437,8 мг/кг). Образцы в четвертом кластере из Краснодарского края ('Белокоска', к-8884), Алтайского края ('НОЭ', к-23303), Приморского края ('Белая Безостая', к-4145) и Казахстана ('Белотурка', к-25565; 'Акмолка', к-40793) имели повышенное содержание K в зерне (4491,3–5082,5 мг/кг).

ственно сгруппировались в кластеры в зависимости от их географического происхождения. В первом кластере объединились образцы из Казахстана, Таджикистана, Восточной Сибири (Читинская, Иркутская области и Красноярский край), Дальнего Востока (Камчатская область и Приморский край), а также Алтайского края, имеющие средний уровень макроэлементов. Второй кластер содержал восемь образцов из разных регионов России и один из Таджикистана: все они характеризовались максимальным содержанием Ca (892,8–1065 мг/кг). Третий кластер включал 21 образец стародавней пшеницы с низким уровнем макроэлементов: Ca (378,6–604,5 мг/кг), K (3011,3–3876,3 мг/кг) и Mg (1295,5–1437,8 мг/кг). Образцы в четвертом кластере из Краснодарского края ('Белокоска', к-8884), Алтайского края ('НОЭ', к-23303), Приморского края ('Белая Безостая', к-4145) и Казахстана ('Белотурка', к-25565; 'Акмолка', к-40793) имели повышенное содержание K в зерне (4491,3–5082,5 мг/кг).

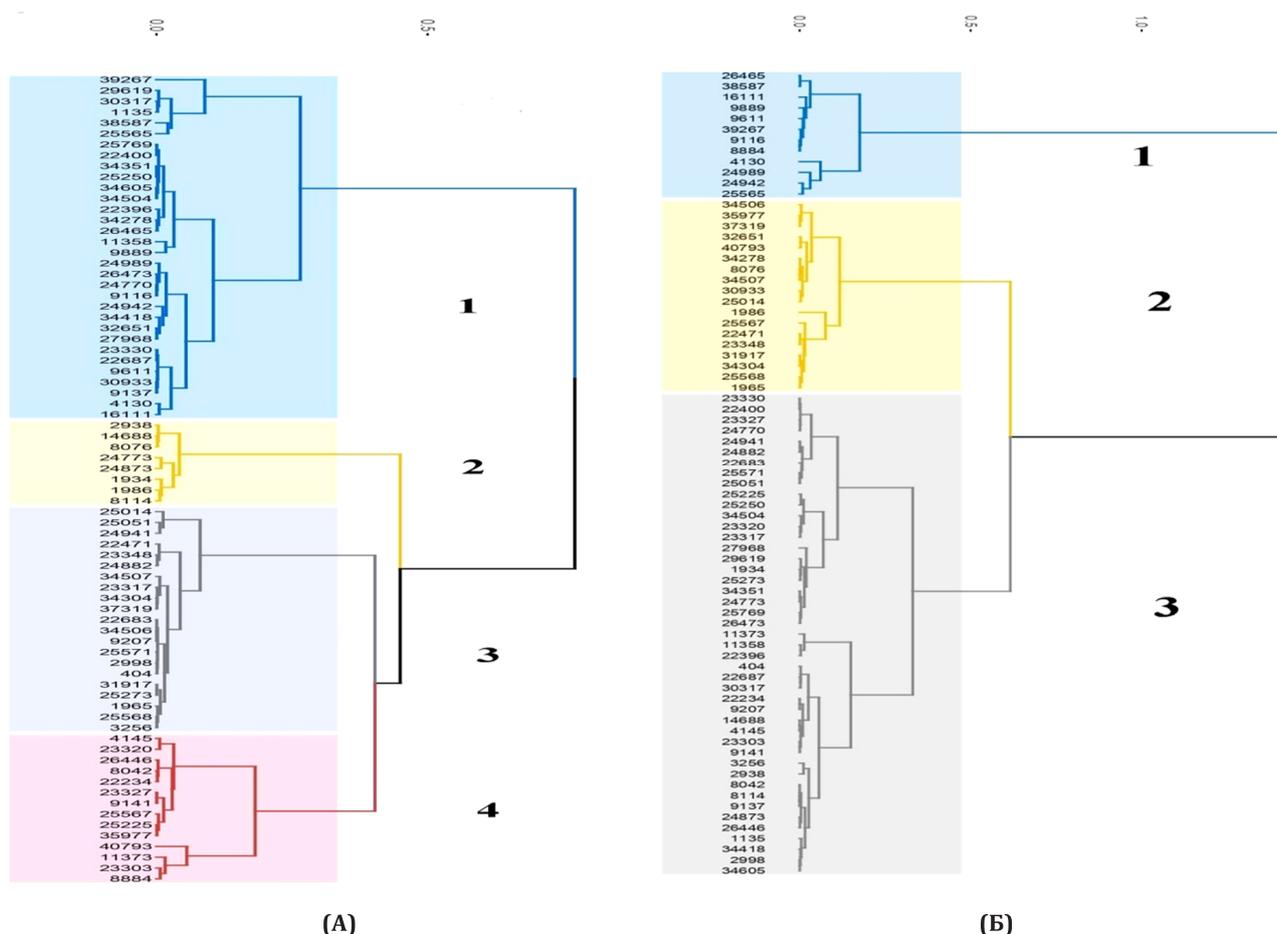


Рис. 2. Дендрограммы образцов стародавней пшеницы, построенные на основе сходства макро- (А) и микроэлементного (Б) состава их зерна

Fig. 2. Dendrograms of wheat landrace accessions based on the similarity of mineral macro- (A) and micronutrient (Б) compositions in their grain

По сходству состава микроэлементов в зерне образцы стародавней пшеницы сгруппировались в три кластера (1–3), включающих 12, 18 и 45 образцов соответственно (см. дендрограмму Б на рис. 2). Первый кластер образовали 12 образцов, которые отличались повышенным содержанием комплекса минералов в зерне: Mg (1512,5–1745,5 мг/кг), Mn (42,0–49,6 мг/кг), Fe (52,9–64,3 мг/кг) и Zn (43,5–50,3 мг/кг). Второй кластер включал 18 образцов с наиболее низким уровнем в зерне Mn (27,9–41,3 мг/кг), Fe (43,9–52,0 мг/кг), Zn (28,4–37,9 мг/кг) и Cu (2,7–3,5 мг/кг), из которых семь происходили из Казахстана. В третьем кластере сгруппировались образцы со средним уровнем микроэлементов: Mn (33,8–44,5 мг/кг), Fe (44,8–67,7 мг/кг), Zn (34,9–52,6 мг/кг) и Cu (2,9–4,4 мг/кг).

В результате проведенных исследований нами также выделены образцы с хорошими технологическими свойствами зерна и при этом отличающиеся повышенным содержанием макро- и микроэлементов (табл. 3).

Годы включения перечисленных в таблице 3 образцов в коллекцию ВИР – с 1911 по 1929 г., за исключением ‘Сибирка Ярцевская’ (к-38587, 1947 г.) и ‘Сандык’ (к-39267, 1948 г.). Из списка изученных элементов у данных образцов выявлено на 3–6 макро- и микроэлементов больше, чем у стандарта ‘Элемент 22’. Большинство образцов отличалось повышенным содержанием Zn и Fe в зерне (> 42 мг/кг и > 53 мг/кг соответственно), ‘Элемент 22’ – 32,0 и 51,0 мг/кг соответственно. Интересно

отметить, что эти образцы также характеризовались более высокой концентрацией Mg (1558–1746 мг/кг) и Mn (42,0–51,6 мг/кг), что указывает на возможность одновременного улучшения минерального состава зерна по данным нутриентам.

Дефицитным элементом в зерне стародавней пшеницы можно рассматривать K, поскольку лишь отдельные образцы имели достоверное превышение над стандартом по данному показателю – ‘Белоколоска’ (к-8884) и ‘Белотурка’ (к-25565). Образцы, выделенные по комплексу макро- и микроэлементов, имели низкое содержание меди (2,89–4,70 мг/кг), за исключением образцов ‘Красноколоска’ (к-4130), ‘Штрубе’ (к-24942), ‘Русак’ (к-24989) и ‘Белотурка’ (к-25565) – 5,17–5,68 мг/кг. В настоящем исследовании в зерне образцов стародавней пшеницы отмечена положительная средняя взаимосвязь между концентрациями Mg, Mn, Fe и Zn ($r = 0,41–0,67$; $p \leq 0,05 = 0,23$).

Образцы ‘Перерод’ (к-1934, Курганская область, 2011 г.) и ‘Красная’, (к-24773, Таджикистан, 1929 г.) практически в два раза (1056–1065 мг/кг) превышали стандарт ‘Элемент 22’ (597 мг/кг) по накоплению Ca в зерне. Преимущество образцов стародавней пшеницы заключается также в высоком содержании белка (16,8–21,0%) и клейковины (32,3–40,1%) в зерне, тогда как по массе 1000 зерен (29,8–39,4 г) и урожайности (317,6–342,8 г/м²) выделенные образцы уступали стандарту ‘Элемент 22’ (40,6 г и 615,0 г/м² соответственно).

Таблица 3. Признаки качества зерна у стародавних сортов с наиболее высоким содержанием (в среднем за 2020–2021 гг.) макро- и микроэлементов**Table 3. Grain quality traits in wheat landraces with the highest concentrations of mineral macro- and micronutrients, on average for 2020–2021**

Образец, номер по каталогу ВИР / Accession, its VIR catalogue No.	Концентрация макро- или микроэлемента, мг/кг / Macro- or micronutrient concentration, mg/kg							Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	Белок, % / Protein, %	Клейковина, % / Gluten, %	Число макро- и микроэлементов* / Number of macro- and micronutrients*
	Ca	K	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn				
Элемент 22, стандарт / Element 22, reference	597	4210	1533	51,0	32,0	5,0	46,0	40,6	18,2	35,9	-
Россия / Russia											
Полтавка / Poltavka, к-9116	476	3523	1513	60,7	46,9	3,87	47,5	35,2	19,2	37,3	3
Скороспелка / Skorospelka, к-9611	631	3673	1518	61,8	48,9	3,45	46,3	35,2	19,9	36,4	3
Перерод / Pererod, к-1934	1056	3283	1388	53,6	35,6	3,50	42,3	30,5	19,5	33,3	3
Башкирка Кугушевская / Bashkirka Kugushevskaya, к-9889	304	3739	1585	65,5	50,3	4,34	48,2	32,5	19,3	37,4	4
Красноколоска / Krasnokoloska, к-4130	777	3353	1588	67,1	49,1	5,61	40,2	29,8	20,4	37,9	5
Белоколоска / Belokoloska, к-8884	509	5082	1436	60,7	47,7	4,02	47,1	32,8	18,8	39,9	5
Штрубе / Shtrube, к-16111	637	3446	1591	55,9	50,3	3,64	51,6	32,6	18,9	36,4	4
Штрубе / Shtrube, к-24942	446	3279	1606	53,7	45,9	5,17	49,6	36,3	18,2	34,6	5
Русак / Rusak, к-24989	381	3466	1470	52,9	43,5	5,44	41,2	35,3	18,5	35,4	3
Сибирка Ярцевская / Sibirka Yartsevskaya, к-38587	714	4087	1622	62,0	41,5	4,70	45,4	36,6	21,0	40,1	4
Казахстан / Kazakhstan											
Белотурка / Beloturka, к-25565	575	4594	1718	58,7	46,6	5,68	47,2	31,7	17,4	35,2	6
Теремок / Teremok, к-30317	498	4314	1558	57,8	44,8	2,89	42,0	38,8	16,8	32,3	3

Таблица 3. Окончание

Table 3. The end

Образец, номер по каталогу ВИР / Accession, its VIR catalogue No.	Концентрация макро- или микроэлемента, мг/кг / Macro- or micronutrient concentration, mg/kg							Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	Белок, % / Protein, %	Клейковина, % / Gluten, %	Число макро- и микроэлементов* / Number of macro- and micronutrients*
	Ca	K	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn				
Таджикистан / Tajikistan											
Красная / Krasnaya, к-24773	1065	3662	1445	47,4	42,1	3,65	48,4	36,0	19,4	37,7	3
Киргизия / Kyrgyzstan											
Сандык / Sandyk, к-39267	814	3521	1746	64,3	44,9	4,39	47,1	39,4	19,6	37,3	5
НСР ₀₅ LSD 0.05	41,8	106,1	23,8	1,33	1,38	0,13	0,86	0,73	0,20	0,40	

Примечание: * – количество макро- и микроэлементов, по которым выявлено достоверное превышение стародавних сортов над стандартом ($p < 0,05$)

Note: * – the number of mineral macro- and micronutrients whose content in the landraces significantly exceeded the reference ($p < 0.05$)

Обсуждение результатов

По данным ФАО, к середине текущего столетия в связи с изменениями климата и устойчивым ростом населения в мире глобальный спрос на продовольствие, в частности на зерно пшеницы, удвоится (<http://www.fao.org/faostat>). При решении задачи удовлетворения спроса на зерно пшеницы основополагающим является повышение его питательных и технологических свойств. Большинство авторов рассматривают такие макроэлементы, как Ca, Mg, K, Na и P, а также микроэлементы Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se и Zn в качестве наиболее важных, оказывающих положительное влияние на здоровье человека (Martínez-Ballesta et al., 2010; Velu et al., 2019). В процессе селекции в повышении урожайности пшеницы ведущую роль сыграло увеличение крупности зерновки и накопления в ней углеводов, что сопровождалось пропорциональным снижением содержания минералов – так называемым «эффектом разбавления» (Guttieri et al., 2015; Shewry et al., 2016; Marles, 2017), что привело к существенному снижению содержания белка, Mg, Na, P, а также Cu, Fe и Zn, сосредоточенных в основном в оболочках зерновки (Marcos-Barbero et al., 2021).

Генетическое разнообразие является мощным ресурсом для отбора генотипов с улучшенным качеством зерна, и в этой связи стародавние сорта, веками формирующиеся на крестьянских полях, имеют высокую ценность для практической селекции (Mitrofanova, Khakimova, 2016; Zuev et al., 2019). В наших исследованиях отмечена наибольшая вариабельность и высокая массовая доля в зерне образцов стародавней пшеницы Ca (634,8–643,3 мг/кг) и Zn (40,4–41,9 мг/кг), за исключением группы образцов из Казахстана. Анализ 56 сор-

тов яровой пшеницы, внедренных в производство до 1965 г., и семи коммерческих сортов пшеницы показал прогрессирующее сокращение Cu, Fe, Mg, Mn, P, Se и Zn в минеральном составе зерна современных сортов, за исключением концентрации Ca (Murphy et al., 2008). Сорт современной селекции 'Элемент 22', использованный в качестве стандарта, отличался относительно высоким уровнем макро- и микроэлементов, в частности Ca (597 мг/кг) и Mg (1533 мг/кг), но низкой концентрацией Zn (32 мг/кг).

Изученные нами образцы стародавней пшеницы имели некоторые различия по накоплению в зерне макро- и микроэлементов. Так, у образцов из Казахстана отмечен низкий уровень важного для здоровья человека микроэлемента цинка (в среднем 38,3 мг/кг), что можно объяснить генотипическим составом стародавних сортов-популяций, влиянием засушливого климата и более бедных по элементному составу почв Казахстана (Wang et al., 2020). Образцы стародавних сортов Киргизии, напротив, отличались высоким уровнем Zn (41,9 мг/кг) и Fe (55,1 мг/кг), а Таджикистана – K (3820,6 мг/кг) и Mg (1493,4 мг/кг). Целесообразно использовать в селекции образцы из разных регионов, чтобы расширить генетическое разнообразие создаваемых сортов пшеницы по нутриентному составу зерна.

Контрастность почвенно-климатических факторов, обусловленных особенностями географического расположения регионов, где сформировались популяции стародавних сортов, предопределяет различия и между сортами по изученным хозяйственно ценным признакам (см. рис. 1). Во многих опытах по изучению стародавних сортов не выявлено их преимуществ над коммерческими сортами пшеницы по крупности и урожайности зерна,

однако это не должно рассматриваться как препятствие для использования данных генетических ресурсов в качестве источников уникальных признаков (Hernández-Espinosa et al., 2018; Maruyami et al., 2020). Отмечены более высокие показатели по массе 1000 зерен в среднем за два года исследований у отдельных образцов из Казахстана (37,4–42,9 г), а также Саратовской, Самарской, Ростовской и Волгоградской областей РФ (38,0–40,2 г). По накоплению белка и клейковины в зерне больших различий между образцами не выявлено. Изученная группа образцов из Киргизии характеризовалась более высокими показателями данных признаков (18,8 и 35,9% соответственно).

Кластеризация образцов по уровню макроэлементов в зерне показала, что восемь из них имели высокое содержание Са (892,8–1065 мг/кг), практически в два раза превышая по данному показателю стандарт 'Элемент 22' (597 мг/кг), а именно: 'Перерод' (к-1934, Курганская обл.), 'Хивинка' (к-1986, Самарская обл.), 'Простая' (к-14688, Волгоградская обл.), 'Сибирская' (к-8076, Тюменская обл.), к-8114 (Свердловская обл.), 'Американка' (к-24873, Якутия), 'Красная' (к-24773, Таджикистан).

При анализе накопления в зерне стародавней пшеницы Са и Си отмечено, что образцы с максимальной концентрацией данных элементов – 'Красноколоска' (к-4130), 'Штрубе' (к-24942), 'Русак' (к-24989), 'Белотурка' (к-25565), 'Перерод' (к-1934) и 'Красная' (к-24773) – включены в коллекцию ВИР до 1929 г.

Двенадцать образцов первого кластера дендрограммы по содержанию в зерне микроэлементов характеризовались высокой концентрацией Mn (42,0–49,6 мг/кг), Fe (52,9–64,3 мг/кг) и Zn (43,5–50,3 мг/кг) и рекомендованы к использованию как ценный ресурс для создания сортов пшеницы сулучшенными питательными свойствами: 'Красноколоска' (к-4130, Приморский край), 'Белоколоска' (к-8884, Краснодарский край), 'Полтавка' (к-9116, Ульяновская обл.), 'Скороспелка' (к-9611, Читинская обл.), 'Башкирка Кугушевская' (к-9889, Бурятия), 'Штрубе' (к-24942, Камчатская обл.), 'Штрубе' (к-16111, Приморский край), 'Русак' (к-24989, Волгоградская обл.), 'Гальянка' (к-26465, Алтайский край), 'Сибирка Ярцевская' (к-38587, Красноярский край), 'Белотурка' (к-25565, Казахстан), 'Сандык' (к-39267, Кыргызстан). В коллекцию ВИР эти образцы, за исключением 'Сибирка Ярцевская' и 'Сандык', также были привлечены в 1915–1929 гг., то есть до замены местных сортов пшеницы на селекционные, которые в результате целенаправленной селекции на повышение урожайности и, соответственно, повышение фракции эндосперма в зерновке, имели пониженное содержание микроэлементов (Shewry et al., 2016; Maruyami et al., 2020). Можно предположить, что в результате искусственного отбора в процессе селекции, начиная с 1930-х годов, были утрачены ценные аллели генов, контролирующих повышенные концентрации макро- и микроэлементов в зерне пшеницы, в частности Си и Zn, которые в большей степени подверглись «эффекту разбавления» в минеральном составе сортов пшеницы (Murphy et al., 2008; Marles, 2017).

При изучении коллекции 86 стародавних сортов пшеницы из разных провинций Турции установлено, что они отличаются более высоким содержанием Fe, Zn и Mn в сравнении с коммерческими сортами пшеницы – на 9,25; 14,82 и 6,75% соответственно. По данным корреляционного анализа выявлены положительные связи меж-

ду концентрациями Fe, Zn и Mn в зерне стародавних сортов (Suchowilska et al., 2012; Akcura, Kokten, 2017), при этом в отдельных исследованиях не обнаружено отрицательной корреляции между урожайностью и концентрациями Fe и Zn в зерне (Chen et al., 2017; Krishnappa et al., 2017). В нашем исследовании отмечена положительная связь между содержанием Mg, Mn, Fe и Zn, что может быть использовано в селекции для создания сортов пшеницы с комплексом нутриентов.

Заключение

Результаты исследований показали, что образцы стародавних сортов из разных регионов России, а также Казахстана, Таджикистана и Киргизии характеризовались высоким содержанием белка (18,7%; 18,4%; 18,8%; 35,9% и 36,0%) и клейковины (35,7%; 35,1%; 35,9% и 36,0%) в зерне, однако существенно уступали стандарту по урожайности в 2021 г. (342,8 г/м², 323,1 г/м², 317,6 г/м² и 339,6 г/м² соответственно). Отмечены небольшие различия по минеральному составу зерна образцов, относящихся к разным по происхождению группам сортов. В частности, сорта из Казахстана отличались низким уровнем Zn (в среднем 38,3 мг/кг), сорта из Киргизии, напротив, высоким уровнем Zn (41,9 мг/кг) и Fe (55,1 мг/кг), а сорта из Таджикистана – повышенным содержанием K (3820 мг/кг).

Образцы 'Перерод' (к-1934, Курганская обл.), 'Хивинка' (к-1986, Самарская обл.), 'Простая' (к-14688, Волгоградская обл.), 'Сибирская' (к-8076, Тюменская обл.), к-8114 (Свердловская обл.), 'Американка' (к-24873, Якутия), 'Красная' (к-24773, Таджикистан) имели высокое содержание Са (892,8–1065 мг/кг), практически в два раза превысив по данному показателю стандарт 'Элемент 22' (597 мг/кг). Образцы 'Красноколоска' (к-4130, Приморский край), 'Белоколоска' (к-8884, Краснодарский край), 'Полтавка' (к-9116, Ульяновская обл.), 'Скороспелка' (к-9611, Читинская обл.), 'Башкирка Кугушевская' (к-9889, Бурятия), 'Штрубе' (к-24942, Камчатская обл.), 'Штрубе' (к-16111, Приморский край), 'Русак' (к-24989, Волгоградская обл.), 'Гальянка' (к-26465, Алтайский край), 'Сибирка Ярцевская' (к-38587, Красноярский край), 'Белотурка' (к-25565, Казахстан), 'Сандык' (к-39267, Киргизия) характеризовались высокой концентрацией Mn (42,0–49,6 мг/кг), Fe (52,9–64,3 мг/кг) и Zn (43,5–50,3 мг/кг). В коллекцию ВИР эти образцы, за исключением 'Сибирки Ярцевской' и 'Сандык', поступили с 1915 по 1929 г., то есть до замены местных сортов пшеницы на селекционные, у большинства которых были утрачены ценные аллели генов, контролирующих высокие концентрации макро- и микроэлементов в зерне пшеницы. Отмечена положительная связь между концентрациями Mg, Mn, Fe и Zn в зерне стародавних сортов, что может быть использовано в селекции для создания сортов с комплексом микроэлементов в зерне пшеницы.

Существует возможность отбора генотипов с высокими концентрациями трех – шести макро- и микроэлементов. Выделены образцы, представляющие интерес в качестве источников для создания высокобелковых сортов с улучшенной питательной ценностью зерна: 'Полтавка' (к-9116), 'Скороспелка' (к-9611), 'Перерод' (к-1934), 'Башкирка Кугушевская' (к-9889), 'Красноколоска' (к-4130), 'Белоколоска' (к-8884), 'Штрубе' (к-16111), 'Штрубе' (к-24942), 'Русак' (к-24989), 'Сибирка Ярцевская' (к-38587), 'Белотурка' (к-25565), 'Теремок' (к-30317), 'Красная' (к-24773) и 'Сандык' (к-39267).

References / Литература

- Akcura M., Kokten K. Variations in grain mineral concentrations of Turkish wheat landraces germplasm. *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*. 2017;9(2):153-159. DOI: 10.3920/QAS2016.0886
- Baboev S., Muminjanov H., Turakulov K., Buronov A., Mamatkulov I., Koc E. et al. Diversity and sustainability of wheat landraces grown in Uzbekistan. *Agronomy for Sustainable Development*. 2021;41(3):34. DOI: 10.1007/s13593-021-00691-2
- Chen X.P., Zhang Y.Q., Tong Y.P., Xue Y.F., Liu D.Y., Zhang W. et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health. *Scientific Reports*. 2017;7(1):7016. DOI: 10.1038/s41598-017-07484-2
- Dospikhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспихов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Агропромиздат; 1985).
- Fan M.S., Zhao F.J., Fairweather-Tait S.J., Poulton P.R., Dunham S.J., McGrath S.P. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2008;22(4):315-324. DOI: 10.1016/j.jtemb.2008.07.002
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Data: [website]. Available from: <https://www.fao.org/faostat/> [accessed Feb. 09, 2023].
- Guttieri M.J., Baenziger P.S., Frels K., Carver B., Arnall B., Waters B.M. Variation for grain mineral concentration in a diversity panel of current and historical Great Plains hard winter wheat germplasm. *Crop Breeding and Genetics*. 2015;55(3):1035-1052. DOI: 10.2135/cropsci2014.07.0506
- Hernández-Espinosa N., Mondal S., Autrique E., Gonzalez-Santoyo H., Crossa J., Huerta-Espino J. et al. Milling, processing and end-use quality traits of CIMMYT spring bread wheat germplasm under drought and heat stress. *Field Crops Research*. 2018;215:104-112. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.10.003
- Husenov B., Muminjanov H., Dreisigacker S., Otambekova M., Akin B., Subasi K. et al. Genetic diversity and agronomic performance of wheat landraces currently grown in Tajikistan. *Crop Science*. 2021;61(4):2548-2564. DOI: 10.1002/csc2.20463
- Jakobsone I., Kantane I., Zute S., Jansone I., Bartkevišs V. Macroelements and trace elements in cereal grains cultivated references in Latvia. *Proceeding of the Latvian Academy of Science. Section B. Natural, Exact and Applied Sciences*. 2015;69(4):152-157. DOI: 10.1515/prolas-2015-0022
- Krishnappa G., Singh A.M., Chaudhary S., Ahlawat A.K., Singh S.K., Shukla R.B. et al. Molecular mapping of the grain iron and zinc concentration, protein content and thousand kernel weight in wheat (*Triticum aestivum* L.). *PLoS One*. 2017;12(4):e0174972. DOI: 10.1371/journal.pone.0174972
- Manickavelu A., Jighly A., Ban T. Molecular evaluation of orphan Afghan common wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces collected by Dr. Kihara using single nucleotide polymorphic markers. *BMC Plant Biology*. 2014;14(1):320. DOI: 10.1186/s12870-014-0320-5
- Marcos-Barbero E.L., Pérez P., Martínez-Carrasco R., Arellano J.B., Morcuende R. Genotypic variability on grain yield and grain nutritional quality characteristics of wheat grown under elevated CO₂ and high temperature. *Plants*. 2021;10(6):1043. DOI: 10.3390/plants10061043
- Marles R.J. Mineral nutrient composition of vegetables, fruits and grains: The context of reports of apparent historical declines. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2017;56:93-103. DOI: 10.1016/j.jfca.2016.11.012
- Martínez-Ballesta M.C., Dominguez-Perles R., Moreno D.A., Muries B., Alcaraz-López C., Bastías E., García-Viguera C., Carvajal M. Minerals in plant food: Effect of agricultural practices and role in human health. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2010;30(2):295-309. DOI: 10.1051/agro/2009022
- Maryami Z., Huertas-García A.B., Azimi M.R., Hernández-Espinosa N., Payne T., Cervantes F. et al. Variability for glutenins, gluten quality, iron, zinc and phytic acid in a set of one hundred and fifty-eight common wheat landraces from Iran. *Agronomy*. 2020;10(11):1797. DOI: 10.3390/agronomy10111797
- Mitrofanova O.P., Khakimova A.G. New genetic resources in wheat breeding for an increased grain protein content. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(4):545-554. [in Russian] (Митрофанова О.П., Хакимова А.Г. Новые генетические ресурсы в селекции пшеницы на увеличение содержания белка в зерне. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(4):545-554). DOI: 10.18699/VJ16.177
- Morgounov A., Gomez-Becerra H.F., Abugaliev A., Dzhususova M., Yessimbekova M., Muminjanov H. et al. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia. *Euphytica*. 2007;155(1-2):193-203. DOI: 10.1007/s10681-006-9321-2
- Morgounov A., Keser M., Kan M., Küçükçongar M., Özdemir F., Gummadov N. et al. Wheat landraces currently grown in Turkey: distribution, diversity, and use. *Crop Science*. 2016;56(6):3112-3124. DOI: 10.2135/cropsci2016.03.0192
- Murphy K.M., Reeves P.G., Jones S.S. Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars. *Euphytica*. 2008;163(3):381-390. DOI: 10.1007/s10681-008-9681-x
- Pototskaya I.V., Shamanin V.P., Shepelev S.S., Bhatta M., Morgounov A.I. Analysis of the genome D polymorphism of synthetic wheat obtained on the basis of *Ae. tauschii* L. *Russian Journal of Genetics*. 2021;57(2):188-195. DOI: 10.1134/S1022795421020083
- Qamar Z.U., Bansal U.K., Dong C.M., Alfred R.L., Bhave M., Bariana H.S. Detection of puroindoline (*Pina-D1* and *Pinb-D1*) allelic variation in wheat landraces. *Journal of Cereal Science*. 2014;60(3):610-616. DOI: 10.1016/j.jcs.2014.07.007
- Sehgal D., Dreisigacker S., Belen S., Küçüközdemir Ü., Mert Z., Özer E. et al. Mining centuries old *in situ* conserved Turkish wheat landraces for grain yield and stripe rust resistance genes. *Frontiers in Genetics*. 2016;7:201. DOI: 10.3389/fgene.2016.00201
- Shewry P.R. Do ancient types of wheat have health benefits compared with modern bread wheat? *Journal of Cereal Science*. 2018;79:469-476. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.11.010
- Shewry P.R., Pellny T.K., Lovegrove A. Is modern wheat bad for health? *Nature Plants*. 2016;2(7):16097. DOI: 10.1038/nplants.2016.97
- Shukla A.K., Behera S.K., Pakhre A., Chaudhary S.K. Micronutrients in soils, plants, animals and humans. *Indian Journal of Fertilisers*. 2018;14(4):30-54.
- Suchowilska E., Wiwart M., Kandler W., Krska R. A comparison of macro- and microelement concentrations in the whole grain of four *Triticum* species. *Plant, Soil and Environment*. 2012;58(3):141-147. DOI: 10.17221/688/2011-PSE
- Velu G., Crespo-Herrera L., Huert J., Payne T., Guzman C., Singh R.P. Assessing genetic diversity to breed compet-

- itive biofortified wheat with increased grain Zn and Fe concentrations. *Frontiers in Plant Science*. 2019;9:1971. DOI: 10.3389/fpls.2018.01971
- Wang M., Kong F., Liu R., Fan Q., Zhang X. Zinc in wheat grain, processing, and food. *Frontiers in Nutrition*. 2020;7:124. DOI: 10.3389/fnut.2020.00124
- Winfield M.O., Allen A.M., Wilkinson P.A., Burrige A.J., Barker G.L.A., Coghill J. et al. High density genotyping of the A.E. Watkins collection of hexaploid landraces identifies a large molecular diversity compared to elite bread wheat. *Plant Biotechnology Journal*. 2018;16(1):165-175. DOI: 10.1111/pbi.12757
- Wingen L.U., Orford S., Goram R., Leverington-Waite M., Billham L., Patsiou T.S. et al. Establishing the A.E. Watkins landrace cultivar collection as a resource for systematic gene discovery in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2014;127(8):1831-1842. DOI: 10.1007/s00122-014-2344-5
- Zuev E.V., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Yu. Results of analyzing the passport database 'spring bread wheat landraces in the VIR collection'. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(1):7-11. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-7-11. [in Russian] (Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Кудрявцева Е.Ю. Результаты анализа паспортной базы данных «Местные сорта яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР». *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(1):7-11). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-7-11

Информация об авторах

Владимир Петрович Шаманин, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, vp.shamanin@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0003-4767-9957>

Инна Владимировна Потоцкая, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, iv.pototskaya@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0003-3574-2875>

Светлана Алексеевна Ессе, аспирант, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, sa.malyavko@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0001-9880-5904>

Марина Сергеевна Гладких, кандидат сельскохозяйственных наук, агроном, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, ms.gavrilova@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0002-9473-865X>

Сергей Сергеевич Шепелев, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, sergeyshepelew@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4282-8725>

Евгений Валерьевич Зуев, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова; 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.zuev@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9259-4384>

Наталья Александровна Виниченко, инженер, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Курчатовский геномный центр – филиал ИЦиГ СО РАН, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, vinia@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7610-8654>

Хамит Коксель, профессор, Университет Истинье, 34010 Турция, Стамбул, Эдирне Чырпичи Йолу, 9, hamitkoksel@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4150-2413>

Алексей Иванович Моргунув, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, 010011 Казахстан, Астана, пр. Женис, 62, alexey.morgounov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7082-5655>

Information about the authors

Vladimir P. Shamanin, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, vp.shamanin@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0003-4767-9957>

Inna V. Pototskaya, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, iv.pototskaya@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0003-3574-2875>

Svetlana A. Esse, Postgraduate Student, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, sa.malyavko@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0001-9880-5904>

Marina S. Gladkih, Cand. Sci. (Agriculture), Agronomist, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, ms.gavrilova@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0002-9473-865X>

Sergey S. Shepelev, Cand. Sci. (Agriculture), Head of a Laboratory, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, sergeyshepelew@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4282-8725>

Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.zuev@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9259-4384>

Natalia A. Vinichenko, Engineer, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kurchatov Genomic Center, branch of the IC&G SB RAS, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, vinia@ngs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7610-8654>

Hamit Koksel, Professor, Istinye University, 9 Edirne Çırpıcı Yolu, Istanbul 34010, Turkey, hamitkoxsel@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4150-2413>

Alexey I. Morgounov, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, 62 Zhenis Ave., Astana 010011, Kazakhstan, alexey.morgounov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7082-5655>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.05.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 12.05.2023; approved after reviewing on 08.11.2023; accepted for publication on 05.12.2023.