

Перевод на английский язык <https://vavilov.elpub.ru/jour>

## Генотипическая и экологическая изменчивость содержания цинка в зерне сортов яровой мягкой пшеницы международного питомника КАСИБ

В.П. Шаманин<sup>1</sup>, П. Флис<sup>2</sup>, Т.В. Савин<sup>3</sup>, С.С. Шепелев<sup>1</sup>, О.Г. Кузьмин<sup>1</sup>, А.С. Чурсин<sup>1</sup>, И.В. Потоцкая<sup>1</sup>, И.Е. Лихенко<sup>4</sup>, И.Ю. Кушниренко<sup>5</sup>, А.А. Казак<sup>6</sup>, В.А. Чудинов<sup>7</sup>, Т.В. Шелаева<sup>8</sup>, А.И. Моргунов<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Омск, Россия

<sup>2</sup> Ноттингемский университет, Ноттингем, Великобритания

<sup>3</sup> Казахский научно-исследовательский институт земледелия и растениеводства, Алматы, Алматинская область, Казахстан

<sup>4</sup> Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал Федерального научного центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup> Челябинский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Челябинск, Россия

<sup>6</sup> Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия

<sup>7</sup> Карабалыкская сельскохозяйственная опытная станция, пос. Карабалык, Костанайская область, Казахстан

<sup>8</sup> Научно-производственный центр зернового хозяйства им. А.И. Бараева, пос. Шортанды, Акмолинская область, Казахстан

<sup>9</sup> Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН, Рияд, Саудовская Аравия

✉ vp.shamanin@omgau.org

**Аннотация.** Яровая мягкая пшеница является основной культурой в Западной Сибири и Казахстане, где значительная доля производимого зерна идет на экспорт. Селекция пшеницы на повышенное содержание цинка в зерне – наиболее рентабельный и экологичный способ решения проблемы дефицита цинка в рационе питания. Цель настоящей работы – установить вклад факторов «пункт» и «генотип» в изменчивость содержания цинка в зерне пшеницы и выделить лучшие сорта в качестве источников данного признака для селекции. Исследования по скринингу накопления цинка в зерне пшеницы 49 сортов яровой мягкой пшеницы из питомника КАСИБ-18 проведены в четырех пунктах России (Челябинск, Омск, Тюмень, Новосибирск) и двух пунктах Казахстана (Карабалык и Шортанды) в течение 2017–2018 гг. Содержание цинка в зерне определяли на факультете иономики Университета г. Ноттингем в рамках проекта EPPN-2020. Результаты дисперсионного анализа показали, что основной вклад в общее фенотипическое варьирование признака вносил фактор «пункт» (38,7 %) вследствие разного содержания цинка в почве и влагообеспеченности в пунктах испытания; влияние факторов «год» и «генотип» составило 13,5 и 8,0 % соответственно. Наиболее благоприятные экологические условия для получения зерна пшеницы с повышенным содержанием цинка сложились в Омской области, где в среднем по всем сортам содержание цинка было равно 50,4 мг/кг, а у лучшего сорта ОмГАУ 100 – 63,7 мг/кг. Эти показатели выше целевых значений международной программы Harvest Plus. Выделены лучшие сорта – Новосибирская 16 (49,4 мг/кг), Силач (48,4 мг/кг), Линия 4-10-16 (47,2 мг/кг), Элемент 22 (46,3 мг/кг) и Лютеценс 248/01 (46,0 мг/кг). В Западно-Сибирском регионе выявлены значительные потенциальные возможности производства зерна пшеницы с повышенным содержанием цинка, востребованного для получения хлеба и кондитерских продуктов с функциональными свойствами. Ключевые слова: сорт; зерно пшеницы; цинк; белок; экология.

**Для цитирования:** Шаманин В.П., Флис П., Савин Т.В., Шепелев С.С., Кузьмин О.Г., Чурсин А.С., Потоцкая И.В., Лихенко И.Е., Кушниренко И.Ю., Казак А.А., Чудинов В.А., Шелаева Т.В., Моргунов А.И. Генотипическая и экологическая изменчивость содержания цинка в зерне сортов яровой мягкой пшеницы международного питомника КАСИБ. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(5):543-551. DOI 10.18699/VJ21.061

## Genotypic and ecological variability of zinc content in the grain of spring bread wheat varieties in the international nursery KASIB

V.P. Shamanin<sup>1</sup>, P. Flis<sup>2</sup>, T.V. Savin<sup>3</sup>, S.S. Shepelev<sup>1</sup>, O.G. Kuzmin<sup>1</sup>, A.S. Chursin<sup>1</sup>, I.V. Pototskaya<sup>1</sup>, I.E. Likhenko<sup>4</sup>, I.Yu. Kushnirenko<sup>5</sup>, A.A. Kazak<sup>6</sup>, V.A. Chudinov<sup>7</sup>, T.V. Shelaeva<sup>8</sup>, A.I. Morgounov<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia

<sup>2</sup> University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom

<sup>3</sup> Kazakh Research Institute of Agriculture and Plant Growing, Almalyk, Almaty region, Kazakhstan

<sup>4</sup> 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, Novosibirsk, Russia

<sup>5</sup> Chelyabinsk Agricultural Research Institute, Chelyabinsk, Russia

<sup>6</sup> Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia

<sup>7</sup> Karabalyk Experimental Agricultural Research Station, Karabalyk, Kostanai region, Kazakhstan

<sup>8</sup> Research and Production Center for Grain and Farming named after A.I. Baraev, Shortandy, Akmola region, Kazakhstan

<sup>9</sup> Ministry of Environment, Water and Agriculture, Riyadh, Kingdom of Saudi Arabia

✉ vp.shamanin@omgau.org

**Abstract.** Spring bread wheat is the staple crop in Western Siberia and Kazakhstan, a significant portion of which goes for export. Wheat breeding with a high level of zinc in wheat grain is the most cost-effective and environmentally friendly way to address zinc deficiency in the diet. The purpose of this work was to evaluate the contribution of the factors 'location' and 'genotype' in the variability of zinc content in wheat grain, and to identify the best varieties as sources of this trait for breeding. The research on screening zinc content in the wheat grain of 49 spring bread wheat varieties from the Kazakhstan-Siberia Spring Wheat Trial (KASIB) nursery was carried out at 4 sites in Russia (Chelyabinsk, Omsk, Tyumen, Novosibirsk) and 2 sites in Kazakhstan (Karabalyk and Shortandy) in 2017–2018. The content of zinc in wheat grain was evaluated at the Ionomics Facility of University of Nottingham in the framework of the EU project European Plant Phenotyping Network-2020. The analysis of variance showed that the main contribution into the general phenotypic variation of the studied trait, 38.7 %, was made by the factor 'location' due to different contents of zinc and moisture in the soil of trial sites; the effect of the factor 'year' was 13.5 %, and the effect of the factor 'genotype' was 8.0 %. The most favorable environmental conditions for accumulation of zinc in wheat grain were observed in the Omsk region. In Omsk, the average zinc content in all studied varieties was 50.4 mg/kg, with 63.7 mg/kg in the best variety 'OmGAU 100'. These values are higher than the target values of the international program Harvest Plus. 'Novosibirskaya 16' (49.4 mg/kg), 'Silach' (48.4 mg/kg), 'Line 4-10-16' (47.2 mg/kg), 'Element 22' (46.3 mg/kg) and 'Lutescens 248/01' (46.0 mg/kg) were identified as being the best varieties. Significant possibilities for the production of wheat grain with high zinc content, which is in demand for the production of bread and pastry products with functional properties, were identified in the Western Siberian region.

Key words: variety; grain of wheat; zinc; protein; ecology.

**For citation:** Shamanin V.P., Flis P., Savin T.V., Shepelev S.S., Kuzmin O.G., Chursin A.S., Pototskaya I.V., Likhenko I.E., Kushnirenko I.Yu., Kazak A.A., Chudinov V.A., Shelaeva T.V., Morgounov A.I. Genotypic and ecological variability of zinc content in the grain of spring bread wheat varieties in the international nursery KASIB. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(5):543-551. DOI 10.18699/VJ21.061

## Введение

Пшеница – одна из трех важнейших сельскохозяйственных культур наряду с кукурузой и рисом, обеспечивающая продовольственную безопасность в мире. Чтобы удовлетворить растущий спрос населения Земли, ежегодный прирост производства пшеницы в мире должен составлять 1–2 %. По данным ФАО (<http://www.fao.org/faostat/en>), в Российской Федерации посевные площади пшеницы выросли с 23.9 млн га в 2014 г. до 26.5 млн га в 2018 г. (+10.9 %), урожайность зерна – с 2.50 до 2.72 т/га (+8.8 %), а общий объем производства – с 59.7 до 72.1 млн т (+20.7 %). Экспорт зерна пшеницы увеличился более чем в два раза и составил 35 млн т в 2019 г. и более 38.5 млн т в 2020 г. В настоящее время при решении задачи производства пшеницы в мире для удовлетворения спроса на зерно основополагающим является повышение его качества.

Одним из новаторских проектов в данном контексте стал проект Европейского союза «ЗДОРОВЬЕ». Проект был реализован в 2005–2010 гг. и способствовал развитию исследований с целью повышения питательной ценности зерна пшеницы: содержание и улучшенный состав белков, углеводов, витаминов, микроэлементов и фитохимических соединений (Björck et al., 2012). К сожалению, в России работа по созданию сортов пшеницы для производства функциональных продуктов питания ограничивается изучением фиолетовозерной пшеницы в ИЦиГ СО РАН (Khlestkina et al., 2019; Gordeeva et al., 2020). Улучшение функциональных свойств и пищевой ценности продуктов из зерна пшеницы будет способствовать решению актуальной задачи – укреплению здоровья человека и повышению его иммунного статуса, особенно в связи с угрозами, аналогичными пандемии коронавируса.

Биофортификация пшеницы была начата в середине 2000-х гг. консорциумом Harvest Plus (<https://www.harvestplus.org/what-we-do/crops>) и достигла больших успехов. Концентрация цинка в зерне новых биофортифицированных

новых сортов выросла на 40 % (+12 мг/кг) по сравнению с коммерческими сортами (Velu et al., 2011; Singh R., Velu, 2017).

Недавние результаты, полученные в ходе реализации проектов Harvest Plus и Harvest Zinc в Китае, Индии, Мексике, Пакистане, Южной Африке и Турции, свидетельствуют, что применение внекорневых подкормок цинком и коктейлем из микроэлементов, содержащим I, Zn, Se и Fe, весьма эффективно для повышения концентрации микроэлементов в зерне, особенно у биофортифицированных сортов пшеницы. Содержание цинка в зерне возрастало с 28.6 до 46.0 мг/кг с применением Zn-спрея и до 47.1 мг/кг с применением коктейля из микроэлементов (Zou et al., 2019).

Содержание цинка в зерне пшеницы в разных странах варьирует от 25.1 мг/кг в Европе до 33.9 мг/кг в Северной Америке в зависимости от: наличия в почве доступных форм цинка для растений; генотипических особенностей возделываемых сортов; агротехники, погодных и климатических условий (Wang et al., 2020). Современные сорта пшеницы имеют низкую концентрацию цинка в зерне – в среднем 14–42 мг/кг (Bouis, 1995; Morgounov et al., 2007; Velu et al., 2011; Guttieri et al., 2015). В этой связи был проведен широкомасштабный скрининг банка генетических ресурсов пшеницы СИММУТ по содержанию цинка среди диких сородичей пшеницы: *T. monococcum*, *T. dicoccoides*, *Ae. tauschii*, *T. boeoticum*, *T. spelta*, *T. polonicum*, а также местных сортов и синтетических гексаплоидов пшеницы, в результате которого определены наиболее перспективные источники для создания сортов с высокой концентрацией цинка (Cakmak et al., 2004; Velu et al., 2014; Verma et al., 2016; Савин и др., 2018; Bhatta et al., 2019).

Полевая оценка коллекции местных сортов СИММУТ на почвах с высоким содержанием цинка на станции Обрегон (Мексика) выявила высокий уровень изменчивости концентрации цинка в зерне – от 40 до 96 мг/кг. Линии

мягкой пшеницы с интрогрессиями от *T. dicoccoides* имели концентрацию цинка в зерне до 88 мг/кг. Первый сорт пшеницы с высоким содержанием цинка, Zincol 2016, создан в Пакистане и характеризуется наличием в своей родословной *T. spelta*. Сорта пшеницы Zinc Shakti и WB 02, НРВW 01, обогащенные цинком, возделывают более чем 500000 фермеров в Индии. Эти сорта созданы на основе синтетической гексаплоидной пшеницы с геномом *Ae. tauschii* (Velu et al., 2019).

Исследования, проведенные V. Govindan с коллегами (Govindan et al., 2018), позволили определить средний коэффициент наследуемости накопления цинка в зерне и значительное влияние генотипических и средовых факторов на формирование этого признака. С развитием маркер-ориентированной селекции актуальным становится поиск и перенос генов высокого содержания цинка в исходный материал для селекции на качество зерна. С помощью молекулярных маркеров идентифицированы QTL, контролирующие накопление цинка в зерне пшеницы, локализованные в хромосомах 2A, 5A, 7A (Peleg et al., 2009; Xu et al., 2012; Krishnappa et al., 2017). По результатам Y. Genc с коллегами (Genc et al., 2009), сочетание в генотипе четырех QTL, локализованных в хромосомах 7A, 4B, 6B и 3D, способствовало повышению концентрации цинка в зерне на 23 %. Ген *GPC-B1 (NAM-B1)* был перенесен в геном мягкой пшеницы из образцов дикой двузернянки *T. dicoccoides*. Все современные тетраплоидные и гексаплоидные пшеницы обладают функционально неактивным аллелем *GPC-B1*, за исключением некоторых местных и старых сортов видов *T. dicoccum*, *T. durum*, *T. spelta* и *T. aestivum* (Митрофанова, Хакимова, 2016). Функционально активный аллель этого гена контролирует высокое содержание белка, обуславливает ремобилизацию микроэлементов из флагового листа в зерновки, что повышает концентрацию железа и цинка на 18 и 12 % соответственно (Uauy et al., 2006; Waters et al., 2009).

В большинстве исследований у сортов яровой пшеницы отмечена отрицательная корреляция между концентрацией цинка в зерне и урожайностью (Welch, Graham, 2002; Morgunov et al., 2007; Murphy et al., 2008). В отдельных экспериментах, напротив, не выявлено данной корреляции, что предполагает возможность создания сортов с высокой урожайностью и повышенным содержанием белка, железа и цинка в зерне (Chen et al., 2017; Krishnappa et al., 2017; Аbugалиева, Савин, 2018). Фитиновая кислота в зерне пшеницы является причиной минеральной недостаточности, поскольку она связывает микроэлементы, в том числе цинк, препятствуя их усвоению. В этой связи современные сорта пшеницы должны сочетать высокую урожайность с низким соотношением фитиновой кислоты к цинку (<5) (Qi et al., 2013; Liu et al., 2014).

Омский государственный аграрный университет (ГАУ) координирует Казахстанско-Сибирскую сеть по улучшению яровой пшеницы (КАСИБ), которая объединяет 20 селекционных и научно-исследовательских учреждений из Казахстана и России. Ранее проведена оценка 150 сортов пшеницы в четырех-восьми пунктах сети КАСИБ в Казахстане и Западной Сибири с целью поиска генетических источников с повышенной концентрацией цинка, изучена взаимосвязь между накоплением белка и цинка, оценен

вклад генотипической и средовой изменчивости в общее фенотипическое варьирование признака (Morgounov et al., 2006; Gomez-Becerra et al., 2007).

В 2016 г. Казахский НИИ земледелия и растениеводства выиграл грант в рамках проекта EPPN-2020 (European Plant Phenotyping Network) для анализа нутриентного состава зерна сортов яровой пшеницы из Казахстана и России на базе платформы для ионики в Университете г. Ноттингем (Великобритания). Платформа позволяет осуществлять многоэлементный анализ с высокой пропускной способностью образцов на основе автоматизированной системы сбора данных и их обработки с помощью методов биоинформатики (<https://www.ionomicshub.org/home/PiiMS>). Анализ проведен по 23 элементам, включая макро-, микроэлементы, тяжелые и редкие металлы, у 49 сортов яровой мягкой пшеницы, выращенных в шести пунктах Казахстана и России в 2017–2018 гг. Результаты показали, что изменчивость элементного состава зерна пшеницы зависит от факторов «генотип», «пункт» и от их взаимодействия. Пшеница, выращенная в Омской области, имеет наибольшее содержание цинка и железа в зерне. Было выделено несколько сортов и селекционных линий с высоким содержанием цинка и железа (Abugaliev et al., 2020).

Цель исследований – установить вклад факторов «пункт» и «генотип» в изменчивость содержания цинка в зерне пшеницы и выделить лучшие сорта в качестве источников данного признака для селекции.

## Материалы и методы

Изучение 49 сортов яровой мягкой пшеницы питомника КАСИБ-18 (Казахстанско-Сибирский питомник яровой мягкой пшеницы) проведено в четырех пунктах Западной Сибири, Южного Урала и в двух пунктах Казахстана (рис. 1). Географические координаты российских пунктов испытания: Челябинский НИИСХ (г. Челябинск) – 54°93' с. ш., 60°73' в. д.; Омский ГАУ (г. Омск) – 55°01' с. ш., 73°18' в. д.; ГАУ Северного Зауралья (г. Тюмень) – 57°09' с. ш., 65°25' в. д.; Сибирский НИИ растениеводства и селекции – филиал ФИЦ ИЦиГ СО РАН (г. Новосибирск) – 54°89' с. ш., 82°97' в. д.; казахстанских пунктов испытания: Карабалыкская сельскохозяйственная опытная станция (пос. Карабалык) – 53°51' с. ш.,



Рис. 1. Карта пунктов испытания питомника КАСИБ-18 в России и Казахстане в 2017–2018 гг.

**Таблица 1.** Характеристика почв и погодных условий в экспериментальных пунктах за вегетационный период (май–сентябрь), 2017–2018 гг.

Признак	Челябинск	Омск	Тюмень	Новосибирск	Карабалык	Шортанды
Сумма активных температур, °С						
2017	2349	2364	2118	2292	2637	2508
2018	2307	2169	2124	2157	2553	2130
Количество осадков, мм						
2017	273.7	171.0	324.0	315.9	218.5	114.6
2018	328.1	249.0	322.0	296.9	204.5	264.5
Гидротермический коэффициент						
2017	1.16	0.72	1.53	1.38	0.83	0.46
2018	1.42	1.15	1.52	1.38	0.80	1.24
Тип почвы	Черноземная, средне-суглинистая	Лугово-черноземная, тяжело-суглинистая	Черноземная, средне-суглинистая	Черноземная, средне-суглинистая	Черноземная, тяжело-суглинистая	Черноземная, тяжело-суглинистая
Кислотность почвы, ед.	5.3	6.8	6.7	6.7	6.8	7.7
Гумус, %	5.2	5.2	7.0	7.5	4.7	3.3

62°06' в. д.; Научно-производственный центр зернового хозяйства (пос. Шортанды) – 51°63' с. ш., 71°04' в. д.

Сортоиспытание питомника КАСИБ-18 проведено в 2017–2018 гг. Погодные условия в разных географических пунктах исследования существенно различались (табл. 1).

Во всех пунктах изучения сети КАСИБ сумма активных температур выше 10 °С в 2017–2018 гг. превышала значения, необходимые для нормального роста и развития растений пшеницы: наименьшая – в пункте Тюмень (2118–2124 °С), наибольшая – в пункте Карабалык (2553–2637 °С). Согласно гидротермическому коэффициенту (ГТК), рассчитанному по методике Г.Т. Селянинова (1958), наиболее благоприятные по влагообеспеченности условия сложились в пунктах Тюмень и Новосибирск (ГТК = 1.38–1.53) в оба года исследований, а также в Челябинске в 2018 г. (ГТК = 1.42), что оказало положительное влияние на формирование более высокой урожайности зерна в данных пунктах. В целом 2017 г. характеризовался более засушливыми условиями в пунктах Омск (ГТК = 0.72) и Шортанды (ГТК = 0.46) в сравнении с 2018 г. (ГТК = 1.15 и 1.24 соответственно). В пункте Карабалык в оба года отмечены засушливые условия в период вегетации растений (ГТК = 0.80–0.83).

По морфологической характеристике почвы опытных участков существенных отличий не имеют, за исключением более высокого содержания гумуса в пунктах Тюмень и Новосибирск (7.0–7.5 %). Содержание цинка в гумусовом слое лугово-черноземных почв Омской области составляет 20.1–69.4 мг/кг (Азаренко и др., 2019), в малогумусной почве пос. Шортанды Акмолинской области – 3.3 мг/кг (данные филиала АО «Казахстанская аграрная экспертиза», www.kazagrex.kz). Сведений о содержании цинка в почве в остальных пунктах нет.

Посев, селекционные оценки и наблюдения в питомнике проведены в соответствии с методикой Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (Методика..., 1989) и с учетом принятой программы Казахстанско-Сибирской сети по улучшению яровой пшеницы. Пло-

щадь делянки – 3 м<sup>2</sup>, норма высева – 500 всхожих зерен на 1 м<sup>2</sup>. Сроки сева – 20–30 мая, глубина посева – 4–5 см. Предшественник – чистый пар. Повторность трехкратная, расположение делянок систематическое. Посев сеялкой ССФК-7.

Образцы зерна из каждого пункта испытания проанализированы в Казахском НИИ земледелия и растениеводства (пос. Алмалыбак). Содержание белка в зерне и его фракций находили методом Кьельдаля (ГОСТ 10846-91) и ИК-спектроскопически (FOSS Infracore 1841) на базе ранее созданных градуировочных уравнений. Содержание цинка в зерне определяли на факультете иономики Университета г. Ноттингем. Концентрация цинка рассчитана в миллиграммах на килограмм сухого вещества. Статистическая обработка данных выполнена вариационным, корреляционным и дисперсионным анализом с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Excel, Statistica.

## Результаты

Проанализировано накопление цинка в зерне пшеницы 49 сортов питомника КАСИБ-18 в среднем за два года испытания. Обнаружены значительные различия по содержанию цинка в зерне изучаемых сортов в зависимости от пункта испытания (табл. 2).

Самое высокое содержание цинка в зерне (50.4 мг/кг) отмечено в Омске, тогда как урожайность здесь, напротив, была низкой. В пункте Шортанды средняя урожайность зерна была практически на уровне сортов в Омске, однако содержание цинка в зерне в 1.9 раза меньше, что свидетельствует о существенном влиянии почвенно-климатических факторов региона на накопление этого микроэлемента в зерне пшеницы. Высокие содержания цинка в зерне выявлены и в других пунктах России – Тюмени, Новосибирске, Челябинске (44.1–44.8 мг/кг), в казахстанских пунктах Карабалык и Шортанды этот показатель значительно меньше (37.3 и 26.8 мг/кг соответственно).

В проведенных исследованиях не найдено корреляции между содержанием цинка в зерне и урожайностью, за

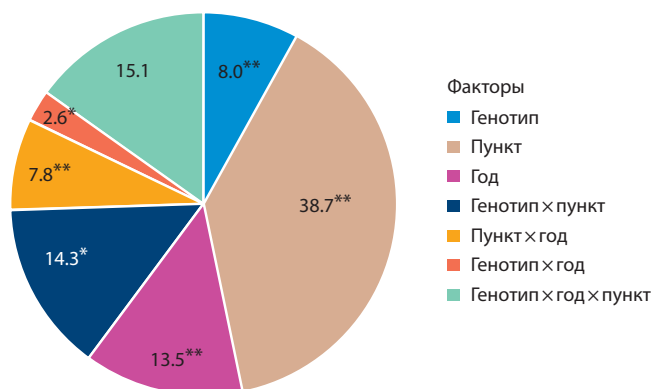
**Таблица 2.** Урожайность, содержание белка и цинка в зерне, корреляционные связи между признаками (*r*) в экспериментальных пунктах питомника КАСИБ-18, 2017–2018 гг.

Год	Урожайность, кг/га	Содержание белка, %	Zn, мг/кг	<i>r</i> (Zn с урожайностью)	<i>r</i> (Zn с содержанием белка)
Омск					
2017	3032	16.3	47.6	0.08	0.01
2018	2019	13.6	53.2	-0.05	0.26*
В среднем	2526	14.9	50.4		
Челябинск					
2017	4098	10.7	36.4	0.14	0.23
2018	3461	13.7	51.8	0.06	0.25
В среднем	3780	12.2	44.1		
Новосибирск					
2017	3113	13.2	46.5	-0.06	0.14
2018	4857	12.9	43.1	-0.03	0.07
В среднем	3985	13.1	44.8		
Тюмень					
2017	2382	11.1	40.8	-0.09	0.30*
2018	4037	10.3	48.9	-0.02	0.40*
В среднем	3210	10.7	44.8		
Карабалык					
2017	1786	12.5	31.7	-0.35*	0.03
2018	4003	11.7	42.9	-0.01	0.12
В среднем	2894	12.1	37.3		
Шортанды					
2017	2580	14.8	18.5	-0.18	-0.04
2018	2413	13.2	35.0	0.08	0.29*
В среднем	2496	14.0	26.8		
НСР <sub>05</sub>	663	1.1	6.2		

\* Достоверно при  $p < 0.05$ .

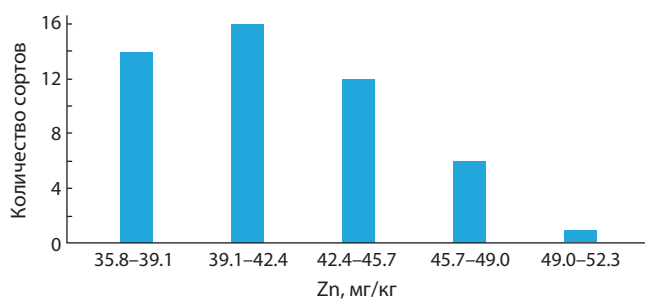
исключением одного пункта: в Карабалыке в засушливом 2017 г. отмечена средняя отрицательная связь ( $r = -0.35$ ) при наименьшей урожайности (1786 кг/га) в сравнении с остальными пунктами сортоиспытания.

В среднем за два года исследований наибольшая урожайность зерна отмечена в Новосибирске – 3985 кг/га, в Тюмени и Челябинске – 3210 и 3780 кг/га соответственно. Менее 3000 кг/га получено в Карабалыке, Омске и Шортанды. Наблюдались существенные различия по среднему содержанию белка в зерне в разных пунктах испытания. Наиболее высокое содержание белка в среднем за два года исследований отмечено в Омске (14.9 %), далее – в Шортанды (14.0 %), Новосибирске (13.1 %), Челябинске (12.2 %), Карабалыке (12.1 %), а наименьшее – в Тюмени (10.7 %). В Тюмени в 2017 и 2018 гг. при низком



**Рис. 2.** Влияние факторов на изменчивость содержания цинка в зерне сортов пшеницы, %.

Достоверно при: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.001$ .



**Рис. 3.** Количество сортов по лимитам содержания цинка в зерне, в среднем по всем пунктам сортоиспытания за 2017–2018 гг.

содержанию белка выявлена средняя положительная корреляция между содержанием цинка и белка в зерне – 0.3 и 0.4 соответственно.

По результатам испытания 49 сортов в течение двух лет в шести экологических пунктах проведен трехфакторный дисперсионный анализ и определен вклад основных факторов в изменчивость содержания цинка в зерне пшеницы (рис. 2). Основной вклад в изменчивость изучаемого признака вносил фактор «пункт» – 38.7%. Существенным оказалось влияние факторов «год» – 13.5 %, «генотип» – 8.0 %, а также «генотип × пункт» – 14.3 % и «пункт × год» – 7.8 %. Одновременное влияние изученных факторов на данный признак было значительным и составило 15.1 %.

Лимиты средних показателей содержания цинка в зерне изученных сортов за два года исследований представлены на рис. 3. Максимальным содержанием цинка в зерне (49.4 мг/кг) характеризовался один сорт, у 6 сортов содержание цинка варьировало от 45.7 до 49 мг/кг, у 16 сортов – от 39.1 до 42.4 мг/кг, у 14 сортов – от 35.8 до 39.1 мг/кг, у 12 сортов – от 42.4 до 45.7 мг/кг. В табл. 3 показаны сорта с высоким содержанием цинка в зерне, выделенные по результатам испытания в среднем по всем пунктам за два года, и интервалы изменчивости признака в зависимости от года и пункта. Различия между перечисленными сортами по среднему значению содержания цинка в зерне находятся в пределах ошибки.

Содержание цинка в зерне сорта Новосибирская 16 в среднем составило 49.4 мг/кг, однако этот показатель

**Таблица 3.** Сорта с наибольшим содержанием цинка в зерне (мг/кг) по всем пунктам сортоиспытания, среднее за 2017–2018 гг.

Сорт	Пункт	$X_{cp}$	Max	Min	$C_v, \%$
Новосибирская 16	Новосибирск	49.4	74.0	12.9	35.5
Силач	Челябинск	48.4	70.3	22.2	25.4
Линия 4-10-16	Карабалык	47.2	61.4	20.6	23.4
Элемент 22	Омск	46.3	60.7	29.7	23.9
Лютесценс 248/01	Шортанды	46.0	65.0	9.2	32.5
В среднем		41.5			
$HCP_{05}$		6.2			

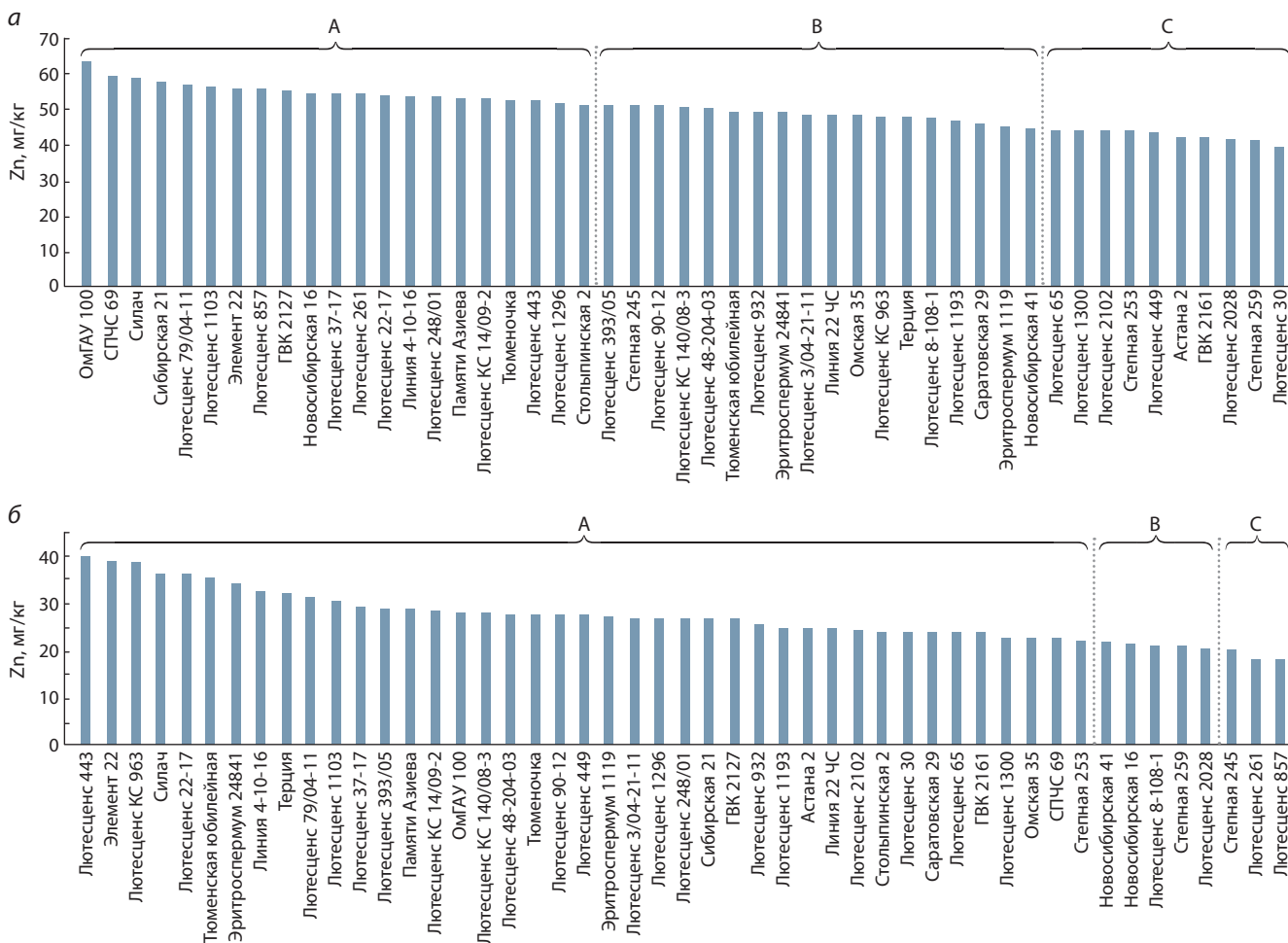
не отличался стабильностью и варьировал от 12.9 до 74.0 мг/кг (коэффициент вариации 35.5 %). Сорта Силач, Линия 4-10-16, Элемент 22 характеризовались большей стабильностью, чем Новосибирская 16. В среднем по опыту содержание цинка в зерне изученных сортов составило 41.5 мг/кг.

Проведено ранжирование сортов пшеницы в пункте Омск по содержанию цинка в зерне, где в среднем за

годы исследований по всем сортам отмечены максимальные значения этого микроэлемента (рис. 4, а). При этом были выделены три группы: к первой отнесен 21 сорт (51.6–63.7 мг/кг), ко второй – 18 сортов (44.7–51.3 мг/кг), к третьей – 10 сортов с относительно низким содержанием микроэлемента (39.4–44.4 мг/кг). Поскольку вклад генотипического фактора в экспрессию изученного признака составил 8 %, достоверно различались по содержанию цинка только сорта первой и третьей группы. Наибольшее содержание цинка из 49 сортов в среднем за два года отмечено у сорта ОмГАУ 100 – 63.7 мг/кг, наименьшее – у сорта Лютесценс 30 – 39.4 мг/кг.

В Шортанды при ранжировании не выявлено существенных различий между сортами по накоплению цинка в зерне: первая группа включала 42 сорта (21.9–39.7 мг/кг), а вторая и третья – семь сортов (18.2–21.5 мг/кг). У сорта Лютесценс 443 отмечено наибольшее количество цинка в зерне – 39.7 мг/кг, что практически на уровне наименьшего значения этого признака в Омске (см. рис. 4, б). Низким содержанием цинка в зерне при испытании в Шортанды характеризовался сорт Лютесценс 857 – всего 18.2 мг/кг.

Таким образом, выделенные в двух пунктах испытания сорта ОмГАУ 100 и Лютесценс 443 целесообразно включать в гибридизацию по программе повышения содержания цинка в зерне пшеницы.



**Рис. 4.** Ранжирование сортов питомника КАСИБ-18 по содержанию цинка в зерне, среднее за 2017–2018 гг.: а – Омск; б – Шортанды.

## Обсуждение

По оценкам Всемирной организации здравоохранения, от дефицита цинка страдает более 2 млрд человек в мире (WHO, 2017). Регионы, в которых наиболее распространен дефицит цинка, – Юго-Восточная Азия, юг Африки и другие развивающиеся страны. К основным факторам, вызывающим дефицит цинка, прежде всего следует отнести недостаточное потребление цинка с пищей из-за его невысокого содержания в продуктах питания в регионах с низким содержанием цинка в почвах, засушливым климатом и нехваткой влаги (<http://cgon.rosпотребнадзор.ru/content/62/2683>).

Производство хлеба и продуктов питания из зерна пшеницы, полезных для здоровья потребителей, является стратегически приоритетом во всем мире (Saleh et al., 2019). Положительное влияние биообогащенной пшеницы с более высокой концентрацией цинка на здоровье человека доказано на примере Индии и Пакистана (Listman et al., 2019). Россия – один из ведущих экспортеров пшеницы в мире, главным образом в страны Ближнего Востока и Африки, где существует значительный дефицит цинка в продуктах питания бедного населения, которое питается в основном хлебом. Селекция пшеницы на повышенное содержание цинка в зерне считается наиболее рентабельным и экологичным способом решения проблемы скудного рациона питания в развивающихся странах (Vouis et al., 2011).

Как показывают наши исследования, зерно пшеницы, выращенное в пунктах испытания Западно-Сибирского и Уральского регионов, имеет повышенное содержание цинка – в среднем от 44.1 до 50.4 мг/кг (см. табл. 2). В пунктах Шортанды и Карабалык (Казахстан) этот показатель составил в среднем 26.8–37.3 мг/кг. Наши данные согласуются с результатами J. Wang с коллегами (2020), которые получили для зерна, выращенного в Казахстане, содержание цинка в среднем 28.4 мг/кг. Вероятно, это объясняется более засушливыми климатическими условиями Казахстана. Для эффективного минерального питания растениям необходим массовый ток почвенного раствора и ионов, который зависит в первую очередь от наличия влаги в почве (Singh B. et al., 2005).

Дисперсионный анализ выявил влияние генотипических особенностей изученных сортов пшеницы, почвенно-климатических и погодных условий на накопление цинка в зерне. Основной вклад в общее фенотипическое варьирование признака вносил фактор «пункт» (38.7 %), что обусловлено разным содержанием цинка в почве и разной влагообеспеченностью в пунктах испытания. Влияние фактора «год» составило 13.5 %, фактора «генотип» – 8.0 %.

В большинстве пунктов изучения 2018 г. был более благоприятным по содержанию влаги в почве в сравнении с засушливым 2017 г. В 2018 г. содержание цинка в зерне варьировало от 35.0 мг/кг (пос. Шортанды) до 53.2 мг/кг (г. Омск). В 2017 г., в условиях дефицита влаги в почве, отмечена более низкая концентрация цинка в зерне: 31.7 мг/кг в Карабалыке, 18.5 мг/кг – в Шортанды, 36.4 мг/кг – в Челябинске и 47.6 мг/кг – в Омске (см. табл. 2).

По результатам двухлетнего изучения питомника КАСИБ-18 во всех пунктах сортоиспытания установлены источники высокого содержания цинка: Новосибирская 16 (49.4 мг/кг), Силач (48.4 мг/кг), Линия 4-10-16 (47.2 мг/кг), Элемент 22 (46.3 мг/кг) и Лютесценс 248/01 (46.0 мг/кг). Эти показатели выше целевых значений международной программы Harvest Plus, которая позволила на 30–40 % увеличить содержание цинка в зерне сортов пшеницы, возделываемых в Индии и Пакистане: с 25 до 37 мг/кг в среднем (Singh R., Velu, 2017).

Следует отметить высокую вариабельность признака у выделенных сортов ( $C_v = 23.4–35.5$  %), что свидетельствует о сильном влиянии условий среды на формирование признака (см. табл. 3). Изучение одинакового набора сортов в контрастных экологических условиях позволило выявить различия между сортами и линиями по накоплению цинка. Сорта ОмГАУ 100 (63.7 мг/кг) и Лютесценс 443 (39.4 мг/кг) характеризовались максимальным накоплением цинка в зерне в пунктах Омск и Шортанды, а сорта Лютесценс 30 (39.4 мг/кг) и Лютесценс 857 (18.2 мг/кг) – минимальным соответственно (см. рис. 4, а, б).

В агрохимических опытах А.В. Волкова (2015) на сорте яровой пшеницы Злата на дерново-подзолистых почвах установлено положительное влияние цинковых удобрений на урожайность, содержание белка, клейковины, на технологические и хлебопекарные качества. В наших опытах только в Тюмени в оба года исследований при низком содержании белка (в среднем 10.7 %) отмечена средняя положительная корреляция между содержанием цинка и белка в зерне – 0.3 и 0.4, в остальных пяти пунктах корреляция не обнаружена. Между урожайностью и содержанием цинка в зерне корреляция не установлена (см. табл. 2). Вероятно, содержание цинка в зерне не может служить индикатором необходимости применения цинксодержащих удобрений; данный вопрос требует дополнительных исследований в условиях конкретного региона и разных типов почвы.

Сорта Новосибирская 16, Силач, Элемент 22, ОмГАУ 100, включенные в Государственный реестр селекционных достижений и возделываемые на значительных площадях в условиях Западно-Сибирского региона, способны формировать зерно с содержанием цинка более 60–70 мг/кг (см. табл. 3, рис. 4, а). Анализ зерна пшеницы с производственных посевов Омской области также показал высокое содержание цинка и целесообразность его использования как на внутреннем рынке для производства хлеба и хлебобулочных изделий с функциональными свойствами, так и для экспорта (Abugalieva et al., 2020). Наши исследования подтверждают высокий потенциал Омской, Новосибирской, Тюменской и Челябинской областей по производству зерна с повышенным содержанием цинка. Целесообразно зерно с посевов лучших сортов по признаку «содержание цинка» формировать в отдельные партии для производства «здорового» хлеба и на экспорт. Это неиспользованные резервы, которые будут способствовать укреплению здоровья населения, особенно с низким достатком, а также наращиванию экспортного потенциала страны.

## Заключение

Результаты исследований показали, что наиболее благоприятные почвенно-климатические условия для получения зерна пшеницы с повышенным содержанием цинка складываются в Омской области. В среднем за два года испытания питомника КАСИБ-18 (2017–2018) в Омске содержание цинка в зерне изученных сортов составило 50.4 мг/кг, что больше, чем в других российских пунктах испытания – Тюмени, Новосибирске и Челябинске (44.1–44.8 мг/кг). В Казахстане среднее по сортам пшеницы содержание цинка в зерне составило: в Карабалыке – 37.3 мг/кг, в Шортанды – 26.8 мг/кг. Достоверные различия между сортами по содержанию цинка в зерне свидетельствуют о возможности селекционного улучшения пшеницы по данному показателю. В среднем по всем пунктам в течение двух лет испытания наибольшее количество цинка в зерне имели сорта Новосибирская 16 (49.4 мг/кг), Силач (48.4), Линия 4-10-16 (47.2), Элемент 22 (46.3) и Лютеценс 248/01 (46.0 мг/кг). В условиях Омска выделился сорт ОмГАУ 100 (63.7 мг/кг), а в менее благоприятных условиях Шортанды – сорт Лютеценс 443 (39.7 мг/кг). Перечисленные сорта целесообразно включать в гибридизацию по программе повышения содержания цинка в зерне пшеницы.

Основной вклад (38.7 %) в изменчивость содержания цинка в зерне пшеницы вносили почвенно-климатические условия региона (фактор «пункт»). Доля фактора «генотип» была достоверной и составила 8.0 %, установлено также существенное влияние фактора «год» – 13.5 %. Корреляция между содержанием цинка в зерне и урожайностью отсутствовала; между содержанием цинка и белка в зерне лишь в одном пункте из шести (Тюмень) отмечена средняя корреляция – 0.3–0.4. В Западно-Сибирском регионе выявлены потенциальные возможности производства зерна пшеницы с повышенным содержанием цинка, востребованного для получения хлеба и кондитерских изделий с функциональными свойствами.

## Список литературы / References

Абугалиева А.И., Савин Т.В. Биохимический состав и технологическая оценка зерна интрогрессивных форм озимой мягкой пшеницы с участием различных видов *Triticum* и *Aegilops*. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(3):353-362. DOI 10.18699/VJ18.371.  
[Abugaliyeva A.I., Savin T.V. The wheat introgressive form evaluation by grain biochemical and technological properties. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(3):353-362. DOI 10.18699/VJ18.371. (in Russian)]  
Азаренко Ю.А., Ермохин Ю.И., Аксенова Ю.В. Цинк в почвах агроценозов Омского Прииртышья и эффективность применения цинковых удобрений. *Земледелие*. 2019;2:13-17. DOI 10.24411/0044-3913-2019-10203.  
[Azarenko Yu.A., Ermohin Yu.I., Aksenova Yu.V. Zinc in soils of agroecocenosis of Omsk Region and efficiency of zinc fertilizers application. *Zemledelije = Agriculture*. 2019;2:13-17. DOI 10.24411/0044-3913-2019-10203. (in Russian)]  
Волков А.В. Эффективность применения различных способов, форм и доз цинковых удобрений под яровую пшеницу на дерново-подзолистых почвах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2015.  
[Volkov A.V. The efficiency of various application methods, forms, and doses of zinc fertilizers for spring wheat grown on sod-podzolic soils. Dr. Sci. Diss. (Biol.). Moscow, 2015. (in Russian)]

Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2. Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры. М., 1989.  
[Methods of State Crop Variety Trial. Iss. 2: Cereals, legumes, maize, and fodder crops. Moscow, 1989. (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.  
[Mitrofanova O.P., Khakimova A.G. New genetic resources in wheat breeding for an increased grain protein content. *Russ. J. Genet. Appl. Res.* 2017;7:477-487. DOI 10.1134/S2079059717040062.]  
Савин Т.В., Абугалиева А.И., Чакмак И., Кожухметов К. Минеральный состав зерна диких сородичей и интрогрессивных форм в селекции пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(1):88-96. DOI 10.18699/VJ18.335.  
[Savin T.V., Abugaliyeva A.I., Cakmak I., Kozhakhmetov K. Mineral composition of wild relatives and introgressive forms in wheat selection. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(1):88-96. DOI 10.18699/VJ18.335. (in Russian)]  
Селянинов Г.Т. Принципы агроклиматического районирования СССР. В: Вопросы агроклиматического районирования СССР. М., 1958.  
[Selyaninov G.T. Fundamentals of agroclimatic zoning of the USSR. In: Issues of Agroclimatic Zoning in the USSR. Moscow, 1958. (in Russian)]  
Abugaliyeva A., Flis P., Shamanin V., Savin T., Morgounov A. Ionic analysis of spring wheat grain produced in Kazakhstan and Russia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2020. Available at: <https://www.tandfonline.com>. DOI 10.1080/00103624.2020.1865398.  
Bhatta M., Shamanin V., Shepelev S., Baenziger S., Pozherukova V., Pototskaya I., Morgounov A. Marker-trait associations for enhancing agronomic performance, disease resistance, and grain quality in synthetic and bread wheat accessions in Western Siberia. *G3: Genes Genom. Genet.* 2019;9(12):4209-4222. DOI 10.1534/g3.119.400811.  
Björck I., Östman E., Kristensen M., Anson N.M., Price R.K., Haenen G.R.M., Havenaar R., Knudsen K.E.B., Frid A., Mykkanen H., Welch R.W., Riccardi G. Cereal grains for nutrition and health benefits: overview of results from *in vitro*, animal and human studies in the HEALTHGRAIN project. *Trends Food Sci. Technol.* 2012;25(2):87-100.  
Bouis H. Enrichment of food staples through plant breeding: a new strategy for fighting micronutrient malnutrition. *SCN News*. 1995;12:15-19. PMID: 12346314.  
Bouis H.E., Hotz C., McClafferty B., Meenakshi J.V., Pfeiffer W.H. Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. *Food Nutr. Bull.* 2011;32:31S-40S.  
Cakmak I., Torun A., Millet E., Feldman M., Fahim T., Korol A., Nevo E., Braun H.J., Ozkan H. *Triticum dicoccoides*: an important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat. *Soil Sci. Plant Nutr.* 2004;50:1047-1054.  
Chen X.-P., Zhang Y.-Q., Tong Y.-P., Xue Y.-F., Liu D.-Y., Zhang W., Deng Y., Meng Q.-F., Yue S.-C., Yan P., Cui Z.-L., Shi X.-J., Guo S.-W., Sun Y.-X., Ye Y.-L., Wang Z.-H., Jia L.-L., Ma W.-Q., He M.-R., Zhang X.-Y., Kou C.-L., Li Y.-T., Tan D.-S., Cakmak I., Zhang F.-S., Zou C.-Q. Harvesting more grain zinc of wheat for human health. *Sci. Rep.* 2017;7:7016. DOI 10.1038/s41598-017-07484-2.  
Genc Y., Verbyla A.P., Torun A.A., Cakmak I., Willmore K., Wallwork H., McDonald G.K. Quantitative trait loci analysis of zinc efficiency and grain zinc concentration in wheat using whole genome average interval mapping. *Plant Soil.* 2009;314:49-66. DOI 10.1007/s11104-008-9704-3.  
Gomez-Becerra H.F., Morgounov A.I., Abugaliyeva A.I. Evaluation of the germplasm through the Kazakhstan-Siberian network of spring



- wheat improvement: I. Genotype × environment interactions and site classification for grain yield and grain protein content. *Austr. J. Agric. Res.* 2007;4:649-660.
- Gordeeva E., Shamanin V., Shoeva O., Kukoeva T., Morgounov A., Khlestkina E. The strategy for marker-assisted breeding of anthocyanin-rich spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in Western Siberia. *Agronomy*. 2020;10:1603. DOI 10.3390/agronomy10101603.
- Govindan V., Singh R.P., Crespo-Herrera L., Juliana Ph., Dreisigacker S., Valluru R., Stangoulis J., Sohu V.S., Mavi G.S., Mishra V.K., Balasubramaniam A., Chatrath R., Gupta V., Singh G.P., Joshi A.K. Genetic dissection of grain zinc concentration in spring wheat for mainstreaming biofortification in CIMMYT wheat breeding. *Sci. Rep.* 2018;8:13526. DOI 10.1038/s41598-018-31951-z.
- Guttieri M.J., Seaborn B.W., Liu C., Baenziger P.S., Waters B.M. Distribution of cadmium, iron, and zinc in millstreams of hard winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Agric. Food Chem.* 2015;63:10681-10688. DOI 10.1021/acs.jafc.5b04337.
- Khlestkina E.K., Shoeva O.Y., Gordeeva E.I., Otmakhova Y.S., Usenko N.I., Tikhonova M.A., Tenditnik M.V., Amstislavskaya T.G. Anthocyanins in wheat grain: genetic control, health benefit and bread-making quality. In: Current Challenges in Plant Genetics, Genomics, Bioinformatics, and Biotechnology: Proceed. of the Fifth Int. Sci. Conf. PlantGen2019 (June 24–29, 2019, Novosibirsk, Russia). Novosibirsk, 2019;5-18. DOI 10.18699/ICG-PlantGen2019-02.
- Krishnappa G., Singh A.M., Chaudhary S., Ahlawat A.K., Singh S.K., Shukla R.B., Jaiswa J.P., Singh G.P., Solanki I.S. 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.
- Listman M., Guzman C., Palacios-Rojas N., Pfeiffer W.H., San Vicente F., Govindan V. Improving nutrition through biofortification: pre-harvest and postharvest technologies. *Cereal Foods World*. 2019; 64(3). DOI 10.1094/CFW-64-3-0025.
- Liu H., Wang Z.H., Li F., Li K., Yang N., Yang Y., Huang D., Liang D., Zhao H., Mao H., Liu J., Qiu W. Grain iron and zinc concentrations of wheat and their relationships to yield in major wheat production areas in China. *Field Crops Res.* 2014;156:151-160. DOI 10.1016/j.fcr.2013.11.011.
- Morgounov A., Gomez-Becerra H.F., Abugaliev A. Iron and zinc concentration in grain of spring bread wheat from Kazakhstan and Siberia. *Agromeridian*. 2006;1(2):5-16.
- Morgunov A.I., Gomez-Becerra H.F., Abugaliev A.I., Dzhunusova M., Yessimbekova M.A., Muminjanov H., Zelenskiy Y., Ozturk L., Cakmak Y. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia. *Euphytica*. 2007;155:193-203. DOI 10.1007/s10681-006-9321-2.
- 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;163:381-390. DOI 10.1007/s10681-008-9681-x.
- Peleg Z., Cakmak I., Ozturk L., Yazici A., Jun Y., Budak H., Korol A.B., Fahima T., Saranga Y. Quantitative trait loci conferring grain mineral nutrient concentrations in durum wheat × wild emmer wheat RIL population. *Theor. Appl. Genet.* 2009;119:353-369. DOI 10.1007/s00122-009-1044-z.
- Qi Y.T., Zhou S.N., Zhang Q., Yang L.X. The effect of foliar Zn application at grain filling stage on Zn bioavailability in grain fractions of modern winter wheat cultivars. *J. Agro Environ. Sci.* 2013;32: 1085-1091.
- Saleh A.S.M., Wang P., Wang N., Yang S., Xiao Z. Technologies for enhancement of bioactive components and potential health benefits of cereal and cereal-based foods: research advances and application challenges. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2019;59(2):207-227. DOI 10.1080/10408398.2017.1363711.
- Singh B., Natesan S.K.A., Singh B.K., Usha K. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. *Curr. Sci.* 2005;88:36-44.
- Singh R.P., Velu G. Zinc-biofortified wheat: harnessing genetic diversity for improved nutritional quality. *Sci. Brief: Biofort.* 2017. Available at: [http://www.harvestplus.org/sites/default/files/publications/ScienceBrief-Biofortification-1\\_ZincWheat\\_May2017.pdf](http://www.harvestplus.org/sites/default/files/publications/ScienceBrief-Biofortification-1_ZincWheat_May2017.pdf)
- Uauy C., Distelfeld A., Fahima T., Blechl A., Dubcovsky J. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. *Science*. 2006;314(5803):1298-1301. DOI 10.1126/science.1133649.
- Velu G., Crespo-Herrera L., Huert J., Payne T., Guzman C., Singh R.P. Assessing genetic diversity to breed competitive biofortified wheat with increased grain Zn and Fe concentrations. *Front. Plant Sci.* 2019;9:1971. DOI 10.3389/fpls.2018.01971.
- Velu G., Ortiz-Monasterio I., Cakmak I., Hao Y., Singh R.P. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. *J. Cereal Sci.* 2014;59:365-372.
- Velu G., Singh R.P., Huerta-Espino J., Peña R.J. Breeding for enhanced zinc and iron concentration in CIMMYT spring wheat germplasm. *Czech J. Genet. Plant Breed.* 2011;47:S174-S177. DOI 10.17221/3275-CJGPB.
- Verma S.K., Kumar S., Sheikh I., Malik S., Mathpal P., Chugh V., Kumar S., Prasad R., Dhaliwal H.S. Transfer of useful variability of high grain iron and zinc from *Aegilops kotschyi* into wheat through seed irradiation approach. *Int. J. Radiat. Biol.* 2016;92(3):132-139. DOI 10.3109/09553002.2016.1135263.
- Wang J.W., Kong F., Liu R., Fan Q., Zhang X. Zinc in wheat grain, processing, and food. *Front. Nutr.* 2020;7:124. DOI 10.3389/fnut.2020.00124.
- Waters B.M., Uauy C., Dubcovsky J., Grusak M.A. Wheat (*Triticum aestivum*) NAM proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen compounds from vegetative tissues to grain. *J. Exp. Bot.* 2009;60:4263-4274.
- Welch R.M., Graham R.D. Breeding crops for enhanced micronutrient content. *Plant Soil*. 2002;245:205-214.
- WHO. The World Health Report. Geneva: World Health Organization. Accessed June 1, 2017.
- Xu Y., Diaoguo A., Dongcheng L., Aimin Z., Hongxing X., Bin L. Molecular mapping of QTLs for grain zinc, iron and protein concentration of wheat across two environments. *Field Crops Res.* 2012;138: 57-62.
- Zou C., Du Y., Rashid A., Ram H., Savasli E., Pieterse P.J., Ortiz-Monasterio I., Yazici A., Kaur C., Mahmood K., Singh S., Le Roux M.R., Kuang W., Onder O., Kalayci M., Cakmak I. Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. *J. Agric. Food Chem.* 2019;67(29):8096-8106. DOI 10.1021/acs.jafc.9b01829.

#### ORCID ID

V.P. Shamanin [orcid.org/0000-0003-4767-9957](https://orcid.org/0000-0003-4767-9957)  
P. Flis [orcid.org/0000-0002-5529-7599](https://orcid.org/0000-0002-5529-7599)  
T.V. Savin [orcid.org/0000-0002-3550-647x](https://orcid.org/0000-0002-3550-647x)  
S.S. Shepelev [orcid.org/0000-0002-4282-8725](https://orcid.org/0000-0002-4282-8725)  
O.G. Kuzmin [orcid.org/0000-0003-4918-0025](https://orcid.org/0000-0003-4918-0025)  
A.S. Chursin [orcid.org/0000-0001-6797-6145](https://orcid.org/0000-0001-6797-6145)

I.V. Pototskaya [orcid.org/0000-0003-3574-2875](https://orcid.org/0000-0003-3574-2875)  
I.E. Likhenko [orcid.org/0000-0002-0305-1036](https://orcid.org/0000-0002-0305-1036)  
I.Yu. Kushnirenko [orcid.org/0000-0001-5463-9932](https://orcid.org/0000-0001-5463-9932)  
A.A. Kazak [orcid.org/0000-0002-0563-3806](https://orcid.org/0000-0002-0563-3806)  
V.A. Chudinov [orcid.org/0000-0002-2639-9000](https://orcid.org/0000-0002-2639-9000)  
T.V. Shelaeva [orcid.org/0000-0001-7328-572X](https://orcid.org/0000-0001-7328-572X)  
A.I. Morgounov [orcid.org/0000-0001-7082-5655](https://orcid.org/0000-0001-7082-5655)

**Благодарности.** Исследование проведено при финансовой поддержке программы Европейского Союза «Горизонт-2020» (соглашение № 731013) и Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-534).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 08.02.2021. После доработки 07.05.2021. Принята к публикации 11.05.2021.