

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-5-1268
УДК 631.11«321»:631.527

EDN: UGRKWM



Научная статья

ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ И ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОБРАЗЦОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И ВЫДЕЛЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ХОЗЯЙСТВЕННО-ЦЕННЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

*И.В. Потоцкая, С.С. Шепелев, А.С. Чурсин,
А.М. Ковальчук, В.П. Шаманин*

Аннотация

Обоснование. Подбор родительских форм методами геномной селекции направлен на поиск генотипов с высокой селекционной ценностью для повышения эффективности селекции озимой пшеницы.

Цель. Выделить сорта и линии озимой пшеницы в качестве источников хозяйственно-ценных признаков для селекции в условиях Западной Сибири на основе фенотипических и генотипических методов оценки.

Материалы и методы. Проведена фенотипическая оценка коллекции 90 образцов озимой мягкой пшеницы разного эколого-географического происхождения в 2022–2024 гг. с использованием общепринятых полевых и лабораторных методов. Фенотипические данные подвергнуты анализу BLUP1 на основе генотипирования коллекции с помощью 55 KASP-маркеров.

Результаты. Установлено, что при геномном отборе прогностические значения хозяйственно-ценных признаков образцов коллекции были близки к данным фенотипического отбора. Сорта Донской Маяк, Донская юбилейная, KS13DH0039-99, линии WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18..., TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau... имели высокие генетические эффекты по показателю зимостойкости (4,55–5,90) при прогнозируемой зимостойкости 65,3–66,5%. Образцы K 18918, Конкурент, CO13D1299 имели высокие генетические эффекты по количеству продуктивных стеблей на единице площади (23,3–30,2) и по продуктивной кустистости (0,26–0,38); для образцов WBLL1*2 /

Tukuru // Billings и Griset 9 /4/ Agri / NAC // Kauz /3/... отмечены более высокие прогностические эффекты по массе зерна главного колоса (0,06–0,08) и массе 1000 зерен (1,89–1,91).

Заключение. Выделены образцы с высокими генетическими эффектами по изученным признакам, которые целесообразно включать в качестве источников в селекционные программы озимой пшеницы в условиях Западной Сибири.

Ключевые слова: озимая пшеница; коллекция; метод BLUP; SNP-локусы; хозяйственно-ценные признаки

Для цитирования. Потockая, И. В., Шепелев, С. С., Чурсин, А. С., Ковальчук, А. М., & Шаманин, В. П. (2025). Фенотипическая и генотипическая оценка образцов озимой пшеницы и выделенные источники хозяйственно-ценных признаков для селекции в условиях Западной Сибири. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(5), 341-365. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-5-1268>

Original article

PHENOTYPIC AND GENOTYPIC EVALUATION OF WINTER WHEAT SAMPLES AND IDENTIFIED SOURCES OF ECONOMICALLY VALUABLE TRAITS FOR BREEDING UNDER CONDITIONS OF WESTERN SIBERIA

*I.V. Pototskaya, S.S. Shepelev, A.S. Chursin,
A.M. Kovalchuk, V.P. Shamanin*

Abstract

Background. The genomic selection methods aim to select the parental forms for searching of genotypes with high breeding value to increase the efficiency of winter wheat breeding.

Purpose. To identify winter wheat varieties and lines as sources of economically valuable traits for breeding under conditions of Western Siberia based on phenotypic and genotypic evaluation methods.

Materials and methods. A phenotypic evaluation of 90 winter bread wheat samples from collection of different ecological and geographical origin was carried out in 2022–2024 via generally accepted field and laboratory methods. Phenotypic data were analyzed by BLUPI based on genotyping of the collection with usage of 55 KASP-markers.

Results. It was found that the prognostic values of economically valuable traits of the collection samples provided by genomic method, were close to the phenotypic selection data. The varieties Donskoy Mayak, Donskaya Yubileinaya, KS13DH0039-99, lines WBL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18..., TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau... had high genetic effects for winter hardiness (4.55–5.90) with predicted winter hardiness of 65.3–66.5%. The samples K 18918, Konkurent, CO13D1299 had high genetic effects for No. of stems per unit area (23.3–30.2) and No. of spikes per plant (0.26–0.38); for the WBL1*2 / Tukuru // Billings and Griset 9 /4/ Agri / NAC // Kauz /3/... higher prognostic effects were noted for the weight of grain per spike (0.06–0.08) and thousand kernel weight (1.89–1.91).

Conclusion. Samples with high genetic effects for the studied traits were identified, which should be included as sources in winter wheat breeding programs under conditions of Western Siberia.

Keywords: winter wheat; collection; BLUP method; SNP loci; economically valuable traits

For citation. Pototskaya, I. V., Shepelev, S. S., Chursin, A. S., Kovalchuk, A. M., & Shamanin, V. P. (2025). Phenotypic and genotypic evaluation of winter wheat samples and identified sources of economically valuable traits for breeding under conditions of Western Siberia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(5), 341–365. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-5-1268>

Введение

Пшеница является одной из трех зерновых культур, имеющих наибольшее распространение в растениеводстве, однако темпы роста урожайности пшеницы на основе растущего населения в мире недостаточны для удовлетворения спроса на зерно этой культуры. В настоящее время в Западной Сибири в связи с потеплением климата озимая пшеница оценивается как более перспективная культура за счет повышенной урожайности и большего производственного потенциала в сравнении с яровой пшеницей [2; 10]. Привлечение в селекцию генофонда озимой пшеницы из различных генетических коллекций направлено на поиск новых источников ценных аллелей генов, важных для селекции озимой пшеницы признаков [30]. Идентификация генов, контролирующих хозяйственно-ценные признаки, с помощью ДНК-маркеров в последние годы стало рутинной селекционной практики и служит надежным инструментом для улучшения сортов озимой пшеницы [4; 6]. Оценка эффектов аллелей генов на фенотипическое проявление ценных признаков позволяет определить приоритетные признаки при отборе селекционного материала в конкретных почвенно-климатических условиях [11; 31].

Основная стратегия ускорения современной селекции также основана на отборе с помощью молекулярных маркеров, который позволяет, независимо от условий среды, эффективно выделить генотипы с целевым геном – маркер-вспомогательная селекция (MAS) [17; 21]. Полиморфизм однонуклеотидных повторов (SNP) в настоящее время находит все большее распространение в селекции пшеницы в сравнении с ранее используемыми классами молекулярных маркеров [8; 16]. Преимущество KASP-маркеров (Конкурентная аллель-специфичная ПЦР, Competitive Allele Specific PCR) заключается в возможности детекции аллельных вариантов гена при массовом генотипировании коллекционного и селекционного материала без проведения трудозатратного гель-электрофореза [3; 7; 29]. Большой потенциал для селекции на создание высокоурожайных сортов пшеницы, устойчивых к стрессовым факторам, является применение KASP-маркеров, ассоциированных с QTLs, оказывающими плеiotропный эффект на несколько селекционно-значимых признаков. Например, картирован плеiotропный кластер QTL (*QSc/Sl.cib-5A* и *QSc/Sl.cib-6A*), влияющий одновременно на высоту растения, массу 1000 зерен и длину зерновки [18]. Разработаны KASP-маркеры к кластеру QTL (*Qclu.yas-2D*), определяющему устойчивость пшеницы к фузариозу, повышающему компактность и озерненность колоса [15]. Однако одним из недостатков маркер-вспомогательной селекции для полигенных признаков, таких как компоненты продуктивности растения, является недостаточная точность прогноза генотипов с ценными генами. В этой связи в качестве прогностической модели для анализа селекционной ценности сортов рассматривается метод линейной модели BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) [19; 23]. Данная смешанная модель позволяет определить эффект всех SNP-маркеров на фенотипическое проявление признака. Подбор родительских форм на основе геномной модели BLUP направлен на целенаправленную передачу аллелей тех локусов, которые представляют генетическую ценность для селекционной практики [9].

Цель исследования – выделить сорта и линии озимой пшеницы в качестве источников хозяйственно-ценных признаков для селекции в условиях Западной Сибири на основе фенотипических и генотипических методов оценки.

Материал и методы исследований

Материалом исследований служили 90 образцов и линий озимой мягкой пшеницы разных эколого-географических групп: России, Болгарии, Турции, США и международной программы TCI (Turkey–CIMMYT–

ICARDA). Образцы российской селекции представлены из селекционных учреждений Ростовской области и Краснодарского края: «Федеральный Ростовский АНЦ», АНЦ «Донской», «Национальный центр зерна имени П.П. Лукьяненко». Исследования проведены в 2022–2024 гг. на малом опытном поле ФГБОУ ВО Омский ГАУ. Посев коллекционного питомника осуществлялся в 2-х кратной повторности на площади делянок 3 м² в 2022–2023 гг. и в 3-х кратной повторности на площади 1 м² в 2024 г. В качестве стандарта использовали среднеспелый сорт озимой пшеницы Омская 4. Полевые оценки проводили, руководствуясь методическими указаниями ВИР [5]. Структурный анализ компонентов урожайности выполнен по сноповому материалу с использованием учетного рядка каждой делянки.

Метод BLUP и статистический анализ

Для оценки селекционной ценности образцов озимой пшеницы из международной коллекции использован метод BLUP по признакам: продолжительность вегетационного периода, зимостойкость, высота растения, количество продуктивных стеблей, продуктивная кустистость, число зерен главного колоса, масса зерна главного колоса, масса 1000 зерен, К_{хоз.} главного колоса, урожайность. Фенотипические данные за три года исследований были подвергнуты анализу индивидуального наилучшего линейного несмещенного прогноза (BLUP) на основе данных генотипирования коллекции с помощью 55 KASP-маркеров, подробно описанных ранее [24]. Метод BLUP выполнен с помощью пакета R *rrBLUP* (<https://cran.r-project.org/web/packages/rrBLUP/index.html>) с использованием следующей модели [22, 26]:

$$y = X\beta + Z_a a + Z_d d + Z_i i + e,$$

где y – вектор фенотипических данных; β – вектор фиксированных эффектов; a , d и i векторы членов a , d и ϵ соответственно; X , Z_a , Z_d , и Z_i – матрицы инцидентности, связывающие фенотипы с β , a , d и i , соответственно; e – вектор ошибок.

Для данной модели учитывали прогнозируемые оценки, значимые при p -value < 0,05. Дисперсионный анализ проводили по руководству Доспехова [1] с использованием Microsoft Excel.

Агрометеорологические условия в годы проведения исследований

Вегетационный период 2022 г. характеризовался как засушливый (ГТК = 0,91) со средними декадными температурами, неравномерным распределением осадков – в мае сумма осадков составила 35% от среднемноголетней (6 мм); 2023 г. характеризовался как острозасушливый (ГТК = 0,63), с большим недобором осадков в мае (12 мм) и, напротив, превышением среднегодово-

го количества осадков в августе – начале сентября (46 мм). В зимний период в 2021–2022 гг. отмечена меньшая высота снежного покрова (20,1 см) в сравнении с 2022–2023 гг. (24,9 см), тогда как среднесуточные температуры существенно не отличались. В сезон 2023–2024 гг. в период с сентября по август выпало 577 мм осадков, что на 200 мм больше среднегодовых значений. Снега выпало более чем на 30 мм больше чем в сезоне 2022–2023 гг., что позволило сформировать большую высоту снежного покрова. ГТК в 2023–2024 гг. составил 1,49, что характеризует год как избыточно увлажненный.

Результаты

В табл. 1 представлена фенотипическая оценка основных хозяйственно-ценных признаков образцов международной коллекции озимой пшеницы.

Таблица 1.

Характеристика основных хозяйственно-ценных признаков сортов и линий разных экологических групп, в среднем за 2022–2024 гг.

Признак	Россия	Болгария	Турция	США	ТС1	НСР ₀₅
Количество образцов, шт.	28	6	8	17	31	–
Вегетационный период, сут.	315	314	315	313	313	1,46
Диапазон	312–318	312–317	312–317	309–316	309–322	
Зимостойкость, %	63,5	60,8	60,2	59,9	57,3	2,00
Диапазон	49–75	47–71	48–72	31–74	34–78	
Количество продуктивных стеблей, шт./м ²	97,2	86,6	87,8	108	81,2	4,72
Диапазон	63–138	53–111	59–116	42–139	46–126	
Высота растения, см	64,2	67,2	63,2	62,0	65,8	1,25
Диапазон	57–75	59–77	58–68	52–71	55–79	
Продуктивная кустистость, шт./раст.	2,60	2,60	2,60	2,80	2,70	0,05
Диапазон	1,7–4,5	1,8–3,4	2,1–3,2	2,0–4,0	1,9–4,8	
Длина колоса, см	8,80	8,60	8,20	8,10	8,70	0,17
Диапазон	7,4–12	7,4–9,9	7,4–8,8	6,8–9,4	7,2–9,8	
Число зерен главного колоса, шт.	35,2	35,9	35,6	35,6	33,3	1,95
Диапазон	24–41	32–39	27–41	29–43	25–44	
Масса зерна главного колоса, г	1,30	1,40	1,20	1,20	1,20	0,05
Диапазон	0,8–1,6	1,1–1,6	0,9–1,6	0,9–1,6	0,7–1,9	
Масса 1000 зерен, г	36,8	37,4	36,5	35,5	36,1	1,16
Диапазон	29–49	33–44	30–45	29–66	28–48	

К _{хоз.} главного колоса	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,02
Диапазон	0,6–0,9	0,6–0,8	0,6–0,8	0,6–0,8	0,6–0,8	
Урожайность, г/м ²	254	202	240	272	204	27,6
Диапазон	71–384	136–328	179–352	55–495	78–389	

Принадлежность образцов к разным эколого-географическим группам и контрастные погодные условия за годы исследований обусловили широкий диапазон выраженности изученных признаков. Продолжительность вегетации коллекционных образцов варьировала от 309 до 322 сут. и составила по разным экологическим группам 313–315 сут. Образцы из США отличались меньшей продолжительностью вегетационного периода (в среднем 313 сут.). Зимостойкость представленных групп образцов составила в среднем 57,3–63,5%, более зимостойкие сорта имели российское происхождение (63,5%). Образцы международной коллекции характеризовались пониженной высотой стебля: 64,2 см (Россия), 67,2 см (Болгария), 63,2 см (Турция), 62,0 см (США) и 65,8 см (ТСИ). Сравнительный анализ пяти групп образцов показал различия в компонентах урожайности российской и зарубежных селекционных программ: американские образцы имели большие показатели по количеству продуктивных стеблей (108 шт./м²) и продуктивной кустистости (2,80 шт./раст.), тогда как российские и болгарские образцы отличались большей продуктивностью колоса и массой 1000 зерен (1,30 и 1,40 г; 36,8 и 37,4 г соответственно). Урожайность у коллекционных образцов варьировала в зависимости от их происхождения: 254 г/м² (Россия), 202 г/м² (Болгария), 240 г/м² (Турция), 272 г/м² (США) и 204 г/м² (ТСИ).

Прогнозирование признаков при использовании модели BLUPI позволило выявить селекционную ценность генотипов в сравнении со стандартом Омская 4 для отдельных направлений селекционной работы по озимой пшенице (табл. 2).

Таблица 2.

Прогнозируемые генетические эффекты на хозяйственно-ценные признаки методом BLUPI, 2022–2024 гг.

Сорт, линия	Прогнозируемый генетический эффект				Прогнозируемое значение признака
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	В среднем	
Продолжительность вегетационного периода, сут.					
Омская 4, St	0,99	0,32	0,31	0,54	315
KS100610K-7	-1,43	-1,11	-0,76	-1,10	313
KS13DH0030-29	-0,91	-1,16	-1,12	-1,06	313

KS13DH0024-48	-0,91	-1,16	-1,12	-1,06	313
Agri / NAC // Attila /4/ C80.1...	-1,29	-0,98	-0,68	-0,98	313
Ростовчанка 7	-1,33	-0,89	-0,67	-0,96	313
Донской сюрприз	-0,94	-1,12	-0,80	-0,95	313
Танаис	-1,19	-0,83	-0,76	-0,93	313
Yubileinaya 75 /3/ Agri / BJY // VEE...	-1,04	-0,90	-0,77	-0,90	313
НСР ₀₅	0,15	0,13	0,10	0,12	1,46
Зимостойкость, %					
Омская 4, St	1,38	-2,09	-2,26	-0,99	58,8
KS13DH0039-99	7,49	10,2	2,36	6,68	66,5
WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18	8,71	8,72	2,89	6,77	66,6
Донской Маяк	9,39	7,80	2,13	6,44	66,2
Донера	7,08	9,52	0,81	5,80	65,6
Находка	5,78	10,2	1,97	5,98	65,8
TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau...	6,75	8,44	2,90	6,03	65,8
Донская юбилейная	4,29	9,34	2,76	5,46	65,3
Duster / Billings	2,38	8,51	4,93	5,27	65,1
НСР ₀₅	0,88	1,13	0,49	0,83	2,00
Количество продуктивных стеблей, шт./м ²					
Омская 4, St	2,05	16,2	1,01	6,42	96,9
К 18918	15,0	61,4	14,2	30,2	120,7
Конкурент	4,51	53,9	13,4	23,9	114,5
CO13D1299	8,91	45,7	15,4	23,3	113,8
KS13DH0030-29	23,5	8,45	0,30	10,8	101,3
KS13DH0024-48	23,5	8,45	0,30	10,8	101,3
Жива	16,5	5,74	9,23	10,5	101,0
KS13DH0020-59	19,9	6,31	4,57	10,3	100,8
НСР ₀₅	2,24	3,86	1,14	2,41	4,25
Продуктивная кустиность, шт./раст.					
Омская 4, St	0,07	-0,03	0,19	0,08	2,70
К 18918	0,37	0,18	0,59	0,38	3,01
Конкурент	0,25	0,28	0,36	0,29	2,92
CO13D1299	0,26	0,25	0,28	0,26	2,89
Алексеич	0,07	0,31	0,16	0,18	2,81
Л 2293	0,06	0,32	0,12	0,17	2,79
НСР ₀₅	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05
Длина колоса, см					
Омская 4, St	0,11	0,09	0,19	0,13	8,66

Безостая 1	0,34	0,36	0,55	0,42	8,94
D67.2 / P66.270 // <i>Ae.sq.</i> (320)...	0,38	0,44	0,37	0,39	8,93
Pantheon / Bluegil 2...	0,38	0,44	0,37	0,39	8,93
Анка	0,41	0,35	0,29	0,35	8,88
SG-U 7067 /5/ TEMU 39.76	0,37	0,26	0,34	0,32	8,85
MV-Ispan	0,33	0,29	0,25	0,29	8,82
Витор / Mufitbey	0,37	0,27	0,18	0,27	8,78
Дуплер	0,36	0,09	0,33	0,26	8,78
НСР ₀₅	0,05	0,04	0,06	0,05	0,18
Число зерен главного колоса, шт.					
Омская 4, St	-0,28	-0,73	0,09	-0,31	30,0
Agri / NAC // Attila /4/ C80.1...	1,03	0,63	1,77	1,14	35,1
WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18	1,27	1,54	0,18	0,99	35,2
OCW00S106S / Garrison	1,04	0,42	1,38	0,95	35,2
Донская Лира	0,69	0,92	0,85	0,82	34,6
Донна	0,68	1,19	0,09	0,65	34,9
MV 233-05 // Pantheon / Bluegil 2 /3/ Gondvana	0,13	0,13	1,58	0,61	34,9
Маркиз	0,24	1,17	0,38	0,59	34,8
KS13DH002722	0,14	0,10	1,27	0,50	34,8
НСР ₀₅	0,20	0,23	0,32	0,25	1,95
Масса зерна главного колоса, г					
Омская 4, St	-0,01	-0,04	-0,06	-0,04	1,10
WBLL1*2 / Tukuru // Billings	0,02	0,12	0,09	0,08	1,32
Sonmez 01 / Ahmetaga // Sonmez 01	0,03	0,11	0,09	0,08	1,32
Kisla	0,02	0,12	0,09	0,08	1,32
Kalyta	0,06	0,09	0,08	0,08	1,29
Griset 9 /4/ Agri / NAC // Kauz /3/...	0,02	0,09	0,08	0,06	1,29
Донна	0,06	0,02	0,09	0,06	1,30
WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18	0,07	0,01	0,07	0,06	1,29
Граф	0,05	0,04	0,08	0,06	1,30
Маркиз	0,03	0,03	0,06	0,04	1,28
НСР ₀₅	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05
Масса 1000 зерен, г					
Омская 4, St	-0,07	-0,01	-0,06	-0,05	34,2
Gelibolu	0,38	2,78	4,64	2,60	38,7
D67.2 / P66.270 // <i>Ae.sq.</i> (320)...	0,41	2,88	4,24	2,51	38,8

Pantheon / Bluegil 2...	0,41	2,88	4,24	2,51	38,8
Gondvana // HBK 0935-29-15	0,10	3,59	2,51	2,07	38,3
MV-Bojtar	1,42	1,04	3,74	2,07	37,3
Griset 9 /4/ Agri / NAC // Kauz /3/...	0,50	0,97	4,27	1,91	37,8
WBLL1*2 / Tukuru // Billings	0,50	1,47	3,70	1,89	37,8
Жива	0,05	3,08	1,87	1,67	37,9
НСР ₀₅	0,16	0,30	0,49	0,32	1,16
K _{гол.} главного колоса					
Омская 4, St	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02	0,69
KS13DH0039-99	0,03	0,03	0,04	0,03	0,75
Duster / Billings	0,03	0,02	0,05	0,03	0,75
WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18	0,02	0,04	0,03	0,03	0,74
Донская юбилейная	0,02	0,03	0,03	0,03	0,74
KS100610K-7	0,01	0,03	0,04	0,03	0,74
Agri / NAC // Attila /4/ C80.1...	0,02	0,02	0,05	0,03	0,74
TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau...	0,03	0,02	0,03	0,03	0,74
Attila*2 / Esda // Mason...	0,02	0,01	0,04	0,02	0,74
Esperia	0,02	0,01	0,04	0,02	0,74
НСР ₀₅	0,003	0,005	0,01	0,004	0,02
Урожайность, г/м ²					
Омская 4, St	-5,62	3,70	-6,26	2,73	209
К 18918	22,6	62,5	76,1	53,7	285
CO13D1299	0,88	52,8	90,7	48,1	277
Конкурент	1,81	56,4	59,5	39,2	271
KS13DH0039-99	30,7	63,4	0,89	31,7	263
TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau...	27,8	50,9	10,6	29,8	262
Attila*2 / Esda // Mason...	22,2	27,7	38,4	29,4	261
Esperia	22,2	27,7	38,4	29,4	261
KS13DH0030-29	5,43	46,5	28,3	26,7	258
НСР ₀₅	2,85	6,25	8,67	5,92	27,6

Примечание: Генетические эффекты значимы при $p < 0,05$

Значения генетических эффектов на хозяйственно-ценные признаки варьировали в сильной степени в разные годы исследований и позволили выявить генотипы с высокими генетическими эффектами в качестве высокоперспективных родительских форм в программах гибридизации. Для продолжительности вегетационного периода генетические эффекты варьировали от $-0,90$ до $-1,10$ при прогнозируемом значении признака 313 сут. Российские сорта Ростовчанка 7, Донской сюрприз, Танаис; сорта американской селекции

KS100610K-7, KS13DH0030-29, KS13DH0024-48; образцы международной программы TCI Agri / NAC // Attila /4/ C80.1..., Yubileinaya 75 /3/ Agri / BJK // VEE... позволят сократить период вегетации минимум на 2 сут. в сравнении со стандартом Омская 4. Высокие оценки селекционной ценности образцов озимой пшеницы по зимостойкости (в среднем 65,1–66,6%) имели образцы Донской Маяк, Донера, Находка, Донская юбилейная, KS13DH0039-99, WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18..., TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau..., Duster / Billings. Аллели SNP-локусов, зафиксированные в отдельных генотипах, как правило, отличаются по влиянию на экспрессию разных количественных признаков. Так, образцы К 18918, Конкурент, СО13D1299 имели высокие генетические эффекты на количество продуктивных стеблей на единицу площади (23,3–30,2) и продуктивную кустистость (0,26–0,38), что положительно сказалось на таком интегральном признаке, как урожайность (39,2–53,7). Для образцов зарубежной селекции WBLL1*2 / Tukuru // Billings и Griset 9 /4/ Agri / NAC // Kauz /3/..., напротив, отмечены более высокие прогностические эффекты на массу зерна главного колоса (0,06–0,08) и массу 1000 зерен (1,89–1,91). Генотипы зарубежной селекции KS13DH0039-99, TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau..., Attila*2 / Esda // Mason... представляют интерес для повышения коэффициента хозяйственной эффективности фотосинтеза (прогностическое значение 0,74–0,75) и урожайности (261–263 г/м²).

При геномном отборе прогностические значения хозяйственно-ценных признаков образцов коллекции, представленные в табл. 2, несущественно отличаются от данных фенотипического отбора. Выделен набор генотипов с самыми высокими генетическими эффектами на отдельные признаки как наиболее перспективные для программ гибридизации (табл. 3).

Таблица 3.

Основные агрономические признаки лучших образцов озимой пшеницы, в среднем за 2022–2024 гг.

Сорт, линия	Вегетационный период, сут.	Зимостойкость, %	Высота растения, см	Продуктивная кустистость, шт./раст.	Число зерен колоса, шт.	Масса зерна колоса, г	Масса 1000 зерен, г	К _{зоб.} главного колоса	Урожайность, г/м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Омская 4, St	316	63,0	74,3	2,30	25,9	1,06	32,9	0,72	246
Россия									
Жива	318	67,3*	73,0	2,07	37,7*	1,43*	38,5*	0,79*	384*

Донская Лира	312	64,5	66,7	2,50*	30,9*	1,17*	37,9*	0,75*	367*
Донна	315	59,7	67,3	2,45*	31,0*	1,19*	37,9*	0,71	351*
К 18918	315	57,1	57,1	2,31	40,3*	1,23*	30,7	0,69	297*
Конкурент	315	63,9	59,4	2,69*	34,5*	1,43*	41,1*	0,72	278*
Донской Маяк	312	65,7*	68,1	4,13*	40,2*	1,55*	37,9*	0,76*	276*
Донская юбилейная	313	65,0*	61,4	2,80*	33,1*	1,18*	34,9*	0,71	248
Турция									
Gelibolu	314	71,0*	65,2	2,21	40,3*	1,49*	45,3*	0,77*	352*
США									
CO13D1299	311	63,3	67,9	3,23*	34,9*	1,26*	35,9*	0,82*	495*
KS13DH00 20-59	309	61,0	66,3	3,12*	30,8*	1,25*	40,4*	0,74*	337*
KS13DH00 30-29	314	61,3	66,7	2,47*	38,2*	1,19*	30,8	0,70	327*
KS13DH00 39-99	312	68,3*	70,0	2,35*	28,8*	0,88	30,4	0,67	287*
KS100610K-7	312	60,7	59,6	2,42*	34,1*	1,08	31,2	0,74*	243
ТСІ									
WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18	314	66,0*	70,7	3,21*	33,9*	1,09	31,9	0,75*	389*
TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau...	310	50,0	79,0	4,77*	30,6*	1,21*	39,9*	0,70	316*
Agri / NAC // Attila /4/ C80.1...	310	71,5*	74,8	2,05	36,1*	1,52*	41,4*	0,73	273*
WBLL1*2 / Tukuru // Billings	312	59,3	77,9	2,89*	38,5*	1,64*	42,7*	0,73	241
HCP _{ос}	1,46	2,00	1,25	0,05	1,95	0,05	1,16	0,02	27,6

Примечание: достоверное превышение над стандартом

Данный набор образцов относится к среднеранним и среднеспелым формам с продолжительностью вегетации от 309 до 318 сут. При анализе главного селективируемого признака – урожайности выделены в основном образцы трех экологических групп – Россия, США и ТСІ. Средняя урожайность образцов данных групп составила 241–495 г/м² при средней зимостойкости 50,0–71,5% и высоте растения 57,1–79 см. Зимостойкость образцов коллекции служила основным показателем, от которого зависит урожайность сортов озимой пшеницы в условиях Западной Сибири. Образцы Жива, Донской Маяк, Донская юбилейная, Gelibolu, KS13DH0039-99, Agri / NAC // Attila /4/ C80.1... показали высокую зимостойкость 65,0–71,5% при средней урожайности 273–389 г/м². Компоненты урожайности образцов Донская Лира, Донна, Конкурент, Донской Маяк, Донская юбилейная, CO13D1299, KS13DH0020-59, TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau..., WBLL1*2 / Tukuru // Billings превышали показатели стандарта Омская 4: продуктивная кусти-

стость – 2,42–4,77 шт./м², число зерен колоса – 30,6–40,2 шт., масса зерна колоса – 1,17–1,64 г, масса 1000 зерен – 34,9–42,7 г. Сорты Жива, Донской Маяк, Донская Лира, Gelibolu, CO13D1299, KS13DH0020-59, KS100610K-7 и линия WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18... имели лучшие показатели $K_{\text{хоз}}$ главного колоса (0,74–0,82).

Обсуждение

В селекционной практике длительное время применялся отбор по фенотипу, однако эффективность такой стратегии ограничена из-за влияния модификаций на выраженность количественных признаков. Альтернативная стратегия отбора – оценка селекционной ценности для признаков, контролируемых несколькими QTL с малыми эффектами на основе индивидуального наилучшего линейного несмещенного прогноза (BLUPI) [20, 25]. В данной работе представлен метод геномного прогнозирования фенотипа с учетом вклада полиморфизма SNP-локусов, идентифицированного с помощью KASP-маркеров, для выявления потенциальных генетических источников озимой пшеницы в качестве родительских форм программ гибридизации. Повышение точности прогнозирования фенотипического профиля сортов с известными ДНК-маркерами в определенной степени будет способствовать прогрессу селекции озимой пшеницы, в частности по признаку зимостойкости – основного целевого признака в условиях Западной Сибири [24].

Высокие оценки селекционной ценности и фенотипическое проявление признака указывают на точность прогноза при выборе генотипа. Сорты Донской Маяк, Донская юбилейная, KS13DH0039-99, линии программы TCI (WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18..., TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau...) имели высокие генетические эффекты на зимостойкость (4,55–5,90) при прогнозируемой зимостойкости 65,3–66,5%. Фенотипическая оценка зимостойкости за три года исследований для данных генотипов составила 65–68,3%, за исключением линии TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau... (50%). При создании сортов озимой пшеницы целесообразно одновременное повышение зимостойкости и урожайности. При отборе по фенотипу значения урожайности (278–495 г/м²) российских сортов Конкурент, К 18918 и американских CO13D1299, KS13DH0039-99 превысили их прогнозируемую урожайность (263–285 г/м²), полученную с помощью BLUP (табл. 2). Зимостойкость выделенных сортов также высокая и составила 57,1–63,9%.

В нашей работе использовались данные генотипирования коллекции образцов озимой пшеницы с помощью ограниченного количества SNP-ло-

кусов, что могло сказаться на точности оценки селекционной ценности. Однако большой набор изученных генотипов и фенотипические данные за три года исследований доказали возможность отбора с помощью модели BLUPI на основе небольшого набора SNP-локусов, поскольку по большинству компонентов продуктивности растений прогностические оценки также совпали с фенотипическими данными для отечественных и зарубежных образцов: К 18918, Конкурент, Донская Ли́ра, Донна, CO13D1299, KS13DH0039-99, WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18..., WBLL1*2 / Tukuru // Billings, TAM 200 / Kaus // Yu Mai 30 /4/ Pfaу..., Agri / NAC // Attila /4/ C80.1... (табл. 2, 3).

В случае полногеномного генотипирования селекционного материала с использованием ДНК-чипов эффективность геномного прогнозирования BLUP для широкого спектра агрономических признаков выше и доказана во многих зарубежных публикациях [13; 28]. В работе N.A. Potapova et al. (2024) отмечен высокий ожидаемый ответ на отбор с помощью BLUP по содержанию макро- и микроэлементов у сортов и интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы. При этом отмечается, что несоответствие такого рода отбора с отбором по фенотипу может быть связано с ограниченным размером тестируемой популяции, полигенным или плейотропным контролем признака. Увеличение точности прогнозирования признаков повышается, в основном, с увеличением размера тестируемой популяции и количества SNP-маркеров при генотипировании. Предсказательная способность также выше на основе мультиаллельных гаплотипов с учетом корректировки порогового значения неравновесного сцепления (LD) маркеров с целевыми генами [12; 14]. Привлечение в скрещивания генетически отдаленных родительских форм, в частности сортов ростовской и краснодарской селекции с зарубежными образцами будет способствовать повышению генетического разнообразия, адаптивности и урожайности сортов озимой пшеницы. В настоящее время поиск родительских форм, имеющих высокие селекционные оценки, методом геномной селекции является приоритетным направлением селекционных программ во многих странах мира [27].

Заключение

Для селекционных программ по озимой пшенице получена информация о селекционной ценности по основным хозяйственно-ценным признакам среди образцов разного географического происхождения. Показана эффективность геномного прогнозирования фенотипа с учетом вклада полимор-

физма SNP-локусов, идентифицированного с помощью KASP-маркеров, для выявления потенциальных генетических источников озимой пшеницы в качестве родительских форм программ гибридизации. Рекомендованы линии в качестве потенциальных генотипов для включения в гибридизацию с высокими прогностическими оценками: сорта российской селекции Жива, Донская Лира, Донна, К 18918, Конкурент, Донской Маяк, Донская юбилейная; турецкий сорт Gelibolu; американские сорта CO13D1299, KS13DH0020-59, KS13DH0030-29, KS13DH0039-99, KS100610K-7; линии международной программы TCI WBLL1*2 / Kuruku /5/ Chuen-Mai 18..., TAM 200 / Kauz // Yu Mai 30 /4/ Pfau..., Agri / NAC // Attila /4/ C80.1..., WBLL1*2 / Tukurku // Billings. Согласно эколого-географическому принципу подбора родительских пар в качестве источников для расширения генетического разнообразия и повышения урожайности следует привлекать в гибридизацию как материнский компонент образцы из Ростовской области и Краснодар, как отцовский компонент – зарубежные образцы.

Информация о спонсорстве. Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 23-16-20006 от 20.04.2023 г.).

Список литературы

1. Доспехов, Б. А. (1985). *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)* (5-е изд., доп. и перераб.). Москва: Агропромиздат. 351 с.
2. Кашуба, Ю. Н., Ковтуненко, А. Н., Трипутин, В. М., Шварцкопф, Т. В., & Мазепа, Н. Г. (2019). Результаты селекции озимой мягкой пшеницы в условиях южной лесостепи Западной Сибири. *Зерновое хозяйство России*, (1), 32–34. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-61-1-32-34>. EDN: <https://elibrary.ru/UWCYTB>
3. Кочешкова, А. А., Баженов, М. С., Крупин, П. Ю., Мохов, Т. Д., Меглицкая, Я. С., Архипов, А. В., Беспалова, Л. А., Пузырная, О. Ю., Агаева, Е. В., Яновский, А. С., Карлов, Г. И., & Дивашук, М. Г. (2023). Создание нового KASP-маркера на аллельное состояние гена *PARG-2A*у пшеницы. *Научный журнал КубГАУ*, (190), 1–11. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-190-005>. EDN: <https://elibrary.ru/PMTEWB>
4. Лапочкина, И. Ф., Баранова, О. А., Гайнуллин, Н. Р., Волкова, Г. В., Гладкова, Е. В., Ковалева, Е. О., & Осипова, А. В. (2018). Создание линий озимой пшеницы с несколькими генами устойчивости к *Puccinia graminis* Pers. f. *sp. tritici* для использования в селекционных программах России. *Вавилов-*

- ский журнал генетики и селекции, 22(6), 676–684. <https://doi.org/10.18699/VJ18.410>. EDN: <https://elibrary.ru/XYZCIX>
5. *Методические указания. Изучение коллекции пшеницы* (1985) / Под ред. В. Ф. Дорофеева. Ленинград: ВИР. 27 с.
 6. Мухордова, М. Е. (2021). Выявление доноров короткостебельности у образцов озимой пшеницы с помощью ДНК-маркеров и диаллельного анализа. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, (4), 73–79. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-4-73-79>. EDN: <https://elibrary.ru/KVRRVF>
 7. Никитина, Е. А., Архипов, А. В., Минькова, Я. В., Яновский, А. С., Коробкова, В. А., Самарина, М. А., Черноок, А. Г., Крупин, П. Ю., Карлов, Г. И., & Дивашук, М. Г. (2023). Конкурентная аллель-специфичная ПЦР (KASP): особенности, интерпретация результатов. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, 1(6), 79–93. <https://doi.org/10.26897/0021-342>
 8. Потоцкая, И. В., Шепелев, С. С., Чурсин, А. С., Ковальчук, А. М., & Шаманин, В. П. (2024). Идентификация генов качества зерна среди сортов озимой мягкой пшеницы. *Зерновое хозяйство России*, 16(2), 43–48. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-91-2-43-48>. EDN: <https://elibrary.ru/SXWHMH>
 9. Столповский, Ю. А., Пискунов, А. К., & Свищева, Г. Р. (2020). Геномная селекция. I. Последние тенденции и возможные пути развития. *Генетика*, 56(9), 1006–1017. <https://doi.org/10.31857/S0016675820090143>. EDN: <https://elibrary.ru/SIFGKO>
 10. Трипутин, В. М., Кашуба, Ю. Н., & Ковтуненко, А. Н. (2024). Адаптивность сортов озимой пшеницы по урожайности зерна. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, (3), 43–48. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2024-3-43-48>. EDN: <https://elibrary.ru/NVTPPQ>
 11. Шаманин, В. П., Шепелев, С. С., Пожерукова, В. Е., Потоцкая, И. В., Кочерина, Н. В., Lohwasser, U., Böhner, A., & Чесноков, Ю. В. (2018). Картирование QTL у гексаплоидной мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в условиях Западно-Сибирской равнины. *Сельскохозяйственная биология*, 53(1), 50–60. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.1.50rus>. EDN: <https://elibrary.ru/YTJOGF>
 12. Alemu, A., Batista, L., Singh, P. K., Ceplitis, A., & Chawade, A. (2023). Haplotype tagged SNPs improve genomic prediction accuracy for Fusarium head blight resistance and yield related traits in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 136, 92. <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04352-8>. EDN: <https://elibrary.ru/XRWFFM>

13. Ali, M., Zhang, Y., Rasheed, A., Wang, J., & Zhang, L. (2020). Genomic prediction for grain yield and yield-related traits in Chinese winter wheat. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*, 1342. <https://doi.org/10.3390/ijms21041342>. EDN: <https://elibrary.ru/YKNNNM>
14. Charmet, G., Tran, L.-G., Auzanneau, J., Rincint, R., & Bouchet, S. (2020). BWGS: A R package for genomic selection and its application to a wheat breeding programme. *PLoS ONE*, *15*(4), e0222733. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222733>. EDN: <https://elibrary.ru/TDFMPW>
15. Hu, W., Gao, D., Liao, S., Cheng, S., Jia, J., & Xu, W. (2023). Identification of a pleiotropic QTL cluster for Fusarium head blight resistance, spikelet compactness, grain number per spike and thousand-grain weight in common wheat. *The Crop Journal*, *11*(2), 672–677. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.09.007>. EDN: <https://elibrary.ru/ADMVFY>
16. Kaur, B., Mavi, G. S., Gill, M. S., & Saini, D. K. (2020). Utilization of KASP technology for wheat improvement. *Cereal Research Communications*, *48*, 409–421. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00057-6>. EDN: <https://elibrary.ru/GQKVZW>
17. Li, H., Zhou, Y., Xin, W., Wei, Y., Zhang, J., & Guo, L. (2019). Wheat breeding in northern China: Achievements and technical advances. *The Crop Journal*, *7*(6), 718–729. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.09.003>. EDN: <https://elibrary.ru/DNLEMF>
18. Li, T., Deng, G., Su, Y., Yang, Z., Tang, Y., Wang, J., Qiu, X., Pu, X., Li, J., Liu, Z., et al. (2021). Identification and validation of two major QTLs for spike compactness and length in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) showing pleiotropic effects on yield-related traits. *Theoretical and Applied Genetics*, *134*, 3625–3641. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03918-8>. EDN: <https://elibrary.ru/UMYBYR>
19. Lozada, D. N., & Carter, A. H. (2020). Genomic selection in winter wheat breeding using a recommender approach. *Genes*, *11*(7), 779. <https://doi.org/10.3390/genes11070779>. EDN: <https://elibrary.ru/UDBBXZ>
20. Meher, P. K., Rustgi, S., & Kumar, A. (2022). Performance of Bayesian and BLUP alphabets for genomic prediction: Analysis, comparison and results. *Heredity*, *128*, 519–530. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00539-9>. EDN: <https://elibrary.ru/OMFGUO>
21. Mourad, A. M. I., Sallam, A., Belamkar, V., Wegulo, S., Bowden, R., Jin, Y., Mahdy, E., Bakheit, B., El-Wafaa, A. A., Poland, J., & Baenziger, P. S. (2018). Genome-wide association study for identification and validation of novel SNP markers for *Sr6* stem rust resistance gene in bread wheat. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 380. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00380>

22. Nishio, M., & Satoh, M. (2015). Genomic best linear unbiased prediction method including imprinting effects for genomic evaluation. *Genetics Selection Evolution*, 47, 32. <https://doi.org/10.1186/s12711-015-0091-y>. EDN: <https://elibrary.ru/BEXBHM>
23. Potapova, N. A., Zlobin, A. S., Leonova, I. N., Salina, E. A., & Tsepilov, Y. A. (2024). The BLUP method in evaluation of breeding values of Russian spring wheat lines using micro- and macroelements in seeds. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 28(4), 456–462. <https://doi.org/10.18699/vjgb-24-51>. EDN: <https://elibrary.ru/VRSSUH>
24. Pototskaya, I. V., Shepelev, S. S., Turuspekov, Y. K., Morgounov, A. I., Chursin, A. S., Kovalchuk, A. M., Savin, T. V., & Shamanin, V. P. (2024). Breeding and genetic evaluation of international winter wheat collection under conditions of Western Siberia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 6(16), [страницы не указаны]. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-6-995>. EDN: <https://elibrary.ru/LMBBIY>
25. Resende, M. D. V., & Alves, R. S. (2020). Linear, generalized, hierarchical, Bayesian and random regression mixed models in genetics/genomics in plant breeding. *Functional Plant Breeding*, 2, 1–31. <https://doi.org/10.35418/2526-4117/v2n2a1>. EDN: <https://elibrary.ru/TVJADS>
26. Silva, C. M., Mezzomo, H. C., Alves, R. S., de Resende, M. D. V., & Nardino, M. (2023). Optimizing selection of wheat genotypes through simulated individual BLUP and modified simulated individual BLUP. *Agronomy Journal*, 115(3), 1237–1247. <https://doi.org/10.1002/agi2.21289>. EDN: <https://elibrary.ru/RGBIMJ>
27. Signorini, V. S., e Silva, C. M., Lima, G. W., Vieira, E. F. T., Mezzomo, H. C., Casagrande, C. R., & Nardino, M. (2024). Parental selection proposal strategy for recurrent selection in tropical wheat breeding. *Agronomy Journal*, 116(1), 36–50. <https://doi.org/10.1002/agi2.21505>. EDN: <https://elibrary.ru/LLHCQY>
28. Sinha, D., Maurya, A. K., Abdi, G., Majeed, M., Agarwal, R., Mukherjee, R., Ganguly, S., Aziz, R., Bhatia, M., Majgaonkar, A., et al. (2023). Integrated genomic selection for accelerating breeding programs of climate-smart cereals. *Genes*, 14, 1484. <https://doi.org/10.3390/genes14071484>. EDN: <https://elibrary.ru/FYSKPY>
29. Song, L., Wang, R., Yang, X., Zhang, A., & Liu, D. (2023). Molecular markers and their applications in marker-assisted selection (MAS) in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agriculture*, 13, 642. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030642>. EDN: <https://elibrary.ru/TMELQN>
30. Temirbekova, S. K., Kulikov, I. M., Afanasyeva, Y. V., Beloshapkina, O. O., Kalashnikova, E. A., Kirakosyan, R. N., Dokukin, P. A., Kucher, D. E., La-

- tati, M., & Rebouh, N. Y. (2021). The evaluation of winter wheat adaptation to climate change in the Central Non-Black Region of Russia: Study of the gene pool resistance of wheat from the N. I. Vavilov Institute of Plant Industry (VIR) world collection to abiotic stress factors. *Plants*, *10*, 2337. <https://doi.org/10.3390/plants10112337>. EDN: <https://elibrary.ru/DNYFJL>
31. Yang, C. J., Ladejobi, O., Mott, R., Powell, W., & Mackay, I. (2022). Analysis of historical selection in winter wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, *135*, 3005–3023. <https://doi.org/10.1007/s00122-022-04163-3>. EDN: <https://elibrary.ru/DTZVAL>

References

1. Dospikhov, B. A. (1985). *Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results)* (5th ed., revised and expanded). Moscow: Agropromizdat. 351 p.
2. Kashuba, Yu. N., Kovtunenkov, A. N., Triputin, V. M., Shvartskopf, T. V., & Mazepa, N. G. (2019). Results of winter soft wheat breeding in the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia. *Grain Farming in Russia*, (1), 32–34. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-61-1-32-34>. EDN: <https://elibrary.ru/UWCYTB>
3. Kocheshkova, A. A., Bazhenov, M. S., Krupin, P. Yu., Mokhov, T. D., Meglitskaya, Ya. S., Arkhipov, A. V., Bespalova, L. A., Puzyrnaya, O. Yu., Agaeva, E. V., Yanovsky, A. S., Karlov, G. I., & Divashuk, M. G. (2023). Development of a new KASP marker for the allelic state of the *PARG 2Ay* wheat gene. *Scientific Journal of KubSAU*, (190), 1–11. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-190-005>. EDN: <https://elibrary.ru/PMTEWB>
4. Lapochkina, I. F., Baranova, O. A., Gainullin, N. R., Volkova, G. V., Gladkova, E. V., Kovaleva, E. O., & Osipova, A. V. (2018). Development of winter wheat lines with multiple resistance genes to *Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici* for use in Russian breeding programs. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, *22*(6), 676–684. <https://doi.org/10.18699/VJ18.410>. EDN: <https://elibrary.ru/XYZCIX>
5. *Methodological guidelines. Study of the wheat collection* (1985) / Ed. by V. F. Dorofeev. Leningrad: VIR. 27 p.
6. Mukhordova, M. E. (2021). Identification of short-stature donors in winter wheat accessions using DNA markers and diallel analysis. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, (4), 73–79. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2021-4-73-79>. EDN: <https://elibrary.ru/KVRRVF>
7. Nikitina, E. A., Arkhipov, A. V., Minkova, Ya. V., Yanovsky, A. S., Korobkova, V. A., Samarina, M. A., Chernook, A. G., Krupin, P. Yu., Karlov, G. I., &

- Divashuk, M. G. (2023). Competitive allele-specific PCR (KASP): features and interpretation of results. *Proceedings of Timiryazev Agricultural Academy*, 1(6), 79–93. <https://doi.org/10.26897/0021-342>
8. Pototskaya, I. V., Shepelev, S. S., Chursin, A. S., Kovalchuk, A. M., & Shamanin, V. P. (2024). Identification of grain quality genes among winter soft wheat varieties. *Grain Farming in Russia*, 16(2), 43–48. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2024-91-2-43-48>. EDN: <https://elibrary.ru/CXWHMH>
 9. Stolpovsky, Yu. A., Piskunov, A. K., & Svishcheva, G. R. (2020). Genomic selection. I. Recent trends and possible development paths. *Genetics*, 56(9), 1006–1017. <https://doi.org/10.31857/S0016675820090143>. EDN: <https://elibrary.ru/SIFGKO>
 10. Triputin, V. M., Kashuba, Yu. N., & Kovtunenکو, A. N. (2024). Adaptability of winter wheat varieties in terms of grain yield. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, (3), 43–48. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2024-3-43-48>. EDN: <https://elibrary.ru/NVTPPQ>
 11. Shamanin, V. P., Shepelev, S. S., Pozherukova, V. E., Pototskaya, I. V., Kochevina, N. V., Lohwasser, U., Börner, A., & Chesnokov, Yu. V. (2018). QTL mapping in hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum* L.) under conditions of the West Siberian Plain. *Agricultural Biology*, 53(1), 50–60. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2018.1.50rus>. EDN: <https://elibrary.ru/YTJOGF>
 12. Alemu, A., Batista, L., Singh, P. K., Ceplitis, A., & Chawade, A. (2023). Haplotype tagged SNPs improve genomic prediction accuracy for Fusarium head blight resistance and yield related traits in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 136, 92. <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04352-8>. EDN: <https://elibrary.ru/XRWFFM>
 13. Ali, M., Zhang, Y., Rasheed, A., Wang, J., & Zhang, L. (2020). Genomic prediction for grain yield and yield-related traits in Chinese winter wheat. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 1342. <https://doi.org/10.3390/ijms21041342>. EDN: <https://elibrary.ru/YKNNNM>
 14. Charmet, G., Tran, L.-G., Auzanneau, J., Rincant, R., & Bouchet, S. (2020). BWGS: A R package for genomic selection and its application to a wheat breeding programme. *PLoS ONE*, 15(4), e0222733. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222733>. EDN: <https://elibrary.ru/TDFMPW>
 15. Hu, W., Gao, D., Liao, S., Cheng, S., Jia, J., & Xu, W. (2023). Identification of a pleiotropic QTL cluster for Fusarium head blight resistance, spikelet compactness, grain number per spike and thousand-grain weight in common wheat. *The Crop Journal*, 11(2), 672–677. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.09.007>. EDN: <https://elibrary.ru/ADMVFY>

16. Kaur, B., Mavi, G. S., Gill, M. S., & Saini, D. K. (2020). Utilization of KASP technology for wheat improvement. *Cereal Research Communications*, 48, 409–421. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00057-6>. EDN: <https://elibrary.ru/GQ-KVZW>
17. Li, H., Zhou, Y., Xin, W., Wei, Y., Zhang, J., & Guo, L. (2019). Wheat breeding in northern China: Achievements and technical advances. *The Crop Journal*, 7(6), 718–729. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.09.003>. EDN: <https://elibrary.ru/DNLEMF>
18. Li, T., Deng, G., Su, Y., Yang, Z., Tang, Y., Wang, J., Qiu, X., Pu, X., Li, J., Liu, Z., et al. (2021). Identification and validation of two major QTLs for spike compactness and length in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) showing pleiotropic effects on yield-related traits. *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 3625–3641. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03918-8>. EDN: <https://elibrary.ru/UMYBYR>
19. Lozada, D. N., & Carter, A. H. (2020). Genomic selection in winter wheat breeding using a recommender approach. *Genes*, 11(7), 779. <https://doi.org/10.3390/genes11070779>. EDN: <https://elibrary.ru/UDBBXZ>
20. Meher, P. K., Rustgi, S., & Kumar, A. (2022). Performance of Bayesian and BLUP alphabets for genomic prediction: Analysis, comparison and results. *Heredity*, 128, 519–530. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00539-9>. EDN: <https://elibrary.ru/OMFGUO>
21. Mourad, A. M. I., Sallam, A., Belamkar, V., Wegulo, S., Bowden, R., Jin, Y., Mahdy, E., Bakheit, B., El-Wafaa, A. A., Poland, J., & Baenziger, P. S. (2018). Genome-wide association study for identification and validation of novel SNP markers for *Sr6* stem rust resistance gene in bread wheat. *Frontiers in Plant Science*, 9, 380. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00380>
22. Nishio, M., & Satoh, M. (2015). Genomic best linear unbiased prediction method including imprinting effects for genomic evaluation. *Genetics Selection Evolution*, 47, 32. <https://doi.org/10.1186/s12711-015-0091-y>. EDN: <https://elibrary.ru/BEXBHM>
23. Potapova, N. A., Zlobin, A. S., Leonova, I. N., Salina, E. A., & Tsepilov, Y. A. (2024). The BLUP method in evaluation of breeding values of Russian spring wheat lines using micro- and macroelements in seeds. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 28(4), 456–462. <https://doi.org/10.18699/vjgb-24-51>. EDN: <https://elibrary.ru/VRSSUH>
24. Pototskaya, I. V., Shepelev, S. S., Turuspekov, Y. K., Morgounov, A. I., Chursin, A. S., Kovalchuk, A. M., Savin, T. V., & Shamanin, V. P. (2024). Breeding and genetic evaluation of international winter wheat collection under conditions

- of Western Siberia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 6(16), [страницы не указаны]. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-6-995>. EDN: <https://elibrary.ru/LMBBIY>
25. Resende, M. D. V., & Alves, R. S. (2020). Linear, generalized, hierarchical, Bayesian and random regression mixed models in genetics/genomics in plant breeding. *Functional Plant Breeding*, 2, 1–31. <https://doi.org/10.35418/2526-4117/v2n2a1>. EDN: <https://elibrary.ru/TVJADS>
 26. Silva, C. M., Mezzomo, H. C., Alves, R. S., de Resende, M. D. V., & Nardino, M. (2023). Optimizing selection of wheat genotypes through simulated individual BLUP and modified simulated individual BLUP. *Agronomy Journal*, 115(3), 1237–1247. <https://doi.org/10.1002/agj2.21289>. EDN: <https://elibrary.ru/RGBIMJ>
 27. Signorini, V. S., e Silva, C. M., Lima, G. W., Vieira, E. F. T., Mezzomo, H. C., Casagrande, C. R., & Nardino, M. (2024). Parental selection proposal strategy for recurrent selection in tropical wheat breeding. *Agronomy Journal*, 116(1), 36–50. <https://doi.org/10.1002/agj2.21505>. EDN: <https://elibrary.ru/LLHCQY>
 28. Sinha, D., Maurya, A. K., Abdi, G., Majeed, M., Agarwal, R., Mukherjee, R., Ganguly, S., Aziz, R., Bhatia, M., Majgaonkar, A., et al. (2023). Integrated genomic selection for accelerating breeding programs of climate-smart cereals. *Genes*, 14, 1484. <https://doi.org/10.3390/genes14071484>. EDN: <https://elibrary.ru/FYSKPY>
 29. Song, L., Wang, R., Yang, X., Zhang, A., & Liu, D. (2023). Molecular markers and their applications in marker-assisted selection (MAS) in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agriculture*, 13, 642. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030642>. EDN: <https://elibrary.ru/TMELQN>
 30. Temirbekova, S. K., Kulikov, I. M., Afanasyeva, Y. V., Beloshapkina, O. O., Kalashnikova, E. A., Kirakosyan, R. N., Dokukin, P. A., Kucher, D. E., Latati, M., & Rebouh, N. Y. (2021). The evaluation of winter wheat adaptation to climate change in the Central Non-Black Region of Russia: Study of the gene pool resistance of wheat from the N. I. Vavilov Institute of Plant Industry (VIR) world collection to abiotic stress factors. *Plants*, 10, 2337. <https://doi.org/10.3390/plants10112337>. EDN: <https://elibrary.ru/DNYFJL>
 31. Yang, C. J., Ladejobi, O., Mott, R., Powell, W., & Mackay, I. (2022). Analysis of historical selection in winter wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 135, 3005–3023. <https://doi.org/10.1007/s00122-022-04163-3>. EDN: <https://elibrary.ru/DTZVAL>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Потоцкая Инна Владимировна, д-р с.-х. наук, доцент, профессор кафедры агрономии, селекции и семеноводства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»

*Институтская пл., 1, г. Омск, 660008, Российская Федерация
iv.pototskaya@omgau.org*

Шепелев Сергей Сергеевич, канд. с.-х. наук, доцент, зав. лабораторией генетики зерновых культур

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»

*Институтская пл., 1, г. Омск, 660008, Российская Федерация
ss.shepelev@omgau.org*

Чурсин Александр Сергеевич, канд. с.-х. наук, зав. лабораторией селекции и семеноводства полевых культур

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»

*Институтская пл., 1, г. Омск, 660008, Российская Федерация
as.chursin@omgau.org*

Ковальчук Александр Максимович, аспирант

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»

*Институтская пл., 1, г. Омск, 660008, Российская Федерация
am.kovalchuk2032@omgau.org*

Шаманин Владимир Петрович, д-р с.-х. наук, профессор, профессор кафедры агрономии, селекции и семеноводства

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина»

*Институтская пл., 1, г. Омск, 660008, Российская Федерация
vr.shamanin@omgau.org*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Inna V. Pototskaya, Dr. Sc. (Agriculture), Assistant Professor, Professor of the Chair of Agronomy, Breeding, and Seed Production

*Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
iv.pototskaya@omgau.org*

SPIN-code: 9601-7910

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3574-2875>

ResearcherID: AAC-4902-2020

Scopus Author ID: 57194657673

Sergey S. Shepelev, Cand. Sc. (Agriculture), Head of the laboratory of grain crops genetics

*Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
ss.shepelev@omgau.org*

SPIN-code: 3763-3878

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4282-8725>

ResearcherID: E-4876-2018

Scopus Author ID: 55574945000

Alexandr S. Chursin, Cand. Sc. (Agriculture), Head of the laboratory of field crops breeding and seed production

*Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
as.chursin@omgau.org*

SPIN-code: 3648-1744

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6797-6145>

Scopus Author ID: 5697164100

Alexandr M. Kovalchuk, Post Graduate Student

*Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin
1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation
am.kovalchuk2032@omgau.org*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8371-7243>

Vladimir P. Shamanin, Dr. Sc. (Agriculture), Professor, Professor of the Chair
of Agronomy, Breeding, and Seed Production

Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin

1, Institutskaya Sq., Omsk, 644008, Russian Federation

vp.shamanin@omgau.org

SPIN-code: 1787-0970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4767-9957>

ResearcherID: AAC-3913-2020

Scopus Author ID: 37113094900

Поступила 30.01.2025

После рецензирования 05.03.2025

Принята 14.04.2025

Received 30.01.2025

Revised 05.03.2025

Accepted 14.04.2025