












 pismavavilov.ru

DOI 10.18699/letvjgb-2024-10-18

Оригинальное исследование

Изучение адаптивных и хозяйственно ценных признаков у нового сорта яровой мягкой пшеницы Сигма 5, созданного на основе дигаплоидной линии

И.А. Белан ¹ ✉, Л.П. Россеева ¹, Н.П. Блохина ¹, Я.В. Мухина ¹, Ю.П. Григорьев ¹, И.В. Пахотина ¹, Л.В. Мешкова ¹, А.А. Гайдар ¹, Н.В. Трубочеева ², В.К. Шумный ², Л.А. Першина ²

Аннотация: Один из путей ускорения селекционного процесса основан на использовании в качестве исходных генотипов ДГ-линий (гаплоидов с удвоенным числом хромосом). В данной работе приведена характеристика по хозяйственно ценным показателям линии ДГ 48-3, которая изучалась с 2016 по 2022 г. по ускоренной селекционной схеме, начиная с селекционного питомника второго года, затем третьего (дважды) года изучения и конкурсного сортоиспытания. В результате на основе этой линии за шесть лет был создан новый сорт яровой мягкой пшеницы Сигма 5. В 2024 г. сорт включен в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации по 9, 10 и 11-му регионам. Сорт Сигма 5 среднеспелый, ценный по качеству зерна, характеризуется высокой устойчивостью к листовостебельным заболеваниям. Устойчивость к стеблевой ржавчине обеспечивается действием гена *Sr31*, к бурой ржавчине и мучнистой росе – действием генов *Lr* и *Pm*, интрогрессированных от *Triticum dicoccoides*. Сорт обладает высокой потенциальной продуктивностью: средняя урожайность в КСИ за 2019–2021 гг. составила 5.57 т/га. В годы массового развития ржавчинных заболеваний (2019 и 2020) его урожайность была 5.76 и 6.14 т/га соответственно, что превысило показатель неустойчивого к стеблевой ржавчине сорта-стандарта Дуэт на 3.73 и 4.05 т/га. Новый сорт превосходит сорт-стандарт и по следующим показателям качества зерна: натуре зерна, массе 1000 зерен, содержанию белка и клейковины, силе муки.






Ключевые слова: пшеница мягкая яровая; ДГ-линия; селекция; сорт; устойчивость; урожайность; качество зерна.

Для цитирования: Белан И.А., Россеева Л.П., Блохина Н.П., Мухина Я.В., Григорьев Ю.П., Пахотина И.В., Мешкова Л.В., Гайдар А.А., Трубочеева Н.В., Шумный В.К., Першина Л.А. Изучение адаптивных и хозяйственно ценных признаков у нового сорта яровой мягкой пшеницы Сигма 5, созданного на основе дигаплоидной линии. *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2024;10(3):158-165. DOI 10.18699/letvjgb-2024-10-18

Финансирование: Работа поддержана бюджетными проектами ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» № FNUN-2022-0026 и ИЦиГ СО РАН № FWNR-2022-0017.

Original article


Study of adaptive and agronomically important traits in the new spring bread wheat variety Sigma 5, developed on the basis of the double haploid line


I.A. Belan ¹ ✉, L.P. Rosseeva ¹, N.P. Blokhina ¹, Y.V. Mukhina ¹, Y.P. Grigoriev ¹, I.V. Pakhotina ¹, L.V. Meshkova ¹, A.A. Gaydar ¹, N.V. Trubacheeva ², V.K. Shumny ², L.A. Pershina ²

Abstract: One of the approaches to accelerate the breeding programs is the use of doubled haploid (DH) lines as initial genotypes. This paper describes valuable agronomic traits of the DH line 48-3, which was studied from 2016 to 2022 according to an accelerated breeding scheme, starting with the breeding nursery of the second year (BN-2), then the third (BN-3) (twice) year of study and competitive variety trial (CVT 1, CVT 2, CVT 3). As a result, based on this line, a new variety of spring bread wheat, Sigma 5, was developed in six years.

¹ Омский аграрный научный центр, Омск, Россия
Omsk Agrarian Scientific Center, Omsk, Russia

² Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия
Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

 belan_skg@mail.ru

 Белан И.А., Россеева Л.П., Блохина Н.П., Мухина Я.В., Григорьев Ю.П., Пахотина И.В., Мешкова Л.В., Гайдар А.А., Трубочеева Н.В., Шумный В.К., Першина Л.А., 2024

In 2024, the variety was included in the State register of breeding achievements of the Russian Federation in regions 9, 10 and 11. The variety Sigma 5 is middle-ripening, valuable for grain quality, high resistant to leaf-stem diseases. Resistance to stem rust is due to gene *Sr31*, and resistance to leaf rust and powdery mildew is due to genes *Lr* and *Pm* introgressed from *Triticum dicoccoides*. The variety has a high potential productivity: the average yield in the CVT for 2019–2021 was 5.57 t/ha. During the years of massive development of rust diseases (2019 and 2020), its yield was 5.76 and 6.14 t/ha, respectively, which exceeded the standard variety Duet, which was not resistant to stem rust, by 3.73 and 4.05 t/ha. The new variety exceeds the standard variety in the following parameters of grain quality: grain unit, 1000-grain weight, protein and gluten content, and flour strength.

Key words: bread spring wheat; DH line; breeding; variety; resistance; yield; grain quality.

For citation: Belan I.A., Rosseeva L.P., Blokhina N.P., Mukhina Y.V., Grigoriev Y.P., Pakhotina I.V., Meshkova L.V., Gaydar A.A., Trubacheeva N.V., Shumny V.K., Pershina L.A. Study of adaptive and agronomically important traits in the new spring bread wheat variety Sigma 5, developed on the basis of the double haploid line. *Pisma v Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Letters to Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;10(3):158-165. DOI 10.18699/letvjgb-2024-10-18 (in Russian)

Funding: This work was supported by State Budgetary Projects FNUN-2022-0026 for the Omsk Agrarian Scientific Center and FWNR-2022-0017 for ICG SB RAS.

Введение

Пшеница – одна из основных культур в мире, обеспечивающих экономическую и продовольственную безопасность. Широкое распространение мягкой пшеницы обусловлено высокой кормовой и пищевой ценностью зерна, которое востребовано в Российской Федерации (Morgounov et al., 2011). По данным Росстата, в 2023 г. посевные площади яровой мягкой пшеницы в РФ составили 14.1 млн га (<https://www.agroinvestor.ru/companies/a-z/rosstat/>). Основные регионы ее возделывания – Поволжье, Урал, Западная и Восточная Сибирь (Амунова и др., 2021). В Омской области под яровой мягкой пшеницей в 2021 г. было занято 1.29 млн га. При этом более 60 % от общих посевов яровой мягкой пшеницы пришлось на сорта селекции ФГБНУ «Омский АНЦ» (Белан и др., 2021).

Создаваемые сорта при высокой продуктивности и высоком качестве зерна должны характеризоваться комплексной устойчивостью к абиотическим и биотическим стрессам, что особенно актуально в контрастных климатических условиях Омской области и при сильном распространении в регионе листостебельных грибных патогенов, таких как мучнистая роса (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*), бурая ржавчина (*Puccinia triticina* Eriks.), стеблевая ржавчина (*Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici*) (Россева и др., 2017). Более того, изменение климата, появление у патогенов новых вирулентных биотипов и рас требуют проведения опережающей селекции при получении новых сортов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям выращивания (Ahmar et al., 2020).

Выведение нового сорта – это, как правило, длительный, затратный и трудоемкий процесс, занимающий в селекции мягкой пшеницы от 12 до 15 лет (Barkley, Chumley, 2012; Белан и др., 2021). На сегодняшний день актуальным является ускоренное создание новых сортов с использованием традиционных методов селекции и современных молекулярно-генетических технологий (Ahmar et al., 2020), в том числе и в связи с импортозамещением в РФ зарубежных сортов сельскохозяйственных культур (Нардин, Нардина, 2023). При традиционных методах создания исходных линий мягкой пшеницы для селекции, у которых стабилизировано проявление целевых признаков, необходимо получить от шести до восьми самоопыленных поколений, отбирая зерна или колосья от элитных растений (Barkley, Chumley, 2012).

Для ускорения этого процесса в ряде селекционных программ используют гомозиготные ДГ-линии (двойные гаплоиды, т. е. гаплоиды с удвоенным числом хромосом), полученные в результате культивирования пыльников, изолированных микроспор или гибридизации пшеницы с видами-гаплопродюсерами (Barkley, Chumley, 2012; Srivastava, Singh, 2018; Slama-Ayed et al., 2019). ДГ-линии возможно получить в течение одного года. Поскольку они гомозиготные, а действие рецессивных генов у них проявляется наряду с доминантными, то ДГ-линии могут быть быстро проанализированы в повторных испытаниях. Такой подход значительно сокращает продолжительность отборов и, соответственно, время создания новых сортов (Srivastava, Singh, 2018).

Гены, ответственные за устойчивость к заболеваниям и вредителям, со временем утрачивают свою эффективность, поэтому в геном пшеницы следует вводить новые гены устойчивости или их сочетания (Hao et al., 2020). Получение гомозиготных ДГ-линий – это способ фиксации в одном геноме сочетания серии целевых генов, перенесенных от разных родителей (пирамидирование генов) (Servin et al., 2004; Pershina et al., 2020).

Кроме того, важное направление использования ДГ-линий в селекции – это включение их в скрещивания с другими линиями при получении нового селекционного материала (Belan et al., 2010; Першина и др., 2018). В предыдущих работах нами показана эффективность такого подхода на примере создания сортов яровой мягкой пшеницы Сигма (Белан и др., 2012) и Уралосибирская 2 (Белан и др., 2018).

В 2022 г., после шести лет селекционной работы в лаборатории яровой мягкой пшеницы ФГБНУ «Омский АНЦ» с использованием исходного материала, полученного в лаборатории хромосомной инженерии злаков ИЦиГ СО РАН, одна из дигаплоидных линий, ДГ 48-3, была передана на Госсортоиспытание в качестве сорта яровой мягкой пшеницы Сигма 5. В 2024 г. сорт Сигма 5 был включен в Госреестр по Уральскому (9), Западно-Сибирскому (10) и Восточно-Сибирскому (11) регионам (<https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyu-reestr-seleksionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/sigma-5-pshenitsa-myagkaya-yarovaya/>). В настоящей работе приведены основные данные, полученные в процессе селекционной проработки линии ДГ 48-3 и характеризующие созданный на ее основе новый сорт яровой мягкой

пшеницы Сигма 5 по адаптивным и хозяйственно ценным признакам.

Материал и методы

Происхождение сорта Сигма 5 (линии ДГ 48-3). Линия ДГ 48-3 была сформирована от одного из андрогенных 42-хромосомных растений, регенерировавших в культуре пыльников гибридной комбинации (Л-311/00-22-4 // Л.ХI / 2870 *T. dicoccoides* 1325-1330) поколения F₃. Особенности культивирования пыльников, развития андрогенных растений, формирование и отбор ДГ-линий для селекции описаны ранее (Persina et al., 2020). Материнский генотип гибридной комбинации – линия Л-311/00-22-4 – является потомком аллоплазматической рекомбинантной ДГ-линии (*H. vulgare*)-*T. aestivum* и несет пшенично-ржаную транслокацию 1RS.1BL (Першина и др., 2018) с генами *Lr26/Sr31/Yr9/Pm8*, контролирующими устойчивость к грибным патогенам (Singh et al., 1990). Эта транслокация присутствует и у линии ДГ 48-3 (Persina et al., 2020). Ранее на основе линии Л-311/00-22-4 был создан сорт яровой мягкой пшеницы Уралосибирская 2 (Белан и др., 2018; Першина и др., 2018).

Отцовская форма гибридной комбинации (линия Л.ХI / 2870 *T. dicoccoides* 1325-1330 2870) получена, охарактеризована и предоставлена для нашей работы С.Н. Сибикеевым с коллегами (Дружин и др., 2012). По данным авторов цитированной статьи, эта линия отличается высокой устойчивостью к патогенам листовой ржавчины и мучнистой росы благодаря действию генов *Lr* и *Pm*, интрогрессированных в геном мягкой пшеницы от *T. dicoccoides*. Ранее выполненный анализ выявил комплексную устойчивость ДГ-линий, полученных на основе растений гибридной комбинации (Л-311/00-22-4 // Л.ХI / 2870 *T. dicoccoides* 1325-1330), к патогенам мучнистой росы, бурой ржавчины и стеблевой ржавчины (Persina et al., 2020).

В зависимости от региона выращивания в качестве контроля при изучении сорта Сигма 5 (ДГ 48-3) использовали среднеспелый сорт-стандарт Дуэт, носитель гена устойчивости к бурой ржавчине *Lr9* (Гулятьева и др., 2022), или среднеранний сорт Памяти Азиева.

Условия полевых испытаний. Селекционная линия ДГ 48-3, наряду с девятью другими ДГ-линиями этой же гибридной комбинации, изучалась с 2016 по 2022 г. по ускоренной селекционной схеме. Согласно этой схеме, испытания начали проводить в селекционных питомниках второго (СП-2) и третьего (СП-3) (дважды) лет изучения, а также конкурсного сортоиспытания (КСИ 1, КСИ 2, КСИ 3). В СП-2 площадь делянок 3 м², в СП-3 – 10 м². Полевые исследования выполнены на полевом участке лаборатории селекции яровой мягкой пшеницы ФГБНУ «Омский АНЦ» в зоне южной лесостепи Омской области. Посев проводили сеялкой ССФК-7 М, уборку – с использованием малогабаритного комбайна «ХЕГЕ-125». Почва опытного участка лугово-черноземная, среднесуглистая, среднесуглистая с тяжелосуглистым гранулометрическим составом. Параллельно конкурсное сортоиспытание по двум предшественникам (пару и после зерновых) линии ДГ 48-3 в 2019–2021 гг. проводили в отделе семеноводства ФГБНУ «Омский АНЦ» (вблизи от поля лаборатории селекции яровой мягкой

пшеницы). Кроме того, дополнительно на опытном участке отдела северного земледелия ФГБНУ «Омский АНЦ» (населенный пункт Тара в подтаежной зоне Омской области) в 2021 и 2022 г. осуществлялись экологические испытания ДГ-линии 48-3. Для этого региона характерно теплое непродолжительное лето с резкими колебаниями температуры в течение суток. Почва опытного участка серая лесная, с тяжелосуглистым гранулометрическим составом.

Климат Омской области отличается сильной контрастностью и резкими колебаниями метеорологических факторов. В норме в Омске гидротермический коэффициент (ГТК), рассчитанный по Селянину, составляет 1.13, в Таре – 1.46. По метеорологическим условиям 2019-й г. (начало испытаний в КСИ) в Омской области характеризовался как средnezасушливый (ГТК в мае–августе составил 0.99); 2020-й – как засушливый (ГТК = 0.58); в 2021 г. отмечена сильная засуха (ГТК = 0.55), а 2022-й был очень контрастным по месяцам: от сильной засухи в мае (ГТК = 0.45) до избыточного увлажнения в июле (ГТК = 1.90), но в среднем недостаточным по увлажнению (ГТК = 1.00 в мае–августе).

В течение пяти лет селекционных испытаний, с 2016 по 2020, в Омской области наблюдалось эпифитотийное развитие грибных заболеваний, чему способствовали обильные росы (Россеева и др., 2017). В 2021 г. погодные условия с июля по первую декаду августа характеризовались высокой температурой и недобором осадков, что оказалось неблагоприятным для развития бурой и стеблевой ржавчины. Однако погодные условия июня были благоприятны для развития патогена мучнистой росы. Восприимчивые сорта яровой мягкой пшеницы были поражены на 70–80 % (Россеева и др., 2017). Таким образом, в 2021 г. (последний год селекционных испытаний линии ДГ 48-3) была возможность оценить изучаемые генотипы на устойчивость как к патогенам мучнистой росы, так и к сильной засухе.

Методы изучения хозяйственно ценных признаков сорта. Наблюдения и учеты по всем питомникам выполнялись в соответствии с «Методикой государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур» (1985). Оценены следующие признаки: вегетационный период, высота растений, урожайность, элементы продуктивности (продуктивная кустистость, число зерен в колосе, масса зерна главного колоса, масса 1000 зерен). Статистическую обработку данных проводили по методике (Доспехов, 2011) с применением пакета статистических программ (MS Excel). Качество зерна оценивали по показателям: натура (ГОСТ 10840-2017), содержание белка и клейковины в зерне (ГОСТ Р 54478-2011) и хлебопекарное качество (объем, внешний вид хлеба и структура мякиша), используя методики и классификационные нормы Государственной комиссии по испытанию сельскохозяйственных растений. Устойчивость к грибным патогенам изучали в полевых условиях на естественном и на искусственном инфекционном фоне. За основу брали международную шкалу для оценки устойчивости к патогенам мучнистой росы (Asad et al., 2014), бурой и стеблевой ржавчинам (Peterson et al., 1948). Использована следующая оценка устойчивости: 0 – иммунный тип; степень поражения: 1–10 % – устойчивый (R); 11–30 % – умеренно устойчивый (MR); 31–60 % – умеренно восприимчивый (MS);

Таблица 1. Поражение линии ДГ 48-3 (сорта Сигма 5) листостебельными патогенами на естественном и искусственном фоне**Table 1.** Damage of DH line 48-3 (var. Sigma 5) by leaf-stem pathogens on natural and artificial backgrounds

Год	Питомник	Поражение линии ДГ 48-3, %					
		мучнистой росой		бурой ржавчиной		стеблевой ржавчиной	
		Дуэт	ДГ 48-3	Дуэт	ДГ 48-3	Дуэт	ДГ 48-3
Естественный фон							
2016	СП-2	MS	0	0	0	HS	0
2017	СП-3	MS	0	0	0	HS	R
2018	СП-3	MR	0	0	0	HS	0
2019	КСИ 1	MR	R	0	0	HS	0
2020	КСИ 2	MS	0	0	0	HS	R
2021	КСИ 3	MS	0	Нет	Нет	Нет	Нет
Инфекционный фон							
2019	КСИ 1	MS	MR	R	0	HS	0
2020	КСИ 2	MS	MR	R	0	HS	R
2021	КСИ 3	MS	MR	R	R	HS	R

Примечание. HS – сильно восприимчивый; MS – умеренно восприимчивый; MR – умеренно устойчивый; R – устойчивый.

61–80 % – восприимчивый (S); 81 % и выше – сильно восприимчивый (HS).

Результаты и обсуждение

Из девяти ДГ-линий, прошедших испытания в селекционных питомниках, перспективными для дальнейшей селекции оказались две линии. Работа с одной из них продолжается, а с другой – ДГ 48-3, завершена созданием сорта. Результаты изучения устойчивости линии ДГ 48-3 к листостебельным патогенам на естественном и инфекционном поле представлены в табл. 1.

В период эпифитотийного развития грибных заболеваний с 2016 по 2020 г. линия ДГ 48-3 в полевых условиях на естественном фоне проявила высокую устойчивость к патогену стеблевой ржавчины. Этот результат подтвержден и при тестировании на инфекционном фоне в 2019–2021 гг. Сорт-стандарт Дуэт, напротив, показал сильную восприимчивость к возбудителю стеблевой ржавчины во все годы испытаний и на естественном, и на инфекционном фоне. Высокую устойчивость линии ДГ 48-3 к стеблевой ржавчине можно объяснить действием гена *Sr31*, локализованного в хромосоме ржи 1R, присутствующей у этой линии в составе пшенично-ржаной транслокации 1RS.1BL (Pershina et al., 2020). Это объяснение согласуется с фактом сохранения эффективности гена *Sr31* на территории РФ против всех российских популяций возбудителя стеблевой ржавчины (Баранова и др., 2019, 2023).

Линию ДГ 48-3 отличает умеренная резистентность к мучнистой росе и высокая – к бурой ржавчине (см. табл. 1). К мучнистой росе на естественном фоне линия ДГ 48-3 практически во все годы проявила иммунитет, а на инфекционном – умеренную устойчивость. Сорт-стандарт Дуэт только в 2018 и 2019 гг. характеризовался умеренной устойчивостью на естественном фоне, а в остальные годы исследований был средневосприимчивым к патогену мучнистой росы как на естественном, так и на инфекционном фоне. Линия ДГ 48-3 является носителем двух генов устойчиво-

сти к мучнистой росе: *Pm8*, локализованного в коротком плече хромосомы ржи 1R, и гена, интрогрессированного от *T. dicoccoides* (Дружин и др., 2012). Учитывая, что ген *Pm8* утратил свою эффективность еще в 90-х гг. прошлого столетия (Hsam, Zeller, 2002), следует считать, что резистентность линии ДГ 48-3 к мучнистой росе контролируется геном, переданным с генетическим материалом от *T. dicoccoides*.

Что касается устойчивости к бурой ржавчине, то во все годы испытаний линия ДГ 48-3, как и сорт-стандарт Дуэт, проявила высокую устойчивость к популяциям этого патогена. У сорта Дуэт устойчивость определяется действием гена *Lr9*, носителем которого он является (Гультьева и др., 2022). У линии ДГ 48-3 присутствуют два гена устойчивости к бурой ржавчине: *Lr26*, локализованный в хромосоме ржи 1RS, который относят к малоэффективным (Гультьева, Шайдаюк, 2021), и высокоэффективный доминантный ген, интрогрессированный от *T. dicoccoides* (Дружин и др., 2012). Этот ген, по-видимому, и определяет высокую устойчивость линии ДГ 48-3 к бурой ржавчине.

В процессе селекционной работы было отмечено, что признаки, характерные для линии ДГ 48-3, включая устойчивость к листостебельным патогенам, во всех поколениях проявлялись стабильно без расщепления. В табл. 2 приводятся данные, полученные при изучении линии ДГ 48-3 в питомнике КСИ лаборатории селекции яровой мягкой пшеницы в 2019–2021 гг.

По вегетационному периоду линия ДГ 48-3 во все годы изучения достоверно не отличалась от среднеспелого сорта-стандарта Дуэт, что позволяет отнести ее к группе среднеспелых сортов. Продолжительность вегетационного периода у этой линии составляла от 75 сут (2020 г.) до 90 сут (2019). По высоте растений во все годы испытаний линия ДГ 48-3 достоверно превышала стандарт. Среднее значение высоты растений у ДГ 48-3 варьировало от 93 до 133 см, а у сорта-стандарта Дуэт – от 82 до 118 см.

Анализ основных признаков, определяющих продуктивность растений, показал, что по длине колоса, числу зерен

Таблица 2. Характеристика линии ДГ 48-3 (сорта Сигма 5) по фенологии, элементам продуктивности и качеству зерна, КСИ 2019–2021 гг.**Table 2.** Characteristics of the DH 48-3 line (var. Sigma 5) in terms of phenology, productivity elements and grain quality, CVT 2019–2021

Показатель	2019			2020			2021		
	Дуэт	ДГ 48-3	НСР _{0,05}	Дуэт	ДГ 48-3	НСР _{0,05}	Дуэт	ДГ 48-3	НСР _{0,05}
Урожайность, т/га	2.03	5.76*	0.1	2.09	6.14*	0.27	4.36	4.86	0.43
Вегетационный период, сут	89	90	0.9	75	75	–	82	79	1.7
Высота растений, см	118	133*	4.3	109	123*	3.1	82	93.0*	8.4
Продуктивная кустистость, шт.	2.0	3.1*	0.54	2.4	3.1	0.66	2.15	1.93	0.32
Длина колоса, см	9.4	12.0*	0.62	7.4	9.8*	0.29	7.8	9.7*	0.83
Число зерен в колосе, шт.	27.8	43.9*	8.4	27.6	39.0*	4.7	30.5	37.3*	5.3
Масса зерна главного колоса, г	0.6	1.7*	0.4	0.5	1.8*	0.20	1.1	1.5*	0.15
Масса 1000 зерен, г	19.4	37.1*	4.6	19.5	41.9*	2.0	34.6	37.0*	1.7
Натура, г/л	595	758*	21.3	642	760*	11.1	758	732	9.3
Белок, %	11.7	14.4*	0.49	14.4	16.1*	0.13	16.7	18.1*	0.45
Клейковина, %	26.6	31.5*	0.99	27.7	32*	0.19	34.9	34.2	1.1
Сила муки, е. а.	313	473*	40.7	251	446*	35.4	293	419*	42.9
Объем хлеба, см ³	1120*	920	31.1	980	1030	67.1	1120	920	60.9

* $p < 0.05$.

в колосе, массе зерна с главного колоса и массе 1000 зерен линия ДГ 48-3 превышала соответствующие значения у сорта-стандарта Дуэт, независимо от года выращивания в питомнике КСИ. Так, средняя длина колоса у линии ДГ 48-3 варьировала от 9.7 см в 2021 г. до 12.0 см в 2019 г., а у стандарта – от 7.4 см (2020) до 9.4 см (2019). Минимальное среднее число зерен в колосе (37.3 шт.) у линии ДГ 48-3 было в 2021 г., а максимальное (43.9 шт.) – в 2019 г. У сорта-стандарта значение этого показателя изменялось от 27.6 (2020) до 30.5 шт. (2021).

Обращает на себя внимание факт, что в годы массового развития ржавчинных заболеваний (2019 и 2000) средние значения массы зерна главного колоса и массы 1000 зерен у сорта-стандарта Дуэт были почти в два раза ниже по сравнению с 2021 г., когда проявлялась только мучнистая роса (см. табл. 2). Так, минимальное среднее значение массы зерна главного колоса у сорта-стандарта Дуэт составило 0.6 г (2019 г.), а максимальное – 1.1 г (2021); минимальное среднее значение массы 1000 зерен – 19.4 г (2019), максимальное – 34.6 г (2021). Учитывая, что сорт Дуэт сильно поражается стеблевой ржавчиной, мы можем сделать вывод о сильном негативном влиянии этого патогена на развитие зерновок у восприимчивых генотипов пшеницы. Что касается устойчивой к стеблевой ржавчине линии ДГ 48-3, то независимо от времени испытаний средние значения показателей массы зерна главного колоса и массы 1000 зерен были на высоком уровне: 1.5–1.8 г и 37.0–41.9 г соответственно. Продуктивная кустистость у линии ДГ 48-3 была достоверно выше, чем у стандарта, в 2019 г., оставаясь на уровне стандарта в 2020 и 2021 гг. Значение показателя натуры у линии ДГ 48-3 было на уровне стандарта в 2021 г. и достоверно превышало его в 2019 и 2020 гг.

По такому показателю качества, как содержание белка в зерне, линия ДГ 48-3 превосходила стандарт во все годы КСИ (см. табл. 2). Средние значения у линии ДГ 48-3 варьировали от 14.4 % (2019 г.) до 18.1 % (2021), у стандарта – от 11.7 % (2019) до 16.7 % (2021). По содержанию клейковины линия ДГ 48-3 превышала стандарт в 2019 и 2020 гг., оставаясь на одном уровне по значению этого показателя с сортом-стандартом в 2021 г. Значение показателя силы муки во все годы наблюдения у линии ДГ 48-3 было достоверно выше, чем у стандарта, а значение показателя объема хлеба – на уровне стандарта в 2020 и 2021 гг., но ниже, чем у стандарта, в 2019 г. В целом показатели качества у линии ДГ 48-3 выше или на уровне ценных пшениц.

В годы испытаний, когда наблюдалось эпифитотийное развитие грибных заболеваний (2019 и 2020), устойчивая линия ДГ 48-3 значительно превосходила сорт-стандарт Дуэт по урожайности (см. табл. 2). Так, в 2019 г. урожайность устойчивой к листовостебельным патогенам линии ДГ 48-3 составила 5.76 т/га, а в 2020 – 6.14 т/га, что почти в три раза выше, чем у сорта-стандарта Дуэт (2.03 и 2.09 т/га соответственно). В 2021 г., когда отмечалось только проявление мучнистой росы, урожайность линии ДГ 48-3 была на уровне стандарта. Из приведенных данных на примере сорта-стандарта Дуэт следует, какой сильный урон урожайности (>65 %) наносит стеблевая ржавчина. Именно устойчивость к этому заболеванию обеспечивает высокую урожайность линии ДГ 48-3 (сорта Сигма 5). Данные, полученные при изучении линии ДГ 48-3 (сорта Сигма 5), выращенной в питомнике КСИ в отделе семеноводства по двум разным предшественникам, представлены в табл. 3.

По паровому предшественнику линия ДГ 48-3 в среднем за четыре года испытаний превышала стандарт на 2.27 т/га,

Таблица 3. Урожайность (т/га) линии ДГ 48-3 (сорта Сигма 5) в зависимости от фона посева, КСИ 2019–2022 гг.
Table 3. Productivity (t/ha) of the DH 48-3 line (var. Sigma 5) depending on the sowing background, CVT 2019–2022

Год	Посев по пару			Посев после зерновых		
	Дуэт (St.)	ДГ 48-3	HCP ₀₅	Дуэт (St.)	ДГ 48-3	HCP ₀₅
2019	3.13	6.48*	0.26	2.93	3.82*	0.17
2020	2.00	6.02*	0.24	2.92	6.21*	0.26
2021	3.28	4.55*	0.20	2.29	2.78*	0.17
2022	3.52	3.81*	0.28	1.99	2.09	0.15
Среднее	2.98	5.25	0.16	2.53	3.76	0.22

* $p < 0.05$.**Таблица 4.** Продолжительность вегетационного периода и урожайность линии ДГ 48-3 (сорта Сигма 5)
Table 4. Duration of the growing season and yield of the DH 48-3 line (var. Sigma 5)

Показатель	2021 г.			2022 г.		
	Памяти Азиева	ДГ 48-3	HCP _{0,05}	Памяти Азиева	ДГ 48-3	HCP _{0,05}
Вегетационный период, сут	79	80	1.5	90	91	2
Урожайность, т/га	1.75	3.94*	0.24	4.18	5.29*	0.33

Примечание. Испытания проводились в населенном пункте Тара, питомник КСИ, посев по пару, 2021–2022 гг.

* $p < 0.05$.

при посеве после зерновых – на 1.23 т/га. В эпифитотийные годы листостебельных заболеваний (2019 и 2020) урожайность линии ДГ 48-3 была значительно выше по сравнению с сортом-стандартом Дуэт: на 3.35 т/га в 2019 г. и на 4.02 т/га в 2020 г. При выращивании в менее благоприятных условиях – после зерновых, урожайность линии ДГ 48-3 превышала сорт-стандарт на 0.89 т/га в 2019 и 3.29 т/га в 2020 г.

В засушливые годы (2021 и 2022) урожайность линии ДГ 48-3 по паровому предшественнику в среднем превысила стандарт на 0.78 т/га. При посеве после зерновых в 2021 г. урожайность линии ДГ 48-3 достоверно превышала стандарт на 0.49 т/га, а в 2022 г. была на уровне сорта-стандарта Дуэт.

Недостаточная экологическая устойчивость сорта часто бывает причиной увеличения разрыва между потенциальной и реальной урожайностью. Испытание сортов в разных экологических условиях позволяет подробнее изучить стабильность поведения генотипа сорта, его норму реакции. В табл. 4 приведены данные, полученные при экологических испытаниях линии ДГ 48-3 (сорта Сигма 5) в подтаежной зоне Омской области. В этих условиях линия ДГ 48-3 по вегетационному периоду (80–91 сут) была на уровне среднераннего сорта-стандарта Памяти Азиева (79–90 сут). Значение урожайности в оба года испытаний у линии ДГ 48-3 было достоверно выше по сравнению с сортом-стандартом, в среднем превышая его на 1.65 т/га.

Таким образом, установлено, что линия ДГ 48-3 (сорт яровой мягкой пшеницы Сигма 5) адаптирована к агроклиматическим условиям Омской области.

Заключение

В селекционной работе с гомозиготной дигаллоидной линией ДГ 48-3 отсутствовала необходимость проведения предварительных отборов для проявления однородности

целевых признаков у растений. На всех этапах испытаний все признаки сохранялись стабильно без расщепления. Это касается и высокой устойчивости к листостебельным патогенам, которая определяется влиянием эффективных генов устойчивости, зафиксированных в геноме дигаллоидной линии. Селекционные испытания, выполненные по ускоренной схеме, позволили за шесть лет на основе линии ДГ 48-3 создать высокопродуктивный сорт яровой мягкой пшеницы, который под названием Сигма 5 в 2021 г. был передан на Государственное сортоиспытание, а в 2024 г. включен в Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации по трем регионам (9, 10 и 11). Название сорта Сигма 5 отражает его происхождение: объединение (Сигма) в гомозиготном состоянии (1) генотипа мягкой пшеницы (2) с цитоплазмой, имеющей происхождение от культурного ячменя (3), наличием пшенично-ржаной транслокации (4) и интрогрессий от *T. dicoccoides* (5).

Патентообладатели сорта: ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» (ФГБНУ «Омский АНЦ») и ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук» (ИЦиГ СО РАН).

Авторы сорта: И.А. Белан, Л.П. Росеева, Н.П. Блохина, Я.В. Мухина, Ю.П. Григорьев, И.В. Пахотина, Л.В. Мешкова, А.А. Гайдар, Л.А. Першина, Н.В. Трубочеева, В.К. Шумный.

Список литературы / References

Амунова О.С., Волкова Л.В., Зуев Е.В., Харина А.В. Исходный материал для селекции мягкой яровой пшеницы в условиях Кировской области. *Аграр. наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(5):661-675. DOI 10.30766/2072-9081.2021.22.5.661-675
[Akhmanova O.S., Volkova L.V., Zuev E.V., Kharina A.V. Source material for breeding bread spring wheat in the Kirov region. *Agrarnaya Nauka Euro-Severo-Vostoka = Agricultural Science of the Euro-North-East*. 2021;22(5):661-675. DOI 10.30766/2072-9081.2021.22.5.661-675 (in Russian)]

- Баранова О.А., Сибикеев С.Н., Дружин А.Е. Молекулярная идентификация генов устойчивости к стеблевой ржавчине в интрогрессивных линиях яровой мягкой пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(3):296-303. DOI 10.18699/VJ19.494
[Baranova O.A., Sibikeev S.N., Druzhin A.E. Molecular identification of the stem rust resistance genes in the introgression lines of spring bread wheat. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(3):296-303. DOI 10.18699/VJ19.494 (in Russian)]
- Баранова О.А., Сибикеев С.Н., Конькова Э.А. Анализ устойчивости к стеблевой ржавчине и идентификация *Sr*-генов у интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы. *Труды по прикл. ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(1):177-186. DOI 10.30901/2227-8834-2023-1-177-186
[Baranova O.A., Sibikeev S.N., Konkova E.A. Analysis of resistance to stem rust and identification of *Sr*-genes in introgressive lines of spring bread wheat. *Trudy po Prikladnoy Botanike, Genetike i Seleksii = Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):177-186. DOI 10.30901/2227-8834-2023-1-177-186 (in Russian)]
- Белан И.А., Блохина Н.П., Валуева Л.Г., Девяткина Э.П., Зыкин В.А., Игнатъева Е.Ю., Ложникова Л.Ф., Мешкова Л.В., Моргунов А.И., Пахотина И.В., Першина Л.А., Поползухин П.В., Россеев В.М., Россеева Л.П., Шепелев С.С., Шумный В.К. Пшеница яровая яровая Сигма. Патент на селекционное достижение № 7950. 2012 г.
[Belan I.A., Blokhina N.P., Valueva L.G., Devyatkina E.P., Zykin V.A., Ignatieva E.Yu., Lozhnikova L.F., Meshkova L.V., Morgunov A.I., Pakhotina I.V., Pershina L.A., Popoluzhkin P.V., Rosseev V.M., Rosseeva L.P., Shepelev S.S., Shumny V.K. Bread Spring Wheat Sigma. Patent for a breeding achievement No. 7950. 2012 (in Russian)]
- Белан И.А., Белова Л.И., Девяткина Э.П., Зыкин В.А., Иванов В.В., Исламов М.Н., Кетов А.А., Ложникова Л.Ф., Мешкова Л.В., Немченко В.В., Пахотина И.В., Першина Л.А., Россеев В.М., Россеева Л.П. Пшеница мягкая яровая Уралосибирская 2. Патент на селекционное достижение № 9568. 2018 г.
[Belan I.A., Belova L.I., Devyatkina E.P., Zykin V.A., Ivanov V.V., Islamov M.N., Ketov A.A., Lozhnikova L.F., Meshkova L.V., Nemchenko V.V., Pakhotina I.V., Pershina L.A., Rosseev V.M., Rosseeva L.P. Bread Spring Wheat Uralosibirskaya 2. Patent for breeding achievement No. 9568. 2018 (in Russian)]
- Белан И.А., Россеева Л.П., Блохина Н.П., Григорьев Ю.П., Мухин Я.В., Трубочеева Н.В., Першина Л.А. Ресурсный потенциал сортов пшеницы мягкой яровой для условий Западной Сибири и Омской области (аналитический обзор). *Аграр. наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(4):449-465. DOI 10.30766/2072-9081.2021.22.4.449-465
[Belan I.A., Rosseeva L.P., Blokhina N.P., Grigoriev Yu.P., Mukhin Ya.V., Trubacheeva N.V., Pershina L.A. The resource potential of bread spring wheat varieties for the conditions of Western Siberia and the Omsk region (analytical review). *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science of the Euro-North-East*. 2021;22(4):449-465. DOI 10.30766/2072-9081.2021.22.4.449-465 (in Russian)]
- Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л. Идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине у новых российских сортов мягкой пшеницы. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(2):15-27. DOI 10.30901/2658-6266-2021-2-02
[Gultyayeva E.I., Shaydayuk E.L. Identification of leaf rust resistance genes in the new Russian varieties of common wheat. *Biotehnologiya i Seleksiya Rastenij = Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(2):15-27. DOI 10.30901/2658-6266-2021-2-02 (in Russian)]
- Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Веселова В.В., Смирнова Р.Е., Зуев Е.В., Хакимова А.Г., Митрофанова О.П. Разнообразие новых российских сортов мягкой пшеницы по генам устойчивости к бурой ржавчине. *Труды по прикл. ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(4):208-218. DOI 10.30901/2227-8834-2022-4-208-218
[Gultyayeva E.I., Shaidayuk E.L., Veselova V.V., Smirnova R.E., Zuev E.V., Khakimova A.G., Mitrofanova O.P. Diversity of new Russian bread wheat cultivars according to leaf rust resistance genes. *Trudy po Prikladnoy Botanike, Genetike i Seleksii = Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(4):208-218. DOI 10.30901/2227-8834-2022-4-208-218 (in Russian)]
- Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011
[Dospikhov B.A. Methodology of Field Experience (with the basics of statistical processing of research results). Moscow: Alliance Publ., 2011 (in Russian)]
- Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Крупнов В.А. Увеличение генетического разнообразия саратовских пшениц методами интрогрессивной селекции как развитие идей Н.И. Вавилова. *Вестн. Саратов. госагроуниверситета*. 2012;10:33-38
[Druzhin A.E., Sibikeev S.N., Krupnov V.A. The increased genetic diversity of Saratov bread wheat using introgressive breeding in the development of N.I. Vavilov ideas. *Vestnik Saratovskogo Gosagrouniversiteta = Bulletin of the Saratov State Agrarian University*. 2012;10:33-38 (in Russian)]
- Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 1. Общая часть. М., 1985
[Methodology for State Variety Testing of Agricultural Crops. Iss. 1. General part. Moscow, 1985 (in Russian)]
- Нардин Д.С., Нардина С.А. Анализ использования сортов российской и зарубежной селекции при производстве яровой мягкой пшеницы на территории Омской области. *Экономика, предпринимательство и право*. 2023;13(12):5817-5830. DOI 10.18334/epp.13.12.119958
[Nardin D.S., Nardina S.A. Analysis of the use of varieties of Russian and foreign breeding in the production of spring soft wheat in the Omsk region. *Ekonomika, Predprinimatel'stvo i Pravo = Economics, Entrepreneurship and Law*. 2023;13(12):5817-5830. DOI 10.18334/epp.13.12.119958 (in Russian)]
- Першина Л.А., Белова Л.И., Трубочеева Н.В., Осадчая Т.С., Шумный В.К., Белан И.А., Россеева Л.П., Немченко В.В., Абакумов С.Н. Аллоплазматические рекомбинантные линии (*H. vulgare*)-*T. aestivum* с транслокацией 1RS.1BL: исходные генотипы для создания сортов яровой мягкой пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(5):544-552. DOI 10.18699/VJ18.393
[Pershina L.A., Belova L.I., Trubacheeva N.V., Osadchaya T.S., Shumny V.K., Belan I.A., Rosseeva L.P., Nemchenko V.V., Abakumov S.N. Alloplasmic recombinant lines (*H. vulgare*)-*T. aestivum* with 1RS.1BL translocation: initial genotypes for production of common wheat varieties. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(5):544-552. DOI 10.18699/VJ18.393]
- Россеева Л.П., Белан И.А., Мешкова Л.В., Блохина Н.П., Ложникова Л.Ф., Осадчая Т.С., Трубочеева Н.В., Першина Л.А. Селекция на устойчивость к стеблевой ржавчине яровой мягкой пшеницы в Западной Сибири. *Вестн. Алт. гос. аграр. ун-та*. 2017;7(153):5-12
[Rosseeva L.P., Belan I.A., Meshkova L.V., Blokhina N.P., Lozhnikova L.F., Osadchaya T.S., Trubacheeva N.V., Pershina L.A. Breeding for resistance to stem rust of spring soft wheat in Western Siberia. *Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2017;7(153):5-12 (in Russian)]
- Ahmar S., Gill R.A., Jung K.H., Faheem A., Qasim M.U., Mubeen M., Zhou W. Conventional and molecular techniques from simple breeding to speed breeding in crop plants: recent advances and future outlook. *Int. J. Mol. Sci.* 2020;21(7):2590. DOI 10.3390/ijms21072590
- Asad S., Fayyaz M., Munir A., Rattu A.U. Screening of wheat commercial varieties for resistance against powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*) at Kaghan Valley, Pakistan. *Pak. J. Phytopathol.* 2014;26:7-13
- Barkley A., Chumley F.G. A doubled haploid laboratory for Kansas wheat breeding: an economic analysis of biotechnology adoption. *Int. Food Agribus. Manag. Rev.* 2012;15(2):99-120
- Belan I., Rosseeva L., Laikova L., Rosseev V., Pershina L., Trubacheeva N., Morgounov A., Zelenskiy Y. Utilization of new wheat gene pool in breeding of spring bread wheat. In: Abstracts of Oral and Poster Presentations of 8th International Wheat Conference. St. Petersburg, 2010;69-70
- Hao M., Zhang L., Ning S., Huang L., Yuan Z., Wu B., Yan Z., Dai S., Jiang B., Zheng Y., Liu D. The resurgence of introgression breeding, as exemplified in wheat improvement. *Front. Plant Sci.* 2020;11:252. DOI 10.3389/fpls.2020.00252
- Hsam S.L.K., Zeller F.J. Breeding for powdery mildew resistance in common wheat (*Triticum aestivum* L.). In: The Powdery Mildews. A comprehensive treatise. Minnesota: APSpress, 2002;219-238
- Morgounov A., Ablova I., Babayants O., Babayants L., Bepalova L., Khudokormov Zh., Litvinenko N., Shamanin V., Syukov V. Genetic pro-

- tection of wheat from rusts and development of resistant varieties in Russia and Ukraine. *Euphytica*. 2011;179:297-311. DOI 10.1007/s10681-010-0326-5
- Pershina L., Trubacheeva N., Badaeva E., Belan I., Rosseeva L. Study of androgenic plant families of alloplasmic introgression lines (*H. vulgare*)–*T. aestivum* and the use of sister DH lines in breeding. *Plants*. 2020;9(6):764-816. DOI 10.3390/plants9060764
- Peterson R.F., Campbell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Can. J. Res.* 1948;26:297-311. DOI 10.1139/cjr48c-033
- Servin B., Martin O.C., Mezard M., Hospital F. Toward a theory of marker-assisted pyramiding. *Genetics*. 2004;168:513-523. DOI 10.1534/genetics.103.023358
- Singh N.K., Shepherd K.W., McIntosh R.A. Linkage mapping of genes for resistance to leaf, stem and stripe rust and ω -secalins on the short arm of rye chromosome 1R. *Theor. Appl. Genet.* 1990;80(5):609-616. DOI 10.1007/BF00224219
- Slama-Ayed O., Bouhaouel I., Ayed S., De Buyser J., Picard E., Amara H.S. Efficiency of three haplomethods in durum wheat (*Triticum turgidum* subsp. *durum* Desf.): isolated microspore culture, gynogenesis and wheat × maize crosses. *Czech J. Genet. Plant Breed.* 2019;55:101-109. DOI 10.17221/188/2017-CJGPB
- Srivastava P., Singh N.B. Accelerated wheat breeding: doubled haploids and rapid generation advance. In: Gosal S., Wani S. (Eds.) *Biotechnologies of Crop Improvement*. Vol. 1. Springer, 2018;437-461. DOI 10.1007/978-3-319-78283-6_13

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 08.07.2024. После доработки 19.08.2024. Принята к публикации 22.08.2024.