

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья

УДК: 633.11: 631.527:632.4

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-205-214



Эффективные источники устойчивости яровой мягкой пшеницы к мучнистой росе для северо-запада России

Т. В. Лебедева, А. Н. Брыкова, Е. В. Зуев

*Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия***Автор, ответственный за переписку:** Евгений Валерьевич Зуев, e.zuev@vir.nw.ru

Актуальность. Мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.) – одна из основных продовольственных культур в мире. В Российской Федерации валовые сборы культуры в последние годы достигали 21,079 млн тонн. Одним из самых вредоносных заболеваний мягкой пшеницы является мучнистая роса. Сырой и прохладный климат северо-запада России провоцирует появление мучнистой росы на посевах зерновых практически ежегодно. Создание устойчивых к болезни сортов яровой мягкой пшеницы является наиболее экономичным и экологически безопасным направлением в селекции. Успех селекции определяют изучение источников устойчивости к болезни и интрогрессия новых генов в перспективные сорта пшеницы. Цель работы – проверить ювенильную и взрослую устойчивость к мучнистой росе образцов яровой мягкой пшеницы, выделенных за более чем двадцатилетний период, и определить эффективность источников устойчивости к патогену в настоящее время.

Материал и методы. С 2000 г. в отделе генетики совместно с отделом генетических ресурсов пшеницы ВИР проведен поиск источников устойчивости к мучнистой росе среди 1283 образцов яровой мягкой пшеницы. Выявленные 36 источников взрослой и проростковой устойчивости к мучнистой росе были повторно оценены в 2022 г. Исследования проводили согласно методическим указаниям ВИР.

Результаты и обсуждение. В 2022 г. полевое и лабораторное изучение сортов пшеницы выявило образцы, устойчивые к патогену на всех фазах развития. Уставлено, что 6 образцов сохраняют устойчивость к мучнистой росе в течение 13–22 лет, 6 образцов устойчивы к болезни на протяжении 7–12 лет, 8 сортов устойчивы в течение 6 лет. Подтверждена устойчивость 9 образцов, выявленных в 2020 г.

Заключение. Полевые и лабораторные исследования выявили образцы яровой мягкой пшеницы, сохраняющие ювенильную и взрослую устойчивость к ленинградской популяции возбудителя мучнистой росы в течение 7 и более лет. Данные источники устойчивости рекомендуются для использования в селекционных программах по улучшению пшеницы.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., сорт, линия, патоген, восприимчивость к *Blumeria graminis* f. sp. *tritici*, устойчивость взрослого растения, ювенильная устойчивость

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 0481-2022-0001 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития, оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

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

Для цитирования: Лебедева Т.В., Брыкова А.Н., Зуев Е.В. Эффективные источники устойчивости яровой мягкой пшеницы к мучнистой росе для северо-запада России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(1):205-214. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-205-214

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-205-214

Effective sources of powdery mildew resistance among spring bread wheat for the northwest of the Russian Federation

Tatiana V. Lebedeva, Alla N. Brykova, Evgeny V. Zuev

*N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia***Corresponding author:** Evgeny V. Zuev, e.zuev@vir.nw.ru

Background. Bread wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the world's main food crops. In Russia, its gross harvest in recent years has reached 21.079 million tons. *Blumeria graminis* is one of the most harmful diseases of bread wheat. Annual harvest losses can reach 10–30%. In Leningrad Province, powdery mildew appears almost every year on cereals. Development of cultivars resistant to powdery mildew is the most important trend in spring bread wheat breeding. Its progress is determined by new sources of effective resistance genes and their incorporation into promising spring bread wheat cultivars. The purpose of this work was to retest the seedling and adult resistance to powdery mildew in spring bread wheat accessions selected over a period of more than twenty years and redefine the effectiveness of disease resistance sources at the present time.

Materials and methods. Since 2000, VIR has conducted a search for powdery mildew resistance among 1283 spring bread wheat accessions. The identified 36 sources of adult and seedling powdery mildew resistance were reevaluated in 2022. Field and laboratory studies into the resistance to the pathogen were performed according to VIR's guidelines.

Results and discussion. In 2022, field and laboratory studies of spring bread wheat cultivars revealed accessions with resistance to the pathogen in all phases of plant development. Six sources remained resistant to powdery mildew for 13–22 years, another six showed resistance for 7–12 years, and 8 cultivars were immune for 6 years. Resistance of 9 accessions identified for this trait in 2020 was confirmed.

Conclusion. Field and laboratory research into the resistance of spring bread wheat accessions to the pathogen identified sources retaining seedling and adult resistance to the Leningrad population of powdery mildew for 7 years or more. These accessions are recommended for use in wheat breeding programs.

Keywords: *Triticum aestivum* L., cultivar, line, pathogen, susceptibility to *Blumeria graminis* f. sp. *tritici*, resistance of adult plants, seedling resistance

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state tasks according to the theme plan of VIR, Project No. 0481-2022-0001 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production".

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

For citation: Lebedeva T.V., Brykova A.N., Zuev E.V. Effective sources of powdery mildew resistance among spring bread wheat for the northwest of the Russian Federation. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):205-214. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-205-214

Введение

Мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.) является основной продовольственной культурой в Российской Федерации. По данным Росстата, яровая мягкая пшеница в РФ занимала в 2021 г. 13,1 млн га, что составляет 18,6% от посевных площадей всех сельскохозяйственных культур и 29,1% – от зерновых. Валовые сборы культуры в последние годы достигали 21,079 млн т (18% от зерновых культур и 9,4% от всей продукции растениеводства) (<https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226>).

Заболевание пшеницы мучнистой росой вызывает биотрофный гриб *Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal. Ежегодные потери урожая могут достигать 10–15%, а в годы эпифитотий – 30% (Conner et al., 2003). Болезнь встречается во многих районах с прохладным, влажным климатом. В Северо-Западном регионе России мучнистая роса проявляется на посевах пшеницы практически ежегодно.

Создание новых сортов, характеризующихся устойчивостью к *B. graminis*, является наиболее экономичным и экологически безопасным способом защиты пшеницы. Способность фитопатогенных грибов образовывать новые агрессивные биотипы как вегетативным, так и половым путем требует постоянного мониторинга вирулентности популяций гриба, а также поиска новых эффективных генов устойчивости к болезни и интрогрессии их в перспективные сорта мягкой пшеницы. Начиная с 2000 г. все новые образцы, поступившие в коллекцию яровой мягкой пшеницы Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), оценивают по устойчивости к мучнистой росе. Ежегодно выделяются устойчивые в условиях России формы (линии), которые используются в селекционных программах. При составлении оценочной базы по устойчивости яровой мягкой пшеницы к мучнистой росе возникла идея проверить лучшие образцы, чтобы узнать, как долго можно использовать устойчивые образцы в селекционном процессе и других исследованиях.

Целью работы было оценить ювенильную и взрослую устойчивость к мучнистой росе образцов яровой мягкой пшеницы, выделенных за более чем двадцатилетний период, и определить их эффективность в настоящее время.

Материалы и методы

С 2000 г. в отделе генетики совместно с отделом генетических ресурсов пшеницы ВИР проведен поиск устойчивых к мучнистой росе форм среди 1283 образцов яровой мягкой пшеницы из 59 стран. В основном это сорта и линии из России (452 образца), Китая (107), Канады (71), Австралии (62), Казахстана (50), Германии (39), США (36), Пакистана (32), Украины (31), Турции (31), Польши (21) и Швеции (19).

В результате скрининга было выделено 36 образцов яровой мягкой пшеницы, устойчивых к мучнистой росе как на стадии проростков в лаборатории, так и обладающих устойчивостью к природной популяции гриба в условиях Ленинградской области. За период 2000–2009 гг. выявлены сорта: 'Экскалибур' (к-64211), 'Ангас' (к-64212), 'Каскадес' (к-64214) из Австралии; 'Аранка' (к-64277, Чехия); 'СВ Валс' (к-64433), 'СВ Милджет' (к-64434), 'СВ Эстрад' (к-64435), 'СВ Винджет' (к-64436) из Швеции; 'Лютесценс 13' (к-64649), '485ae5' (к-64656), 'Лютесценс 393ae9-1' (к-64657) из Самарской области РФ.

В 2010–2015 гг. устойчивыми к болезни были: 'Сабле' (к-65461, Канада); 'Струна Мироновская' (к-65016), 'Вышиванка' (к-65257) из Украины; 'Воевода' (к-64997), 'Фаворит' (к-64998) из Саратовской области РФ; 'Мерцана' (к-65449, РФ, Тамбовская обл.), 'Тулайковская 110' (к-65454, РФ, Самарская обл.). В 2016–2019 гг. устойчивостью к мучнистой росе характеризовались: 'КВС Аквилон' (к-65821, Германия); 'Пастер' (к-66093, Нидерланды), 'Калисперо' (к-66393, Франция); 'СВ Кунгсджет' (к-66036), 'СВ Кронджет' (к-66097), 'Боетт' (к-66353) из Швеции; 'Новосибирская 61' (к-66346, РФ, Новосибирская обл.); 'Архат' (к-66406, РФ, Пензенская обл.); 'Лебедушка' (к-66410, РФ, Саратовская обл.). В 2020 г. зарегистрированы источники резистентности к болезни: 'Ванек' (к-67080), 'КВС Коллада' (к-67087) из Германии; 'Арабеска' (к-67093), 'Мандарына' (к-67096), 'Арабелла' (к-67159) из Польши; 'Баталь' (к-67116), 'Стиллетт' (к-67119), 'Хеппи' (к-67247) из Швеции.

В 2022 г. у всех упомянутых выше образцов повторно оценили ювенильную и взрослую устойчивость к популяции возбудителя мучнистой росы.

Ювенильную оценку устойчивости проводили в лабораторных условиях согласно методическим указаниям ВИР (Krivchenko et al., 2008). Показателями реакции на заражение растений грибом являлись интенсивность спороношения и качественные изменения тканевой растительности. К классу устойчивых относили растения, поражение которых отсутствовало или не превышало 1 балл, умеренно устойчивых – 2 балла, восприимчивых – 3 и 4 балла (Mains, Dietz, 1930). Образцы, поражение растений которых составляло 0–2 балла, проверяли трехкратно.

Устойчивость образцов пшеницы в фазах колошения и цветения изучали на экспериментальном поле научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (ППЛ ВИР, Санкт-Петербург) по методике отдела генетики (Krivchenko et al., 2008). Поражение устойчивых образцов не превышало одного балла; поражение восприимчивых образцов составляло 3 и 4 балла; балл 2 характеризовал умеренную устойчивость растения. В опытах использовали общепринятую агротехнику возделывания яровой мягкой пшеницы. Образцы высевали в оптимальные сроки на делянках 1 м². Стандартными сортами были 'Диамант' (к-25019) и 'Сибирка Ярцевская' (к-38587) (восприимчивые к мучнистой росе сорта, балл 4).

Результаты и обсуждение

Распределение образцов пшеницы по реакции на заражение *B. graminis* в ювенильной фазе показало, что для подавляющего большинства изученных образцов (90,6%) характерен восприимчивый тип реакции (баллы 3 и 4), то есть эти сорта не содержат эффективных генов устойчивости к данной популяции гриба. Лишь 2,8% образцов оказались устойчивыми (баллы 0 и 1) и 6,6% – умеренно устойчивыми (балл 2) (рисунок).

Результаты изучения ювенильной устойчивости к мучнистой росе образцов яровой мягкой пшеницы новых поступлений за 2004–2009 гг., 2010–2015 гг. и 2016–2020 гг. показали сходное распределение образцов по реакции на заражение патогеном. Так, по результатам анализа 2004–2009 гг. среди 306 изученных сортов 3,92% оказались устойчивыми (баллы 0–1), 1,96% – умеренно устойчивыми (балл 2) и 94,12% – восприимчивыми (баллы 3 и 4); в 2010–2015 гг. из 277 вновь поступивших образцов 2,53% были устойчивы (баллы 0–1), 3,25% – уме-

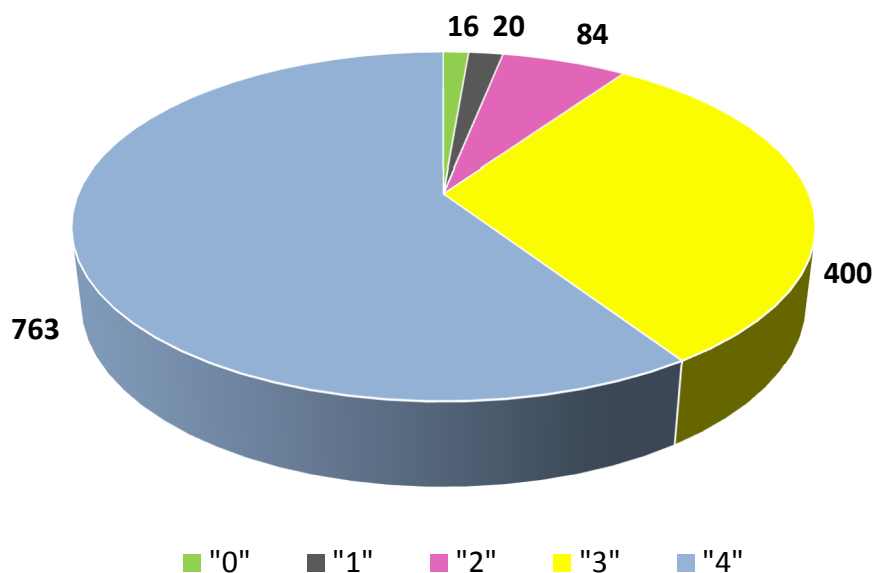


Рисунок. Распределение образцов пшеницы по реакции на заражение *Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal (0, 1, 2, 3, 4 – баллы устойчивости)

Figure. Distribution of spring bread wheat accessions according to their response to the infection with *Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal (0, 1, 2, 3 and 4: resistance score)

ренно устойчивы (балл 2), 94,22% оказались восприимчивыми (баллы 3 и 4); в 2016–2020 гг. среди 337 образцов из новых поступлений 2,67% были устойчивы (баллы 0–1), 6,23% – умеренно устойчивы (балл 2) и 91,10% – восприимчивы (баллы 3 и 4). Информация об устойчивости образцов опубликована в каталогах ВИР (Tyryshkin et al., 2009; Tyryshkin et al., 2015; Tyryshkin et al., 2020).

Результаты эксперимента в 2022 г. показали, что австралийские сорта 'Экскалибур', 'Ангас', 'Каскадес' потеря-

ли устойчивость к мучнистой росе как в проростках, так и на поздних стадиях развития. У сорта 'Аранка' из Чехии наблюдали восприимчивость проростков (балл 3). Умеренной устойчивостью характеризовались образцы 'Лютесценс 13' и 'Струна Мироновская'. В стадии колошения отмечали умеренную устойчивость (балл 2) сортов 'СВ Кунгсджет' (Швеция) и 'Ванек' (Германия). Остальные сорта яровой мягкой пшеницы, выделенные в 2000–2021 гг., сохранили устойчивость к болезни на всех фазах роста в 2022 г. (таблица).

Таблица. Результаты оценки ювенильной (ЮУ) и взрослой (ВУ) устойчивости образцов яровой мягкой пшеницы к популяции *Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal

Table. Results of testing spring bread wheat accessions for their seedling and adult resistance to the *Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal population

№ по каталогу ВИР, образец, происхождение	Результаты первой оценки при поступлении в коллекцию ВИР		Результаты оценки в 2022 г.		В какой период выделены
	ЮУ, балл	ВУ, балл	ЮУ, балл	ВУ, балл	
к-64211, Экскалибур, Австралия	1	0	4	3	2000–2009
к-64212, Ангас, Австралия	1	0	4	3	2000–2009
к-64214, Каскадес, Австралия	1	0	4	3	2000–2009
к-64277, Аранка, Чехия	0	0	3	1	2000–2009
к-64433, СВ Валс, Швеция	0	0	0	1	2000–2009

Таблица. Продолжение

Table. Continued

№ по каталогу ВИР, образец, происхождение	Результаты первой оценки при поступлении в коллекцию ВИР		Результаты оценки в 2022 г.		В какой период выделены
	ЮУ, балл	ВУ, балл	ЮУ, балл	ВУ, балл	
к-64434, СВ Милджет, Швеция	0	0	0	1	2000–2009
к-64435, СВ Эстрад, Швеция	0	0	1	0	2000–2009
к-64436, СВ Винджет, Швеция	1	0	1	0	2000–2009
к-64649, Лютесценс 13, РФ, Самарская обл.	0	0	2	–	2000–2009
к-64656, 485ae5, РФ, Самарская обл.	0	0	0	0	2000–2009
к-64657, Лютесценс 393ae9-1, РФ, Самарская обл.	1	0	1	0	2000–2009
к-64997, Воевода, РФ, Саратовская обл.	0	0	0	0	2010–2015
к-64998, Фаворит, РФ, Саратовская обл.	0	0	0	0	2010–2015
к-65016, Струна Мироновская, Украина	1	0	2	1	2010–2015
к-65257, Вышиванка, Украина	0	0	0	0	2010–2015
к-65449, Мерцана, РФ, Тамбовская обл.	1	0	1	0	2010–2015
к-65454, Тулайковская 110, РФ, Самарская обл.	0	0	0	0	2010–2015
к-65461, Сабле, Канада	1	0	1	0	2010–2015
к-65821, КВС Аквилон, Германия	0	0	0	0	2016–2019
к-66036, СВ Кунгсджет, Швеция	1	0	1	2	2016–2019
к-66093, Пастер, Нидерланды	1	0	1	0	2016–2019

Таблица. Окончание
Table. The end

№ по каталогу ВИР, образец, происхождение	Результаты первой оценки при поступлении в коллекцию ВИР		Результаты оценки в 2022 г.		В какой период выделены
	ЮУ, балл	ВУ, балл	ЮУ, балл	ВУ, балл	
к-66097, СВ Кронджет, Швеция	1	0	1	0	2016–2019
к-66346, Новосибирская 61, РФ, Новосибирская обл.	1	0	1	1	2016–2019
к-66353, Боетт, Швеция	0	0	1	1	2016–2019
к-66393, Калисперо, Франция	1	0	1	0	2016–2019
к-66406, Архат, РФ, Пензенская обл.	1	0	1	0	2016–2019
к-66410, Лебедушка, РФ, Саратовская обл.	1	0	1	0	2016–2019
к-67080, Ванек, Германия	1	0	1	2	2020
к-67087, КВС Коллада, Германия	0	0	1	1	2020
к-67093, Арабеска, Польша	1	0	1	0	2020
к-67096, Мандарына, Польша	1	0	1	0	2020
к-67116, Баталь, Швеция	0	0	0	1	2020
к-67119, Стиллетт, Швеция	1	0	0	1	2020
к-67159, Арабелла, Польша	0	0	0	1	2020
к-67247, Хеппи, Швеция	0	0	1	1	2020
к-67425, Тулайковская 117, РФ, Самарская обл.	1	0	1	1	2021

Среди 11 образцов, выявленных в 2000–2009 гг., потеряли устойчивость к мучнистой росе 5 сортов (45,5%); из 7 образцов, выявленных в 2010–2015 гг., только один (14,3%) оказался умеренно устойчивым; все образцы, оцененные в 2016–2021 гг., сохранили устойчивость к болезни.

По результатам исследования можно сделать вывод, что источники устойчивости яровой мягкой пшеницы сохраняют свою эффективность против популяции гриба примерно в течение 7 лет с момента включения в коллекцию ВИР. Среди образцов, оцененных в последние 8–22 года как устойчивые, уже выявлены неустойчивые формы.

В ВИР образец считается источником ценного для селекции признака только с момента его выявления по результатам изучения, что совпадает с датой включения в коллекцию ВИР. Для российских сортов год включения в коллекцию и год реализации (включение в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию на территории России) практически тождествен, разница составляет 1–2 года: сорт 'Воевода' районирован в 2007 г., в коллекцию включен в этом же году; 'Фаворит' районирован в 2007 г., в коллекцию включен в 2008 г.; 'Тулайковская 110' районирован в 2013 г., в коллекцию включен в 2015 г.; 'Архат' включен в коллекцию в 2017 г., районирован в 2015 г. Долго не поступал в коллекцию сорт 'Лебедушка': районирован в 2009 г., а закаталогизирован в 2016 г. Для зарубежных сортов разница между годом начала коммерческого использования и годом каталогизации может достигать 22 года: шведский сорт 'Баталь' реализован в 1997 г., а в коллекцию ВИР включен только в 2019 г. В среднем зарубежные сорта каталогизируют в ВИР на 7 лет позже начала их коммерческого выращивания.

Потеря эффективности ранее выделенных источников резистентности к болезни является следствием изменения состава клонов с определенными генами вирулентности в популяции *B. graminis* в ППЛ ВИР. Так, в 1970–1980 гг. популяция гриба стала поражать сорта с генами устойчивости *Pm1a*, *Pm2*, *Pm3a-c*, *Pm4a*, *Pm8*. С 1990-х годов начали появляться клоны гриба, способные инфицировать сорта с аллелями *Pm3d*, *Pm6*, *Pm7*, *Pm17*. В период 2003–2009 гг. гены *Pm3f*, *Pm12*, *Pm16*, *Pm19* продолжали предохранять сорта яровой мягкой пшеницы от заражения патогеном. В настоящее время в популяции присутствуют клоны, вирулентные к генам устойчивости *Pm1a*, *Pm2*, *Pm3a-d*, *Pm4a*, *Pm5-Pm9*, *Pm16*, *Pm17*, *Pm19*, *Pm28*, и авирулентные к *Pm12* (Lebedeva, Zuev, 2015).

Эффективный ген устойчивости *Pm12* интрогрессирован в мягкую пшеницу (линия Вембли 14.31) от *Aegilops speltoides* Tausch (McIntosh et al., 2013). Фитопатологический тест показал, что экспрессия генов устойчивости сортов 'Воевода', 'Фаворит', 'Мерцана', 'Тулайковская 110', 'Вышиванка', 'Пастер', 'СВ Валс', 'СВ Милджет', 'СВ Винджет', 'СВ Кронджет', 'Боетт', 'Баталь' сходна с проявлением доминантного гена *Pm12*. По результатам гибридологического анализа установлено, что ювенильная устойчивость данных сортов контролируется моногеном, ген доминантный и отличается от эффективного гена *Pm12*. Гены устойчивости к мучнистой росе сортов шведской селекции отличны от генов устойчивости российских сортов (Lebedeva, Zuev, 2018).

В литературе указана родословная шведского сорта 'СВ Винджет': (Тьялве М14/Тьялве М15//Канон). Сорт 'Канон' является также одним из родителей сорта 'СВ Кронджет' – (Ханно/Авле/Канон – МБ) (Hysing et al.,

2007). Сорт 'Канон' (к-61222) включен в коллекцию ВИР в 1990 г. и до настоящего времени характеризуется устойчивостью к болезни в условиях Ленинградской области (Lebedeva et al., 2020). Устойчивость родительского сорта 'Канон' обеспечивают доминантные аллели генов *Pm1* (хромосома 7AL), *Pm2* (5DS), *Pm3d* (1AS), *Pm4b* (2AL), *Pm6* (2BL) (McIntosh et al., 2013). Аккумуляция нескольких генов резистентности в одном генотипе является стратегией увеличения длительности устойчивости растений к болезням. Включение разных генов устойчивости в один сорт предполагает более надежную защиту от болезни, так как патогену требуются более сложные изменения вирулентности для преодоления генов устойчивости.

Линия 485ae5 имеет в родословной Вембли 14.31, высокую устойчивость которого определяет доминантный ген *Pm12* от *Ae. speltoides*. Невосприимчивость к мучнистой росе 'Лютесценс 393ae9-1' контролирует рецессивный аллель *PmSp*. Устойчивость 'Лютесценс 13' определяет ген *PmKu*, переданный в генотип яровой мягкой пшеницы от *Triticum spelta* subsp. *kuckuchkianum* (Syukov et al., 2016). В настоящее время поражение 'Лютесценс 13' в стадии проростков составляет 2 балла.

Сорта яровой мягкой пшеницы 'Воевода' и 'Фаворит', созданные в НИИСХ Юго-Востока, имеют в своих родословных генетический материал *Agropyron elongatum* (Host) P. Beauv. Хромосомное замещение 6D/6Ag1 обеспечивает устойчивость сортов к мучнистой росе. В генотипе сорта 'Лебедушка' сочетается генетический материал от двух видов пырея: *A. elongatum* и *A. intermedium* (Host) P. Beauv. (Krupnov, Sibikeev, 2005).

Сорт 'Тулайковская 110' получен в Самарском НИИСХ им. Н.М. Тулайкова (Syukov et al., 2016). Одним из его родителей является сорт 'Тулайковская 5', в генотипе которого присутствует ген *PmAg1*, переданный от *A. intermedium*.

Устойчивый к мучнистой росе сорт 'Архат' (Ишеевская × Л503), созданный в Пензенском НИИСХ, имеет транслокацию 7DS-7DL-7Ae#1L от *A. elongatum*.

Известна родословная сорта 'Мерцана': (Саратовская 29 × Джустин) × (Воронежская 6 × Жница) × (Воронежская 10 × СФР204). Сорт 'Воронежская 10' (к-64101) характеризуется ювенильной устойчивостью к популяции гриба.

Часто транслокации, помимо потенциально полезных факторов, несут и негативные свойства чужеродного донора, что ограничивает использование их в селекции пшеницы. В данном случае расширение генетической изменчивости у мягкой пшеницы за счет интрогрессии генов от *A. elongatum* и *A. intermedium* позволило создать сорта, для которых характерны устойчивость к мучнистой росе, отсутствие отрицательного влияния чужеродного донора на хозяйственные признаки и высокая продуктивность. Сорта, полученные при помощи отдаленной гибридизации, характеризующиеся высоким потенциалом урожайности, адаптационной ценности и устойчивости к грибным болезням, включают во многие селекционные программы и возделывают на больших площадях.

Гены устойчивости *Pm4b*, *Pm6*, *Pm8* активно использовались для улучшения мягкой пшеницы в XX веке. Так, немецкий сорт 'Weihenstephan M1' (*Pm4b*) участвовал в родословных многих коммерческих сортов Германии, Швеции, Англии (Hsam et al., 2002). Ген *Pm6* интрогрессирован в мягкую пшеницу от тетраплоидной пшеницы *Triticum timopheevii* Zhuk. и широко распространен среди

сортов Европы, Китая и Америки. Примерно 800 сортов пшеницы, несущих генетический материал от *T. timopheevii*, созданы в Германии, Франции и Великобритании. Вирулентные к *Pm6* клоны *B. graminis* не являются редкостью во многих популяциях гриба, однако ген сохраняет эффективность, особенно в комбинациях с генами *Pm2* и *Pm5* (Martynov et al., 2018).

Ген устойчивости *Pm8* идентифицирован в сортах мягкой пшеницы, имеющих пшенично-ржаную транслокацию 1BL.1RS или замещение 1B(1R). Пшенично-ржаные линии участвовали в создании сортов озимой пшеницы 'Аврора', 'Кавказ', 'Предгорная 2' селекции П.П. Лукьяненко (Rabinovich, 1998). Ген *Pm8* контролировал высокий уровень устойчивости к мучнистой росе, но с 1990-х годов уже не обеспечивал защиту растений вследствие увеличения соответствующей вирулентности у патогена (Hsam et al., 2002).

На сегодняшний день у мягкой пшеницы и ее родичей зарегистрировано более 100 аллелей устойчивости к *B. graminis* в 65 локусах (*Pm1–Pm68*), однако лишь немногие из них могут обеспечить резистентность растения к большинству или ко всем изолятам гриба (Zhu et al., 2022). Большинство генов ювенильной устойчивости к болезни связаны с реакцией сверхчувствительности растения. Этот тип устойчивости, как правило, контролируется олигогенами. Программы по селекции часто основаны на интрогрессии в восприимчивые сорта распецифических генов устойчивости, которые могут сравнительно легко преодолеваются в результате накопления в популяции патогена клонов с комплементарными генами вирулентности (Kang et al., 2020). В связи с изменениями, происходящими в популяциях гриба, сорта, ранее характеризовавшиеся устойчивостью, на сегодняшний день оказываются восприимчивы к болезни.

Некоторые интрогрессированные в геном мягкой пшеницы гены определяют устойчивость к мучнистой росе взрослых растений, но не эффективны в фазе проростков, что характерно для *Pm25* (*Triticum boeoticum* Boiss.), *Pm34* и *Pm35* (*Aegilops tauschii* Coss.) (Cowger et al., 2018). Гены *Pm38*, *Pm39* и *Pm46* обеспечивают долговременную устойчивость не только к мучнистой росе, но и к другим болезням (Li et al., 2014). Использование в селекции широкого спектра генов устойчивости очень важно для эффективного контроля болезни на посевах пшеницы.

Заключение

На основе проводимого в отделе генетики ВИР совместно с отделом генетических ресурсов пшеницы скрининга яровой мягкой пшеницы по устойчивости к мучнистой росе ежегодно выявляются источники устойчивости к этому вредоносному заболеванию, которые по заявкам селекционеров и НИУ России рассылаются для использования в селекционных программах. У некоторых образцов изучена генетика признака. Установлено, что все источники, выявленные за последние 7 лет, сохранили ювенильную и взрослую устойчивость к ленинградской популяции *B. graminis* f. sp. *tritici*. Мы рекомендуем с определенной периодичностью (4-5 лет) проверять эффективность ранее выявленных устойчивых образцов. Вместе с тем нами подтверждена устойчивость 12 источников, которые сохраняют ее в течение более 20 лет. Образцы из Швеции, Германии, Канады и Польши в большей степени подходят для введения их в селекционные программы по пшенице на северо-западе России.

References / Литература

- Conner R.L., Kuzyk A.D., Su H. Impact of powdery mildew on the yield of soft white spring wheat cultivars. *Canadian Journal of Plant Science*. 2003;83(4):725-728. DOI: 10.4141/P03-043
- Cowger C., Mehra L., Arellano C., Meyers E., Murphy J.P. Virulence differences in *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* from Central and Eastern United States. *Phytopathology*. 2018;108(3):402-411. DOI: 10.1094/Phyto-06-17-0211-R
- Federal State Statistics Service: [website]. [in Russian] (Федеральная служба государственной статистики): [сайт]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226> [дата обращения: 15.04.2022].
- Hsam S.L.K., Zeller F.J. Breeding for powdery mildew resistance in common wheat (*Triticum aestivum* L.). In: R.R. Bélanger, W.R. Bushell, A.J. Dik, T.L.W. Carver (eds). *The Powdery Mildews. A Comprehensive Treatise*. St. Paul, MN: APS press; 2002. p.219-238.
- Hysing S.C., Merker A., Liljeroth E., Koeber R.M.D., Zeller F.J., Hsam S.L.K. Powdery mildew resistance in 155 Nordic bread wheat cultivars and landraces. *Hereditas*. 2007;144(3):102-119. DOI: 10.1111/j.2007.0018-0661.01991.x
- Kang Y., Zhou M., Merry A., Barry K. Mechanisms of powdery mildew resistance of wheat – a review of molecular breeding. *Plant Pathology*. 2020;69(4):601-617. DOI: 10.1111/ppa.13166
- Krivchenko V.I., Lebedeva T.V., Peusha Kh.O. Powdery mildew of cereals. Studying genetic resources of cereal crops for resistance to harmful organisms. Guidelines (Muchnistaya rosa zlakov. Izucheniye geneticheskikh resursov zernovykh kultur po ustoychivosti k vrednym organizmam. Metodicheskoye posobiye). Moscow: Rosselkhozakademiya; 2008. [in Russian] (Кривченко В.И., Лебедева Т.В., Пеуша Х.О. Мучнистая роса злаков. Изучение генетических ресурсов зерновых культур по устойчивости к вредным организмам. Методическое пособие. Москва: Россельхозакадемия; 2008).
- Krupnov V.A., Sibikeev S.N. The alien genes for improvement of bread wheat (Chuzherodnyye geny dlya uluchsheniya myagkoy pshenitsy). In: B.V. Rigin, E.I. Gaevskaya (eds). *Identified plant gene pool and breeding (Identifitsirovanny genofond rasteniy i selektsiya)*. St. Petersburg: VIR; 2005. p.740-758. [in Russian] (Крупнов В.А., Сибикеев С.Н. Чужеродные гены для улучшения мягкой пшеницы. В кн.: *Идентифицированный генфонд растений и селекция* / под ред. Б.В. Ригина, Е.И. Гаевской. Санкт-Петербург: ВИР; 2005. С.740-758).
- Lebedeva T.V., Brykova A.N., Zuev E.V. Powdery mildew resistance of Nordic spring bread wheat accessions from the collection of the Vavilov Institute (VIR). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(3):146-154. [in Russian] (Лебедева Т.В., Брыкова А.Н., Зуев Е.В. Устойчивость к мучнистой росе скандинавских образцов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(3):146-154). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-3-146-154
- Lebedeva T.V., Zuev E.V. Inheritance of powdery mildew resistance in selected spring wheat accessions from the VIR collection. *Vavilovia*. 2018;1(1):18-24. [in Russian] (Лебедева Т.В., Зуев Е.В. Наследование устойчивости к мучнистой росе у некоторых образцов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР. *Vavilovia*. 2018;1(1):18-24). DOI: 10.30901/2658-3860-2018-1-18-24
- Lebedeva T.V., Zuev E.V. Studies of powdery mildew resistance (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici* Golov.) in varieties of com-

- mon wheat (*Triticum aestivum* L.). *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(7):17-20. [in Russian] (Лебедева Т.В., Зуев Е.В. Изучение устойчивости к мучнистой росе (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici* Golov.) сортов мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(7):17-20).
- Li Z., Lan C., He Z., Sing R., Rosewarne G., Chen X. et al. Overview and application of QTL for adult plant resistance to leaf rust and powdery mildew in wheat. *Crop Science*. 2014;54(5):1907-1925. DOI: 10.2135/cropsci2014.02.0162
- Mains E.B., Dietz S.M. Physiologic forms of barley mildew *Erysiphe graminis hordei*. *Phytopathology*. 1930;20(3):229-239.
- Martynov S.P., Dobrotvorskaya T.V., Krupnov V.A. Analysis of the distribution of *Triticum timopheevii* Zhuk. genetic material in common wheat varieties (*Triticum aestivum* L.). *Russian Journal of Genetics*. 2018;54(2):166-175. DOI: 10.1134/s1022795418020126
- McIntosh R.A., Yamazaki Y., Dubcovsky J., Rogers J., Morris C., Appels R., Xia X.C. Catalogue of gene symbols for wheat. In: *Proceedings of the 12th International Wheat Genetics Symposium; 8–13 September 2013; Yokohama, Japan*. Springer Open; 2013. Available from: <https://wheat.pw.usda.gov/GG2/Triticum/wgc/2013/GeneCatalogueIntroduction.pdf> [accessed May 16, 2022].
- Rabinovich S.V. Importance of wheat-rye translocations for breeding for modern cultivars of *Triticum aestivum* L. *Euphytica*. 1998;100(1-3):323-340. DOI: 10.1023/A:1018361819215
- Syukov V.V., Shabalkina E.N., Shevchenko S.N., Vyushkov A.A. The spring bread wheat Tulaikovskaya 110. (Yarovaya myagkaya pshenitsa Tulaikovskaya 110). *Molodoi ucheny = Young Scientist*. 2016;27(3):57-60. [in Russian] (Сюков В.В., Шабалкина Е.Н., Шевченко С.Н., Вьюшков А.А. Яровая мягкая пшеница Тулайковская 110. *Молодой ученый*. 2016;27(3):57-60).
- Tyryshkin L.G., Lebedeva T.V., Kovaleva M.M., Zuev E.V., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Yu. Catalogue of the VIR global collection. Issue 913. Spring bread wheat. Description of the newest accessions in the VIR collection, screened for their resistance to wheat leaf rust, spot blotch, powdery mildew and loose smut. St. Petersburg: VIR; 2020. [in Russian] (Тырышкин Л.Г., Лебедева Т.В., Ковалева М.М., Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Кудрявцева Е.Ю. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 913. Яровая мягкая пшеница. Характеристика образцов новейших поступлений коллекции ВИР по устойчивости к листовой ржавчине, темно-бурой листовой пятнистости, мучнистой росе и фузариозу колоса. Санкт-Петербург: ВИР; 2020).
- Tyryshkin L.G., Lebedeva T.V., Kovaleva M.M., Zuev E.V., Brykova A.N., Stetsyuk S.N. Catalogue of the VIR global collection. Issue 795. Spring bread wheat. Description of the newest accessions in the VIR collection, screened for their resistance to wheat leaf rust, spot blotch, septoria, powdery mildew and scab (Katalog mirovoy kolleksii VIR. Vypusk 795. Yarovaya myagkaya pshenitsa. Kharakteristika obraztsov noveyshikh postupleniy kolleksii VIR po ustoychivosti k listovoy rzhavchine, temno-buroy listovoy pyatnistosti, septoriozu, muchnistoy rose i fuzariozu kolosa). St. Petersburg: VIR; 2009. [in Russian] (Тырышкин Л.Г., Лебедева Т.В., Ковалева М.М., Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Стецюк С.Н. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 795. Яровая мягкая пшеница. Характеристика образцов новейших поступлений коллекции ВИР по устойчивости к листовой ржавчине, темно-бурой листовой пятнистости, септориозу, мучнистой росе и фузариозу колоса. Санкт-Петербург: ВИР; 2009).
- Tyryshkin L.G., Lebedeva T.V., Kovaleva M.M., Zuev E.V., Brykova A.N., Stetsyuk S.N. Catalogue of the VIR global collection. Issue 823. Spring bread wheat. Description of the newest accessions in the VIR collection, screened for their resistance to wheat leaf rust, spot blotch, powdery mildew and scab. (Katalog mirovoy kolleksii VIR. Vypusk 823. Yarovaya myagkaya pshenitsa. Kharakteristika obraztsov noveyshikh postupleniy kolleksii VIR po ustoychivosti k listovoy rzhavchine, temno-buroy listovoy pyatnistosti, muchnistoy rose i fuzariozu kolosa). St. Petersburg: VIR; 2015. [in Russian] (Тырышкин Л.Г., Лебедева Т.В., Ковалева М.М., Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Стецюк С.Н. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 823. Яровая мягкая пшеница. Характеристика образцов новейших поступлений коллекции ВИР по устойчивости к листовой ржавчине, темно-бурой листовой пятнистости, мучнистой росе и фузариозу колоса. Санкт-Петербург: ВИР; 2015).
- Zhu K., Li M., Wu H., Zhang D., Dong L., Wu Q. et al. Fine mapping of powdery mildew resistance gene *MIWE74* derived from wild emmer wheat (*Triticum turgidum* ssp. *dicocoides*) in an NBS-LRR gene cluster. *Theoretical and Applied Genetics*. 2022;135(4):1235-1245. DOI: 10.1007/s00122-021-04027-2

Информация об авторах

Татьяна Вениаминовна Лебедева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, riginbv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2344-9233>

Алла Николаевна Брыкова, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, a.brykova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2215-5068>

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

Information about the authors

Tatiana V. Lebedeva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, riginbv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2344-9233>

Alla N. Brykova, Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.brykova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2215-5068>

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

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 19.10.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted on 19.10.2022; approved after reviewing on 28.11.2022; accepted for publication on 02.03.2023.