

Научная статья

УДК 632.4:631.523:633.111

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-05



Комплексная оценка устойчивости сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции к бурой ржавчине с использованием молекулярно-генетических и полевых методов

В. В. Костенко¹, Н. Б. Баранова¹, Д-р. Ф. Асхадуллин^{1,2},
Д-л. Ф. Асхадуллин², М. Л. Пономарева^{1,2}

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

² Казанский научный центр Российской академии наук, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Казанского научного центра Российской академии наук (ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН), Казань, Россия

Автор, ответственный за переписку: Костенко Виктория Викторовна, vvkostenko1@gmail.com

Актуальность. Бурая ржавчина *Puccinia triticina* Eriks. мягкой пшеницы является одной из наиболее вредоносных болезней в условиях умеренного климата Российской Федерации, вызывая значительные потери урожая и снижение качества зерна. В связи с этим актуальной задачей является оценка устойчивости сортов и разнообразия *Lr*-генов у татарстанских сортов пшеницы. Наибольший интерес представляют гены *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr34*, *Lr37/Yr17/Sr38* и *Lr46*, обеспечивающие устойчивость на различных стадиях развития растений. Целью исследования являлась комплексная оценка устойчивости к бурой ржавчине сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции с использованием полевых и молекулярно-генетических методов. **Материалы и методы.** Устойчивость 15 сортов оценивали в полевых условиях в 2023–2025 годах на экспериментальной базе Татарского НИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН по степени поражения флагового и предфлагового листьев. Идентификацию генов устойчивости проводили с использованием диагностических ДНК-маркеров, ассоциированных с шестью *Lr*-генами. **Результаты и обсуждение.** Наиболее устойчивыми в полевых условиях оказались сорта ‘Наставник’, ‘Хазинэ’ и ‘Чистопольская’, характеризующиеся наличием комбинаций *Lr9+Lr24+Lr46*, *Lr19+Lr24* и *Lr9+Lr24+Lr34* соответственно. Средний уровень устойчивости (индекс устойчивости 0,4–0,6) в эпифитотийный год имели сорта ‘Аль Варис’, ‘Балкыш’, ‘Буяк’ и ‘Сакара’. Показано, что высокая и долговременная устойчивость формируется за счёт сочетания расоспецифичных и возрастных генов. Полученные данные указывают на различия в информативности и специфичности молекулярных маркеров, использованных для оценки устойчивости сортов. **Заключение.** Проявление устойчивости в полевых условиях определяется генетическим фоном сорта, агроклиматическими условиями и расовым составом возбудителя. Результаты исследования могут быть использованы для целенаправленного отбора исходного материала и реализации стратегии пирамидирования генов устойчивости в селекционных программах яровой пшеницы.

Ключевые слова: яровая мягкая пшеница, *Triticum aestivum* L., *Puccinia triticina*, *Lr*-гены, селекция на устойчивость, молекулярные маркеры, комбинации генов, Республика Татарстан

Благодарности: работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета «Приоритет-2030» тема № 125091510325-0 и в рамках государственного задания Минобрнауки России для ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН тема № 125031003428-9

Для цитирования: Костенко В.В., Баранова Н.Б., Асхадуллин Д-р.Ф., Асхадуллин Д-л.Ф., Пономарева М.Л. Комплексная оценка устойчивости сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции к бурой ржавчине с использованием молекулярно-генетических и полевых методов. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(1):18–28. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-05

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Костенко В.В., Баранова Н.Б., Асхадуллин Д-р.Ф., Асхадуллин Д-л.Ф., Пономарева М.Л., 2026

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-o5

Comprehensive evaluation of brown rust resistance in Tatarstan spring bread wheat cultivars using molecular genetics and field methods

Victoria V. Kostenko¹, Natalia B. Baranova¹, Damir F. Askhadullin^{1,2},
Danil F. Askhadullin², Mira L. Ponomareva^{1,2}

¹Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

²Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Tatar Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

Corresponding author: Victoria V. Kostenko, vvkostenko1@gmail.com

Background. Brown rust of bread wheat caused by *Puccinia triticina* Eriks. is one of the most harmful diseases in the temperate climate of the Russian Federation, causing significant crop losses and reducing grain quality. In this regard, an urgent task is to assess the resistance of wheat cultivars and the diversity of *Lr* genes in Tatarstan. Of greatest interest are the genes *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr34*, *Lr37/Yr17/Sr38* and *Lr46*, which provide resistance at various stages of plant development. The aim of the study was to comprehensively assess the brown rust resistance in spring bread wheat cultivars bred in Tatarstan using field and molecular genetic methods. **Materials and methods.** The resistance of 15 cultivars of bread wheat *Triticum aestivum* L. was assessed in 2023-2025 by the degree of damage to the flag and pre-flag leaves in field conditions at the experiment base of the Tatar Scientific Research Institute of Agriculture of the Kazan Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Resistance genes were identified using diagnostic DNA markers associated with six *Lr* genes. **Results and discussion.** The most resistant cultivars in field conditions were ‘Nastavnik’, ‘Khazine’ and ‘Chistopol’skaya’ characterized by the presence of combinations *Lr9+Lr24+Lr46*, *Lr19+Lr24* and *Lr9+Lr24+Lr34*, respectively. The cultivars ‘Al’ Varis’, ‘Balkysh’, ‘Bulyak’ and ‘Sakara’ had an average level of resistance (resistance index 0.4-0.6) in the epiphytotic year. It has been shown that high and long-term resistance is formed due to a combination of race-specific and age-related genes. The data obtained indicate differences in the informativeness and specificity of molecular markers used to assess the resistance of cultivars. **Conclusions.** The manifestation of resistance in field conditions is determined by the genetic background of the cultivars, agroclimatic conditions and the race composition of the pathogen. The results of the study can be used for the targeted selection of source material and the implementation of a strategy for pyramiding resistance genes in spring wheat breeding programs.

Keywords: spring bread wheat *Triticum aestivum* L., *Puccinia triticina*, *Lr*-genes, breeding for resistance, molecular markers, gene combinations, Republic of Tatarstan

Acknowledgements: the research was carried out using the funds of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030” of the Kazan Federal University of the Government of the Russian Federation project No. 125091510325-0 and as part of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of Russia to the Tatar Research Institute of Agriculture, Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences project No. 125031003428-9.

For citation: Kostenko V.V., Baranova N.B., Askhadullin D-r.F., Askhadullin D-l.F., Ponomareva M.L. Comprehensive evaluation of brown rust resistance in Tatarstan spring bread wheat cultivars using molecular genetics and field methods. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(1):18-28. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-o5

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal’s opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employers.

© Kostenko V.V., Baranova N.B., Askhadullin D-r.F., Askhadullin D-l.F., Ponomareva M.L., 2026

Введение

Буряя (листовая) ржавчина, вызываемая возбудителем *Puccinia triticina* Eriks., является одним из наиболее широко распространённых и экономически значимых заболеваний мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L., особенно в регионах с умеренным климатом (Askhadullin et al., 2023). Высокая вредоносность болезни обусловлена исключительной адаптивной пластичностью популяций патогена, их способностью к быстрой эволюции и преодолению устойчивости новых сортов (Koláriková et al., 2023).

В условиях постоянной изменчивости возбудителя обеспечение устойчивости пшеницы к бурой ржавчине остаётся одной из приоритетных задач современных селекционных программ. В годы, благоприятные для развития заболевания, потери урожая могут достигать 40-50% (Riaz, Wong, 2017; Singh et al., 2016), особенно в регионах с высокой плотностью возбудителя (Shishkin et al., 2018).

Наибольшая интенсивность эпифитотий бурой ржавчины наблюдается в ключевых зернопроизводящих регионах Российской Федерации, таких как Поволжье, Северный Кавказ и Центрально-Чернозёмный регион (Kiseleva et al., 2016; Zhogaleva et al., 2022). В условиях Поволжья заболевание регистрируется практически ежегодно, при этом эпифитотии фиксируются в среднем шесть раз за десятилетие (Gulyaeva et al., 2020).

Наиболее экологически безопасным и экономически оправданным методом борьбы с бурой ржавчиной является создание и возделывание сортов, обладающих генетически детерминированной устойчивостью (Xu et al., 2024). При выведении таких сортов требуется идентификация и валидация генов устойчивости. Применение молекулярно-генетических методов позволяет эффективно планировать гибридизацию, минимизировать дублирование аллелей устойчивости в родительских компонентах, а также проводить пирамидирование (комбинирование) нескольких генов, не всегда эффективных по отдельности (Mohan et al., 2025). Такой подход способствует стабилизации урожайности и снижению зависимости от применения фунгицидов (Omara et al., 2021).

На сегодняшний день известно и официально каталогизировано 83 гена устойчивости к бурой ржавчине пшеницы (*Lr* – *Leaf rust*) (Kolmer et al., 2023), причём почти половина из них интрогрессирована от диких сородичей культурной пшеницы: *Aegilops* L., *Thinopyrum* L., *Secale* L., *Triticum timopheevii* Zhuk., *Triticum dicoccoides* (Koern. ex Aschers. et Graebn) Schweinf. (Prasad et al., 2020). Однако в условиях производственных посевов эффективность многих из этих генов со временем снижается вследствие высокой генетической изменчивости патогена (Gulyaeva et al., 2023).

Наибольший интерес среди генов устойчивости представляют *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr34*, комплекс *Lr37/Yr17/Sr38* и *Lr46*, так как они обеспечивают устойчивость как

на стадии проростков, так и на стадии взрослого растения. Например, ген *Lr9*, интрогрессированный от *Aegilops umbellulata* Zhuk. ранее обеспечивал высокую устойчивость против широкого спектра патотипов гриба, однако из-за появления новых рас патогена его эффективность резко снизилась (Volkova et al., 2022). Ген *Lr19* сцеплен с геном устойчивости к стеблевой ржавчине *Sr25* и локализован в транслокации от *Thinopyrum ponticum* (Podp.) Barkworth & D.R. Dewey. Ген *Lr26*, связанный с сегментом генома ржи *Secale cereale* L., нередко выявляется в сортах с комплексной устойчивостью (Mourad et al., 2022). Гены *Lr34* и *Lr46* обеспечивают горизонтальный тип устойчивости, проявляющийся в замедленном развитии болезни, что способствует более длительной защите растений. Комплекс генов *Lr37/Yr17/Sr38*, интрогрессированный от *Aegilops ventricosa* Tausch, обеспечивает устойчивость одновременно к трём видам ржавчины.

Надёжная идентификация генов устойчивости в сортах и селекционных линиях является ключевым этапом для ускорения отбора перспективного исходного материала. Несмотря на сохраняющуюся значимость полевых фитопатологических методов оценки, их результаты во многом зависят от абиотических факторов и расового состава патогена. В этой связи молекулярные маркеры, специфичные к определённым генам устойчивости, становятся незаменимыми инструментами современной селекции (Raghunandan et al., 2022). Их применение позволяет выявлять наличие целевых аллелей без необходимости искусственного заражения растений. Совмещение молекулярной диагностики с агрономической и фитопатологической оценкой существенно повышает эффективность селекционного процесса и ускоряет создание новых сортов, устойчивых к бурой ржавчине, что особенно актуально в условиях глобального изменения климата и расширения ареала патогенов.

Цель исследования – молекулярная идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr34*, *Lr37/Yr17/Sr38*, *Lr46* у сортов мягкой яровой пшеницы татарстанской селекции с использованием диагностических ДНК-маркеров, а также оценка уровня устойчивости взрослых растений в условиях полевых испытаний.

Материалы и методы

В период 2023-2025 годов на экспериментальной базе ФИЦ КазНЦ РАН, расположенной в 15 км к юго-востоку от города Казань в агроклиматическом районе Предкамье Республики Татарстан, был проведен полевой скрининг сортов пшеницы на устойчивость к бурой ржавчине, возбудителем которой является грибок *Puccinia triticina* Erikss. (= *P. recondita*) Rob. ex Desm f. *sp. tritici* Eriks. et Henn. Опытный участок характеризовался серыми лесными, тяжелосуглинистыми почвами с высокой степенью окультуренности и слабокислой реакцией почвенного раствора, а также повышенным или высоким содержанием

основных элементов питания. Экспериментальные делянки площадью 10 м² были заложены в трехкратной повторности методом систематического размещения со смещением. Посев семян исследуемых сортов проводили рядовым способом в оптимальные агротехнические сроки, а именно в первой половине мая. Агротехнический уход за посевами включал гербицидную обработку против двудольных и злаковых сорняков в период кущения-начала выхода в трубку в соответствии с рекомендациями производителей.

Оценка устойчивости сортов в полевых условиях осуществлялась в питомнике экологического сортоиспытания на естественном инфекционном фоне. В исследовании были использованы 15 сортов яровой мягкой пшеницы селекции ФИЦ КазНЦ РАН, а в качестве восприимчивого контроля был использован сорт 'Ситара'. Степень поражения бурой ржавчиной флагового и предфлагового листьев оценивали в процентах по шкале (Peterson et al., 1948) с использованием методических рекомендаций ВНИИ фитопатологии (Sanin et al., 2008) Данная шкала предусматривает градацию устойчивости от 9 (очень высокая устойчивость, отсутствие признаков поражения) до 7 (устойчивость, поражение до 10%), и восприимчивости от 4-3 (восприимчивость, поражение до 40-65%) до 2-1 (высокая и очень высокая восприимчивость, поражение до 90-100%).

Расчет площади под кривой развития бурой ржавчины (ПКРБ) проводили согласно методическим рекомендациям по созданию инфекционных фонов для иммунологических исследований пшеницы (Sanin et al., 2008):

$$S = \frac{(a + b)t_1 + (b + c)t_2 + (c + d)t_3}{2}$$

где S – площадь под кривой развития болезни в условных единицах;

a, b, c, d – степень развития болезни при 1, 2, 3-м учетах, %; t₁, t₂, t₃ – количество дней между предыдущим и последующим учетом.

Для классификации сортов по уровню неспецифической устойчивости использовали индекс устойчивости (ИУ), который вычисляли как отношение площади под кривой развития болезни (S) исследуемого сорта к аналогичному показателю восприимчивого контроля 'Ситара'. ИУ сорта условно дифференцировали на четыре группы: 0,10-0,35 – высокий уровень устойчивости; 0,36-0,65 – средний; 0,66-0,80 – низкий; более 0,81 – восприимчивость (Makarov et al., 1991).

Для анализа метеорологических условий в ходе исследования были использованы данные, полученные с автоматической метеостанции «Сокол-1М», которая находится в непосредственной близости от опытных участков.

Гидротермический коэффициент (ГТК), рассчитанный по формуле Селянинова (Selyaninov, 1928), использовали для оценки степени увлажнения: ГТК≥1,0 интерпретировали как достаточное увлажнение, ГТК≤0,9 – как умеренное, а ГТК≤0,7 – как засушливость.

Погодные условия в период вегетации яровой пшеницы в годы исследования были различными. 2023 и 2024 годы в целом соответствовали среднемноголетним показателям по количеству выпадающих осадков и температурному режиму. Однако 2025 год отличился существенными отклонениями от среднемноголетних значений (Приложение 1/ Supplement 1¹). В мае и июне 2025 года наблюдалось избыточное увлажнение: в мае выпало 93 мм осадков при норме 36 мм, что привело к расчетному ГТК=2,04, указывающему на условия переувлажнения. Аналогичная ситуация сложилась в июне, когда выпало 102 мм осадков, а ГТК составил 1,86, также свидетельствуя о переувлажнении. Эти влажные условия, в сочетании с температурой около 20°C, которая является оптимальной для роста и развития возбудителя бурой ржавчины (Roelfs et al., 1992), создали благоприятную среду для эпифитотийного развития заболевания. В июле же, несмотря на среднесуточную температуру, близкую к среднемноголетним значениям (20,7°C), был зафиксирован ГТК=0,58, что указывает на условия недостатка влаги.

ДНК выделяли из листьев 7-дневных растений с помощью коммерческого набора diaGene для выделения ДНК из растительных тканей на спин-колонках («diaGene», Россия) согласно протоколу фирмы-изготовителя. Для амплификации маркерных последовательностей, ассоциированных с генами устойчивости к бурой ржавчине, использовали праймеры, синтезированные в «Евроген» (Москва, Россия), на основе соответствующих нуклеотидных последовательностей. Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) проводили в объеме 25 мкл в микроцентрифужных пробирках на программируемом амплификаторе «Терцик» («ДНК-технология», Россия). Реакционная смесь включала следующие компоненты: 100 мМ трис-НСl (рН 8,7), 50 мМ КСl, 2-3 мМ MgCl₂, 0,2 мМ дНТФ, 1 ед. Taq-полимеразы, 0,02 нг каждого праймера и исследуемую ДНК. Полученные фрагменты ДНК разделяли с помощью электрофореза в агарозном геле («Диаэм», Россия) при напряженности электрического поля 5-10 В/см. Буферная система (1×ТАЕ) включала 40 мМ трис-ацетата (рН 8,0), 2 мМ ацетат натрия; 291 мМ ЭДТА-Na. ДНК регистрировали по люминесценции dsGreen (10 мг/мл; «Биолабмикс», Россия) в ультрафиолетовом свете при длине волны 312 нм. Результаты визуализировали с помощью системы гель-документации ChemiDocXRS+ (BIO-RAD, США). Нуклеотидные последовательности праймеров представлены в Приложении 2/ Supplement 2.

¹ Приложения доступны в онлайн версии статьи/ The supplements are available in the online version of the paper: DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-05

Результаты и обсуждение

С середины 90-х годов XX века традиционные фитопатологические методы выявления генов устойчивости были дополнены молекулярно-генетическими подходами, что позволило значительно ускорить первичный скрининг и выявление генов *Lr* как индивидуально, так и в различных сочетаниях. Использование ДНК-маркеров особенно важно при идентификации частично эффективных и трудно определяемых сочетаний генов, оценка которых фитопатологическими методами затруднена из-за отсутствия в популяции патогена соответствующих вирулентных рас. Однако, несмотря на наличие маркеров для большинства известных генов *Lr*, только ограниченное число из них признано диагностическими и рекомендовано для использования в маркер-опосредованной селекции.

В годы изучения наблюдаемая интенсивность развития бурой ржавчины была различной. В 2023 году первые видимые проявления болезни в виде пустул бурой ржавчины были зафиксированы на пшенице 11 июля в фазу

налива зерна. Через шесть дней, при первой фитопатологической оценке посевов, максимальное распространение заболевания отмечалось у сорта 'Хаят': 20% листовой поверхности согласно шкале Петерсона. В последующий период интенсивность поражения возрастала незначительно, достигая 60% к фазе восковой спелости у восприимчивого сорта 'Ситара' (табл. 1).

В 2024 году первые пустулы бурой ржавчины появились 1 июля в период колошения. Инфекция на листьях развивалась медленно и достигла пика на развитых подгонах, находящихся в фазе восковой спелости. В этот период был проведен второй учет заболевания, при котором степень поражения листьев не превышала 30%.

В 2025 году наблюдалось повсеместное поражение пшеницы, достигавшее 100%, что свидетельствовало об эпифитотии. В таких условиях лишь сорт 'Хазинэ' продемонстрировал устойчивость, сохранив поражение на уровне 10%. К группе слабовосприимчивых были отнесены сорта 'Наставник' и 'Чистопольская' с поражением 20% и 30% соответственно.

Таблица 1. Степень поражения сортов яровой пшеницы бурой ржавчиной в 2023-2025 годы

Table 1. The extent of damage to spring wheat cultivars by brown rust in 2023-2025

Сорт/ Cultivar	Степень поражения, %/ The extent of damage, %						
	2023		2024		2025		
	17 июля/ Jul. 17	26 июля/ Jul. 26	16 июля/ Jul. 16	1 августа/ Aug. 1	16 июля/ Jul. 16	21 июля/ Jul. 21	6 августа/ Aug. 6
'Аль Варис'/ 'Al' Varis'	10	10	20	20	15	20	80
'Амир'/ 'Amir'	1	15	20	-	50	80	100
'Балкыш'/ 'Balkysh'	0	5	0	10	0	20	90
'Баракат' / 'Barakat'	1	5	5	10	10	80	100
'Буляк'/ 'Bulyak'	0	0	5	5	5	30	40
'Иделле'/ 'Idelle'	0	0	10	10	20	80	100
'Йолдыз'/ 'Ioldyz'	0	0	5	30	20	50	80
'Казанская юбилейная'/ 'Kazanskaya Yubileinaya'	5	10	5	20	20	40	80
'Надира'/ 'Nadira'	5	20	10	20	20	70	90
'Наставник'/ 'Nastavnik'	0	0	0	0	0	0	20
'Сакара'/ 'Sakara'	0	1	5	20	0	1	80
'Ситара'/ 'Sitara'	10	60	10	30	30	60	100
'Хазинэ'/ 'Khazine'	0	0	0	1	1	1	10
'Хаят'/ 'Khayat'	20	20	20	20	20	60	90
'Чистопольская'/ 'Chistopol'skaya'	0	0	0	5	0	1	30

Однократная полевая оценка в период максимального поражения не позволяет в полной мере оценить устойчивость сорта к заболеванию, поскольку не отражает динамику развития инфекции во времени. Пролонгированная стабилизация поражения на определенном уровне может свидетельствовать о проявлении горизонтального типа устойчивости. Для более точного отражения интенсивности и продолжительности поражения образцов рас-

считана площадь под кривой развития болезни (S). Наибольшая площадь под кривой была характерна для сорта 'Амир', у которого инфекция развивалась стремительно и достигала высоких значений. Наряду с ним высокими значениями этого параметра выделялись также сорта 'Баракат', 'Иделле', 'Надира' и 'Ситара'. Наименьшая площадь под кривой наблюдалась у сорта 'Хазинэ': S=93 (табл. 2).

Таблица 2. Результаты полевой оценки поражения бурой ржавчиной сортов яровой мягкой пшеницы в 2025 году (эпифитотия)

Table 2. Results of field evaluation of leaf damage by brown rust in spring bread wheat cultivars in 2025 (epiphytotic)

Сорт/ Cultivar	S ¹	ИУ/RI ²	Уровень устойчивости/ The level of resistance
‘Аль Варис’/ ‘Al’ Varis’	888	0,59	средний/ middle
‘Амир’/ ‘Amir’	1765	1,17	восприимчивый/ susceptible
‘Балкыш’/ ‘Balkysh’	930	0,62	средний/ middle
‘Баракат’/ ‘Barakat’	1665	1,19	восприимчивый/ susceptible
‘Буляк’/ ‘Bulyak’	648	0,43	средний/ middle
‘Иделле’/ ‘Idelle’	1690	1,12	восприимчивый/ susceptible
‘Йолдыз’/ ‘Ioldyz’	1215	0,81	восприимчивый/ susceptible
‘Казанская юбилейная’/ ‘Kazanskaya yubileynaya’	1110	0,74	низкий/ low
‘Надира’/ ‘Nadira’	1505	1,00	восприимчивый/ susceptible
‘Наставник’/ ‘Nastavnik’	160	0,11	высокий/ high
‘Сакара’/ ‘Sakara’	651	0,43	средний/ middle
‘Ситара’/ ‘Sitara’	1505	1,00	восприимчивый/ susceptible
‘Хазинэ’/ ‘Khazine’	93	0,06	высокий/ high
‘Хаят’/ ‘Hayat’	1400	0,93	восприимчивый/ susceptible
‘Чистопольская’/ ‘Chistopol’skaya’	251	0,17	высокий/ high

Примечания: ¹S – площадь под кривой развития бурой ржавчины; ²ИУ – индекс устойчивости сорта/ Notes: ¹S – the area under the brown rust development curve/ ²RI – the resistance index of the cultivar

Индекс устойчивости (ИУ) характеризует сорт по степени устойчивости относительно восприимчивого стандарта. Сорта ‘Наставник’ (0,11), ‘Хазинэ’ (0,06) и ‘Чистопольская’ (0,17) характеризуются высоким уровнем устойчивости к бурой ржавчине. Средний уровень устойчивости (ИУ=0,4-0,6) в эпифитотийный год имели образцы: ‘Аль Варис’, ‘Балкыш’, ‘Буляк’ и ‘Сакара’, семь изученных образцов из 15 имели низкий уровень устойчивости.

С использованием шести ДНК-маркеров был проведен скрининг сортов на наличие генов устойчивости к бурой ржавчине. Молекулярно-генетическое исследование на наличие *Lr*-генов устойчивости в исследуемых образцах представлено на электрофореграммах (Приложение 3/Supplement 3) и в таблице 3.

В настоящем исследовании проведена комплексная оценка устойчивости к бурой ржавчине 15 сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции в полевых условиях, а также идентификация шести *Lr*-генов с использованием молекулярных маркеров.

Идентификация гена *Lr9*. Для идентификации использовали STS маркер SCS5-550, дающий при амплификации фрагмент ДНК размером 550 пн. Согласно полученным данным (см. табл. 3, см. Приложение 3/ Supplement 3) данный маркер был выявлен у 11 из 15 анализируемых сортов мягкой яровой пшеницы: ‘Амир’, ‘Балкыш’, ‘Баракат’, ‘Буляк’, ‘Иделле’, ‘Йолдыз’, ‘Казанская юбилейная’, ‘Наставник’, ‘Ситара’, ‘Хаят’ и ‘Чистопольская’.

польская’.

Идентификация гена *Lr19*. Мягкая пшеница получила транслокацию от *Agropyron elongatum* (Host) Beauvois с геном *Lr19*, расположенным на хромосоме 7DL. Эта транслокация также ассоциирована с желтой окраской эндосперма (Zhang, Dubcovsky, 2008). Для выявления гена *Lr19* был использован молекулярный маркер SCS265. Ген *Lr19* относится к числу наиболее распространенных в российских генотипах (Gulyaeva et al., 2018). При амплификации ДНК с праймерами для этого маркера происходит синтез фрагмента ДНК длиной 512 пн. Данный маркер был обнаружен в генотипе только одного сорта, ‘Хазинэ’, который также отличается повышенным содержанием каротиноидов в зерне.

Идентификация гена *Lr24*. Для идентификации гена *Lr24* мы использовали ДНК-маркер J09, для которого специфичен фрагмент длиной 310 пн. В результате анализа данный фрагмент обнаруживается практически у всех исследуемых сортов, кроме ‘Иделле’ и ‘Казанская Юбилейная’.

Устойчивость к ржавчине, не зависящая от рас, часто включает в себя гены “slow rusting” (Caldwell, 1968), которые связаны с более длительным латентным периодом, увеличением времени между заражением и споруляцией, производством меньшего количества урединий, характеризующихся меньшими размерами (Kadkhodaei et al., 2012). *Lr34* и *Lr46*, согласно данным литературы, в настоящее время являются важными и наиболее широко

Таблица 3. Результаты ПЦР-анализа наличия или отсутствия маркеров устойчивости к бурой ржавчине у сортов яровой мягкой пшеницы

Table 3. PCR results regarding the presence/ absence of markers of resistance to leaf rust in spring bread wheat cultivars

Сорт пшеницы/ Cultivar	Регионы допуска/ Regions of admission ¹	Выявленные маркеры устойчивости пшеницы к бурой ржавчине/ Identified markers of wheat resistance to leaf rust					
		SCS5-550 <i>Lr9</i> 550 пн	SCS265 <i>Lr19</i> 512 пн	J09 <i>Lr24</i> 310 пн	csLv34 <i>Lr34</i> 150/249 пн	WMC44 <i>Lr46</i> 242 пн	Ventriup/LN2 <i>Yr17/Lr37/Sr38</i> 262 пн
‘Аль Варис’/ ‘Al’ Varis’	7	–	–	+	– (249)	–	–
‘Амир’/‘Amir’	2, 4	+	–	+	+(150/249)	–	–
‘Балкыш’/ ‘Balkysh’	7	+	–	+	– (249)	+	–
‘Баракат’/ ‘Barakat’	–	+	–	+	– (249)	–	–
‘Буляк’/‘Bulyak’	9	+	–	+	– (249)	–	–
‘Иделле’/‘Idelle’	7	+	–	–	– (249)	–	–
‘Йолдыз’/ ‘Ioldyz’	4, 5, 7	+	–	+	– (249)	+	–
‘Казанская юбилейная’/ ‘Kazanskaya yubileinaya’	7	+	–	–	+(150)	+	–
‘Надира’/ ‘Nadira’	4, 7, 9	–	–	+	– (249)	+	–
‘Наставник’/ ‘Nastavnik’	–	+	–	+	– (249)	+	–
‘Сакара’/‘Sakara’	–	–	–	+	+(150/249)	+	–
‘Ситара’/‘Sitara’	4, 7	+	–	+	– (249)	–	–
‘Хазинэ’/ ‘Khazine’	9	–	+	+	– (249)	–	–
‘Хаят’/‘Hayat’	7	+	–	+	+(150/249)	+	–
‘Чистопольская’/ ‘Chistopol’skaya’	–	+	–	+	+(150)	–	–

изученными генами “slow rusting” (Yan et al., 2021).

Для идентификации гена *Lr34* нами был использован STS-маркер csLV34, дающий при амплификации фрагменты размером 150 пн и 249 пн (Lagudah et al., 2006). Фрагмент размером 150 пн, ассоциированный с доминантным аллелем, был выявлен у пяти сортов: ‘Амир’, ‘Сакара’, ‘Хаят’, ‘Казанская Юбилейная’ и ‘Чистопольская’. Последние два сорта являются гомозиготами по доминантному аллелю. Ген устойчивости к бурой ржавчине *Lr34* (Samborski, Dyck, 1982), ранее *LrT2*, обеспечивает устойчивость взрослых растений (от англ. Adult Plant Resistance, APR), эффективность которой зависит от генетического фона и условий роста (Lagudah et al., 2006).

Идентификация гена *Lr46*. Наличие гена *Lr46*, обеспечивающего резистентность к бурой ржавчине, определяли с использованием молекулярного маркера WMC44, который при амплификации даёт фрагмент размером 242 пн и обнаруживается в генотипе семи сортов: ‘Бал-

кыш’, ‘Йолдыз’, ‘Казанская Юбилейная’, ‘Надира’, ‘Наставник’, ‘Сакара’ и ‘Хаят’. Ген *Lr46* обеспечивает многофакторную устойчивость: к желтой ржавчине *Yr29*, стеблевой ржавчине *Sr58*, мучнистой росе *Pm39*.

Идентификация гена *Lr37*. Для идентификации гена *Lr37* использовали SCAR маркер VENTRIUP-LN2, представляющий собой транслокацию 2NS/2AS. Она внесена в геном пшеницы от дикорастущего сородича *Aegilops ventricosa* Tausch и содержит гены *Lr37*, *Yr17* и *Sr38*, которые детерминируют устойчивость пшеницы на уровне проростков к бурой, желтой и стеблевой ржавчинам (Agarwal et al., 2021; Skolotneva et al., 2021). Наличие гена *Lr37* в генотипе обусловлено доминантной аллелью *Ventriup/LN2*, дающей при амплификации фрагмент размером 262 пн. В наших исследованиях маркер, тесно сцепленный с геном *Lr37*, отсутствовал у всех изученных сортов.

Согласно полученным данным, 70% изученных сортов татарстанской селекции несут ген *Lr9*, признан-

ный одним из наиболее эффективных генов устойчивости в мировой практике (Gulyaeva et al., 2009). Однако его эффективность в последние годы снизилась из-за массового распространения вирулентных рас *Puccinia triticina*, что согласуется с данными И.Н. Леоновой с соавторами (Leonova et al., 2020), отметившими утрату защитного эффекта *Lr9* и *Lr26* в российских сортах. Это подтверждается высокой восприимчивостью сорта 'Иделле', содержащего только *Lr9*. Использование этого гена в комбинации, например, с *Lr24*, позволяет повысить уровень устойчивости создаваемых сортов (Roelfs et al., 1992). Отсутствие дифференциации сортов по наличию гена *Lr9* позволяет предположить, что использованные молекулярные маркеры обладают недостаточной информативностью. Для уточнения выявленного феномена планируется проведение дополнительных исследований с применением альтернативных маркеров, в частности J13 (Leonova et al., 2020; Zhang et al., 2022).

Согласно данным Гульятеевой и Шайдаюк (Gulyaeva, Shaydayuk, 2021), российские сорта мягкой пшеницы характеризуются наличием как высокоэффективных генов *Lr24*, *Lr25*, *Lr28*, *Lr29*, *Lr41*, *Lr47*, *Lr66*, так и частично эффективных *Lr9*, *Lr19* и генов устойчивости взрослых растений *Lr21*, *Lr34*, *Lr35*, *Lr37*. Наши результаты согласуются с этими наблюдениями: большинство татарстанских сортов содержат комбинации из *Lr9*, *Lr19*, *Lr24* и *Lr34*, однако устойчивость в полевых условиях существенно различается.

Устойчивость, обеспечиваемая сочетанием расоспецифичных и неспецифичных (возрастных) генов, признака наиболее надёжной и долговечной формой защиты пшеницы (Prasad et al., 2020; Kiseleva et al., 2016). К числу таких APR-генов относят *Lr34*, *Lr46*, *Lr67* и *Lr68*, проявляющих эффективность на поздних стадиях онтогенеза независимо от расового состава патогена (Liu et al., 2021). Эти гены обеспечивают долговременную «slow rusting» устойчивость в полевых условиях.

Важной стратегией современной селекции является пирамидирование генов *Lr* – объединение в одном генотипе нескольких генов, контролирующих один и тот же признак и усиливающих действие друг друга (Leonova et al., 2020). Комбинации *Lr34+Lr46* или *Lr34+Lr67* рассматриваются как наиболее надежные, обеспечивающие долговременную устойчивость в полевых условиях (Dakouri et al., 2013; McCallum et al., 2016; Vokore et al., 2022). Результаты, полученные нами, демонстрируют различную эффективность одинаковых генетических комбинаций генов *Lr*: сорта 'Амир', 'Баракат' и 'Ситара', имеющие комбинацию генов *Lr9+Lr24*, проявили высокую восприимчивость к бурой ржавчине, что указывает на частичное преодоление действия этих генов местными расами патогена. В то же время сорт 'Чистопольская', несущий комбинацию генов *Lr9+Lr24+Lr34*, демонстрировал устойчивость к бурой ржавчине в полевых условиях. В исследовании О.А. Барановой с соавторами (Baranova et al., 2023) у данного сорта был идентифици-

рован ген *Sr57/Lr34*. В той же работе молекулярное тестирование на наличие гена устойчивости к бурой ржавчине *Lr24*, тесно сцепленного с геном устойчивости к стеблевой ржавчине *Sr24*, дало отрицательные результаты у всех изученных сортов, за исключением одного. Аналогичные данные приводятся в другом исследовании (Вагер, 2020). В связи с этим можно предположить, что использование в нашем исследовании маркера J09/1 для гена *Lr24* может приводить к ложноположительным результатам и, следовательно, маркер не может быть рекомендован для надёжной идентификации гена *Lr24* в практике маркер-опосредованной селекции. Для идентификации этого гена в сортах российской селекции Е.И. Гульятеева с соавторами (Gulyaeva et al., 2019) предлагают для гена *Lr24/Sr24* использовать два маркера: *Sr24#12* и *Sr24#50*.

Наиболее устойчивыми среди изученных оказались сорта 'Наставник', 'Хазинэ' и 'Чистопольская'. У сорта 'Наставник' выявлено присутствие трёх генов: *Lr9+Lr24+Lr46*, что подтверждает закономерность повышения устойчивости при пирамидировании APR-генов. Высокая устойчивость сорта 'Наставник' (ИУ=0,11) полностью согласуется с результатами, полученными с использованием молекулярных маркеров. Сорт 'Хазинэ' также демонстрирует высокую устойчивость в полевых условиях (поражение в год эпифитотии ≤10%) благодаря комбинации генов *Lr19* и *Lr24*. Каждый из этих генов сам по себе обладает частичной эффективностью, однако их сочетание, возможно, усиливается за счет действия не установленных дополнительных генов, которые предстоит выявить.

Сорта 'Казанская Юбилейная', 'Сакара' и 'Хаят' несут комбинацию *Lr34+Lr46*, которая по опубликованным данным (Vokore et al., 2022) обычно обеспечивает долговременную устойчивость. Однако в наших условиях эти сорта показали лишь среднюю или низкую устойчивость. Вероятно, это связано с влиянием климатических факторов – в частности, повышенных температур, при которых эффективность *Lr34* снижается (Plotnikova et al., 2018; Leonova et al., 2020). В не эпифитотийные годы сорта 'Балкыш', 'Баракат', 'Буляк', 'Хазинэ', 'Чистопольская' и 'Иделле' показали поражение в поле не выше 10%, что свидетельствует о наличии у них эффективных комбинаций генов устойчивости и/или адаптивных физиологических механизмов.

Комплекс *Lr37/Yr17/Sr38* (маркер Ventriup/LN2), обеспечивающий устойчивость к бурой, жёлтой и стеблевой ржавчинам, не был обнаружен ни в одном из изученных нами образцов. С использованием праймеров для маркера Ventriup/LN2 не был выявлен ген *Sr38* также и у сортов яровой пшеницы (Baranova et al., 2023). Это указывает либо на ограниченное использование этого интрогрессивного блока (от *Aegilops ventricosa*) в селекции сортов татарстанского происхождения, либо невысокую специфичность данного маркера в отношении генов устойчивости к бурой ржавчине.

Полученные результаты подчёркивают, что ДНК мар-

керы являются индикаторами, а не абсолютным доказательством устойчивости сорта. Не все выбранные для анализа маркеры обладают необходимой специфичностью, что требует дальнейшей верификации изученных сортов с использованием большей панели маркеров. Эффективность того или иного гена зависит от генетического фона растения, экологических условий и расового состава патогена. Поэтому достоверную оценку устойчивости возможно получить только при комплексном подходе, включающем как молекулярно-генетический анализ, так и фитопатологические испытания, как в условиях естественного заражения, так и при искусственной инокуляции или эпифитотии. Совмещение этих методов обеспечивает надёжную интерпретацию результатов и позволяет выявлять генотипы с потенциально долговременной устойчивостью, пригодные для дальнейшего использования в селекционных программах в качестве источников устойчивости.

Заключение

Для оценки генетического разнообразия современных татарстанских сортов яровой мягкой пшеницы, допущенных к выращиванию в Российской Федерации, по устойчивости к бурой листовой ржавчине была проведена полевая оценка, а также ДНК-анализ на наличие/отсутствие генов устойчивости *Lr*. Результаты идентификации генов *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr34*, *Lr46* выявили наличие гена *Lr9* у 70% изучаемых сортов. За три года полевых испытаний эпифитотия бурой ржавчины наблюдалась лишь в 2025 году. Среди 15 изученных сортов татарстанской селекции наибольшей устойчивостью к бурой ржавчине отличились 'Наставник', 'Хазинэ' и 'Чистопольская', что подтверждено как молекулярно-генетическими методами, так и полевыми данными. Устойчивость этих сортов обеспечивалась разными комбинациями исследованных генов *Lr9+Lr24+Lr46* у сорта 'Наставник', *Lr19+Lr24* у сорта 'Хазинэ' и *Lr9+Lr24+Lr34* у сорта 'Чистопольская'. Сорт 'Хазинэ' характеризовался стабильно высокой устойчивостью к бурой ржавчине в течение всего периода наблюдений. Исключением стал 2025 год, когда в условиях выраженной эпифитотии уровень поражения составил около 10%. Вероятно, устойчивость данного сорта обусловлена вкладом **дополнительных, пока не идентифицированных генетических детерминант.**

Исследование выявило значительное генетическое разнообразие татарстанских сортов по комплексу генов *Lr* и подтвердило перспективность стратегии пирамидирования генов с обязательной полевой валидацией их эффективности. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего отбора и создания сортов пшеницы с долговременной устойчивостью к бурой листовой ржавчине.

- Agarwal P., Jha S.K., Sharma N.K., Raghunanadan K., Mallick N., Niranjana M., Saharan M.S., Singh J.B., Vinod. Identification of the improved genotypes with 2NS/2AS translocation through molecular markers for imparting resistance to multiple biotic stresses in wheat. *The Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2021;81(4):522-528. DOI: 10.31742/IJGPB.81.4.4
- Askhadullin D.F., Askhadullin D.F., Vasilova N.Z., Tazutdinova M.R., Khusainova I.I., Gaifullina G.R. Characteristics of the efficiency of leaf rust resistance genes of spring wheat in the conditions of the Republic of Tatarstan. *Grain Economy of Russia*. 2023;(4):109-113. [In Russian] (Асхадуллин Д.Ф., Асхадуллин Д.Ф., Василова Н.З., Тазутдинова М.Р., Хусайнова И.И., Гайфуллина Г.Р. Характеристика эффективности генов устойчивости к листовой бурой ржавчине яровой пшеницы в условиях Республики Татарстан. *Зерновое хозяйство России*. 2023;(4):109-113). DOI: 10.31367/2079-8725-2023-87-4-109-113
- Baranova O.A., Solyanikova V., Kyrova E., Kon'kova E., Gaponov S., Sergeev V., Shevchenko S., Mal'chikov P., Dolzhenko D., Beshalova L., Ablova I., Tarhov A., Vasilova N., Askhadullin D., Askhadullin D., Sibikeev S. Evaluation of resistance to stem rust and identification of *Sr* genes in Russian spring and winter wheat cultivars in the Volga region. *Agriculture*. 2023;13(3):635. DOI: 10.3390/agriculture13030635
- Başer İ. Comparison of bread wheat genotypes for leaf rust resistance genes. *Journal of Agricultural Sciences*. 2020;26(1):22-31.
- Bokore F.E., Knox R.E., Hiebert C.W., Cuthbert R.D., DePauw R.M., Meyer B., N'Diaye A., Pozniak C.J., McCallum B.D. A combination of leaf rust resistance genes, including *Lr34* and *Lr46*, is the key to the durable resistance of the Canadian wheat cultivar, Carberry. *Frontiers in Plant Science*. 2022;6(12):775383. DOI: 10.3389/fpls.2021.775383
- Caldwell R.M. Breeding for general and/or specific plant disease resistance. *Proceedings of the Third International Wheat Genetics Symposium*. Canberra: Australian Academy of Sciences; 1968. p.263-272.
- Dakouri A., McCallum B.D., Radovanovic N., Cloutier S. Molecular and phenotypic characterization of seedling and adult plant leaf rust resistance in a world wheat collection. *Molecular Breeding*. 2013;32:663-677. DOI: 10.1007/s11032-013-9899-8
- Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L. Identification of leaf rust resistance genes in the new Russian varieties of common wheat. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(2):15-27. [in Russian] (Гульятеева 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
- Gulyaeva E., Gannibal P., Shaydayuk E. Long-term studies of wheat leaf rust in the north-western region of Russia. *Agriculture*. 2023; 13(2):255. DOI: 10.3390/agriculture13020255
- Gulyaeva E.I., Kanyuka I.A., Alpatova N.V., Baranova O.A., Dmitriev A.P., Pavlyushin V.A. Molecular approaches in identifying leaf rust resistance genes in Russian wheat varieties. *Russian Agricultural Sciences*. 2009;35(5):316-319. DOI: 10.3103/S1068367409050085
- Gulyaeva E., Shaydayuk E., Rsaliyev A. Identification of leaf rust resistance genes in spring soft wheat samples developed in Russia and Kazakhstan. *Plant Protection News*. 2019;(3):41-49. [in Russian] (Гульятеева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Рсалиев А.С. Идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине у образцов яровой мягкой пшеницы российской и казахстанской селекции. *Вестник защиты растений*. 2019;(3):41-49). DOI: 10.31993/2308-6459-2019-3(101)-41-49
- Gulyaeva E., Shaydayuk E., Kazartsev I., Akhmetova A., Kosman E. Microsatellite analysis of *Puccinia triticina* from *Triticum* and *Aegilops* hosts. *Australasian Plant Pathology*. 2018;47(2):163-170. DOI: 10.1007/s13313-018-0542-3
- Gulyaeva E.I., Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Shaydayuk E.L. Enlargement of genetic diversity of spring bread wheat resistance to leaf rust (*Puccinia triticina* Eriks.) in lower Volga region. *Agricultural Biology*. 2020;55(1):27-44. [in Russian] (Гульятеева Е.И., Сибикеев С.Н., Дружин А.Е., Шайдаюк Е.Л. Расширение генетического разнообразия сортов яровой мягкой пшеницы

- по устойчивости к бурой ржавчине (*Puccinia triticina* Eriks.) в Нижнем Поволжье. *Сельскохозяйственная биология*. 2020;55(1):27-44. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.27rus
- Kadkhodaei M., Dadkhodaie A., Assad M.T., Haidari B., Mostowfizadeh-Ghalmfarsa R. Identification of the leaf rust resistance genes *Lr9*, *Lr26*, *Lr28*, *Lr34*, and *Lr35* in a collection of Iranian wheat genotypes using STS and SCAR markers. *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 2012;15:267-274. DOI: 10.1007/s12892-012-0035-9
- Kiseleva M.I., Kolomiets T.M., Pakholkova E.V., Zhemchuzhina N.S., Lubich V.V. The differentiation of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars for resistance to the most harmful fungal pathogens. *Agricultural Biology*. 2016;51(3):299-309. [in Russian] (Киселева М.И., Коломиец Т.М., Пахолкова Е.В., Жемчужина Н.С., Любич В.В. Дифференциация сортов озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по устойчивости к фитопатогенным грибам. *Сельскохозяйственная биология*. 2016;51(3):299-309). DOI: 10.15389/agrobiology.2016.3.299rus
- Koláriková L., Svobodová-Leišová L., Hanzalová A., Holubec V., Jungová M., Esimbekova M. Leaf rust resistance genes in *Aegilops* genus: occurrence and efficiency. *European Journal of Plant Pathology*. 2023;167:335-348. DOI: 10.1007/s10658-023-02712-0
- Kolmer J.A., Bajgain P., Rouse M.N., Li J., Zhang P. Mapping and characterization of the recessive leaf rust resistance gene *Lr83* on wheat chromosome arm 1DS. *Theoretical and Applied Genetics*. 2023;136(5):115. DOI: 10.1007/s00122-023-04361-7
- Lagudah E.S., McFadden H., Singh R., Huerta-Espino J., Bariana H., Spielmeier W. Molecular genetic characterization of the *Lr34/Yr18* slow rusting resistance gene region in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;114:21-30. DOI: 10.1007/s00122-006-0406-z
- Leonova I.N., Skolotneva E.S., Salina E.A. Genome-wide association study of leaf rust resistance in Russian spring wheat varieties. *BMC Plant Biology*. 2020;20 (Suppl 1):135. DOI: 10.1186/s12870-020-02333-3
- Liu Y., Gebrewahid T., Zhang P., Li Z., Liu D. Identification of leaf rust resistance genes in common wheat varieties from China and foreign countries. *Journal of Integrative Agriculture*. 2021;20:1302-1313. DOI: 10.1016/S2095-3119(20)63371-8
- Makarov A.A., Strizhekozin Yu.A., Solomatina D.A., Demicheva T.A., Kuhtina A.V. Quantitative classification of wheat varieties according to the degree of race-nonspecific resistance to leaf rust (Kolichestvennaya klassifikatsiya sortov pshenitsy po stepeni rasonespetsificheskoy ustoychivosti k buroy rzhavchine). In: *Immunity of agricultural crops to pathogens of fungal diseases (Immunitet sel'skokhozyaystvennykh kul'tur k vozбудитelyam gribnykh bolezney)*. Moscow; 1991. p.105-110. [in Russian] (Макаров А.А., Стрижекозин Ю.А., Соломатин Д.А., Демичева Т.А., Кухтина А.В. Количественная классификация сортов пшеницы по степени расонеспецифической устойчивости к бурой ржавчине. В кн.: *Иммунитет сельскохозяйственных культур к возбудителям грибных болезней*. Москва; 1991. С.105-110).
- McCallum B.D., Hiebert C.W., Cloutier S., Bakkeren G., Rosa S.B., Humphreys D.G., Marais G.F., McCartney C.A., Panwar V., Rampitsch C., Saville B.J., Wang X. A review of wheat leaf rust research and the development of resistant cultivars in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2016;38:1-18. DOI: 10.1080/07060661.2016.1145598
- Mohan R., Singh V.K., Chetan K.K., Rani L.U., Sameriya K.K., Kumar S., Bainsla N.K., Senthilraja G., Saharan M.S. Multiple patho-phenotyping and molecular analysis to characterize wide-spectrum durable leaf rust resistance in wheat collections from India. *Frontiers in Microbiology*. 2025;16:1596282. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1596282
- Mourad A.M.I., Draz I.S., Omar G.E., Börner A., Esmail S.M. Genome-Wide Screening of Broad-Spectrum Resistance to Leaf Rust (*Puccinia triticina* Eriks) in Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:921230. DOI: 10.3389/fpls.2022.921230
- Omara R.I., Nehela Y., Mabrouk O.I., Elsharkawy M.M. The emergence of new aggressive leaf rust races with the potential to supplant the resistance of wheat cultivars. *Biology*. 2021;10:925. DOI: 10.3390/biology10090925
- Peterson R.F., Campbell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Canadian Journal of Research*. 1948;26(5):496-500. DOI: 10.1139/cjr48c-033
- Plotnikova L.Ya., Meshkova L.V., Gulyaeva E.I., Mitrofanova O.P., Lapochkina I.F. A tendency towards leaf rust resistance decrease in common wheat introgression lines with genetic material from *Aegilops speltoides* Tausch. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(5):560-567. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Мешкова Л.В., Гульяева Е.И., Митрофанова О.П., Лапочкина И.Ф. Тенденция преодоления устойчивости к бурой ржавчине интрогрессивных линий мягкой пшеницы с генетическим материалом *Aegilops speltoides* Tausch. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(5):560-567). DOI: 10.18699/VJ18.395
- Prasad P., Savadi S., Bhardwaj S.C., Gupta P.K. The progress of leaf rust research in wheat. *Fungal Biology*. 2020;124:537-550. DOI: 10.1016/j.funbio.2020.02.013
- Raghuandan K., Tanwar J., Patil S.N., Chandra A.K., Tyagi S., Agarwal P., Mallick N., Murukan N., Kumari J., Sahu T.K., Jacob S.R., Kumar A., Yadav S., Nyamgoud S., Vinod, Singh A.K., Jha S.K. Identification of novel broad-spectrum leaf rust resistance sources from khapli wheat landraces. *Plants*. 2022;11(15):1965. DOI: 10.3390/plants11151965
- Riaz M., Wong Y. Estimation of yield losses due to leaf rust and late seeding on wheat (*Triticum aestivum* L.) variety Seher-06 in district Faisalabad, Punjab, Pakistan. *Advances in Biotechnology & Microbiology*. 2017;5(2):555657. DOI: 10.19080/AIBM.2017.05.555657
- Roelfs A.P. Barley stripe rust in Texas. *Plant Disease*. 1992;76:538. DOI: 10.1094/PD-76-0538C
- Samborski D.J., Dyck P.L. Enhancement of resistance to *Puccinia recondita* by interactions of resistance genes in wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 1982;4(2):152-156. DOI: 10.1080/07060668209501317
- Sanin S.S., Neklesa N.P., Sanina A.A., Paholkova E.V. Methodological recommendations on the creation of infectious backgrounds for immunological studies of wheat (Metodicheskie rekomendatsii po sozdaniyu infektsionnykh fonov dlya immunologicheskikh issledovaniy pshenitsy). Moscow; 2008. [in Russian] (Санин С.С., Неклеса Н.П., Санина А.А., Пахолкова Е.В. Методические рекомендации по созданию инфекционных фонов для иммунологических исследований пшеницы. Москва; 2008).
- Selyaninov G.T. On agricultural climate assessment (O sel'skokhozyaystvennoy otsenke klimata). In: *Works on agricultural meteorology = Trudy po sel'skokhozyaystvennoy meteorologii. Issue 20*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1928. p.165-177. [in Russian] (Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата. В кн.: *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*, Ленинград: Гидрометеоиздат; 1928. Вып. 20. С.165-177).
- Shishkin N.V., Derova T.G., Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L. Identification of the genes resistant to brown rust in winter soft wheat varieties with the use of conventional and modern research methods. *Grain Economy of Russia*. 2018;(5):63-67. [in Russian] (Шишкин Н.В., Дерова Т.Г., Гульяева Е.И., Шайдаюк Е.Л. Определение генов устойчивости к бурой ржавчине у сортов озимой мягкой пшеницы с использованием традиционных и современных методов исследований. *Зерновое хозяйство России*. 2018;(5):63-67). DOI: 10.31367/2079-8725-2018-59-5-63-67
- Singh R.P., Singh P.K., Rutkoski J., Hodson D.P., He X., Jørgensen L.N., Hovmöller M.S., Huerta-Espino J. Disease impact on wheat yield potential and prospects of genetic control. *Annual Review of Phytopathology*. 2016;54(1):303-22. DOI: 10.1146/annurev-phyto-080615-095835
- Skolotneva E.S., Kelbin V.N., Shamanin V.P., Boyko N.I., Aparina V.A., Salina E.A. The gene *Sr38* for bread wheat breeding in Western Siberia. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(7):740-745. DOI: 10.18699/VJ21.084
- Volkova G., Kudinova O., Vaganova O., Agapova V. Effectiveness of leaf rust resistance genes in the adult and juvenile stages in Southern Russia in 2011-2020. *Plants*. 2022;11(6):793. DOI: 10.3390/plants11060793
- Xu B., Shen T., Chen H., Li H., Rehman S.U., Lyu S., Hua L., Wang G., Zhang C., Li K., Li H., Lan C., Chen G.Y., Hao M., Chen S. Mapping and characterization of rust resistance genes *Lr53* and

- Yr35* introgressed from *Aegilops* species. *Theoretical and Applied Genetics*. 2024;137(5):113. DOI: 10.1007/s00122-024-04616-x
- Yan X., Gebrewahid T.-W., Dong R., Li X., Zhang P., Yao Z., Li Z. Identification of known leaf rust resistance genes in bread wheat cultivars from China. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2021;57:91-101. DOI: 10.17221/6/2021-CJGPB
- Zhang L., Zhao X., Liu J., Wang X., Gong W., Zhang Q., Liu Y., Yan H., Meng Q., Liu D. Evaluation of the resistance to Chinese predominant races of *Puccinia triticina* and analysis of effective leaf rust resistance genes in wheat accessions from the U.S. National Plant Germplasm System. *Frontiers in Plant Science*. 2022;(13):1054673. DOI: 10.3389/fpls.2022.1054673
- Zhang W., Dubcovsky J. Association between allelic variation at the *Phytoene synthase 1* gene and yellow pigment content in the wheat grain. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008;116:635-645. DOI: 10.1007/s00122-007-0697-8
- Zhogaleva O.S., Vozzhova N.N., Shumskaya O.V., Dubina A.Yu., Ivanisov M.M. Screening of leaf rust resistance genes (*Lr*) in the breeding lines of winter bread wheat. *Grain Economy of Russia*. 2022;(6):23-28. [in Russian] (Жогалева О.С., Вождова Н.Н., Шумская О.В., Дубина А.Ю., Иванисов М.М. Скрининг генов устойчивости к бурой ржавчине (*Lr*) у селекционных линий озимой мягкой пшеницы. *Зерновое хозяйство России*. 2022;14(6):23-28). DOI: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-23-28

Информация об авторах

Виктория Викторовна Костенко, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Геномика растений»; доцент, кафедра генетики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18, корп. 1, vvkostenkol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1118-1471>

Наталья Борисовна Баранова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Геномика растений»; доцент, кафедра генетики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18, корп. 1, natalja-b@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9109-7378>

Дамир Фидусович Асхадуллин, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория селекции яровой пшеницы, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», 420059 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Оренбургский тракт, 48; старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Геномика растений», Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18, корп.1, trulik@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2717-7178>

Данил Фидусович Асхадуллин, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория селекции яровой пшеницы, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420059 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Оренбургский тракт, 48, tatnii-rape@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2601-6735>

Мира Леонидовна Пономарева, доктор биологических наук, заведующая, научно-исследовательская лаборатория «Геномика растений», профессор, кафедра генетики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18, корп.1; главный научный сотрудник, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420059 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Оренбургский тракт, 48, smponomarev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1648-3938>

Information about the authors

Victoria V. Kostenko, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Research Laboratory “Plant Genomics”; Associate Professor, Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420008 Russia, vvkostenkol@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1118-1471>

Natalia B. Baranova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Research Laboratory “Plant Genomics”; Associate Professor, Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420008 Russia, natalja-b@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9109-7378>

Damir F. Askhadullin, Senior Researcher, Research Laboratory “Plant Genomics”, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420008 Russia; Leading Researcher, Spring Wheat Breeding Laboratory, Tatar Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, 48, Orenburgskii tract Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420059 Russia, trulik@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2717-7178>

Danil F. Askhadullin, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Spring Wheat Breeding Laboratory, Tatar Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, 48, Orenburgskii tract Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420059 Russia, tatnii-rape@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2601-6735>

Mira L. Ponomareva, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head, Research Laboratory “Plant Genomics”, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420008 Russia; Chief Researcher, Tatar Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, 48, Orenburgskii tract Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420059 Russia, smponomarev@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1648-3938>

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 15.11.2025; одобрена после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted on 15.11.2025; approved after reviewing on 12.02.2026; accepted for publication on 20.03.2026.