

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья

УДК 633.11:632.4:631.523.11

DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-270-284



Резистентность интрогрессивных образцов мягкой пшеницы с генетическим материалом родов *Triticum* и *Aegilops* к ржавчинным болезням в Западной Сибири

Л. Я. Плотникова¹, В. В. Кнауб¹, Т. М. Жанболат¹, Е. С. Сколотнева², Ю. В. Лаприна², Е. В. Зуев³

¹ Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Омск, Россия

² Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики
Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений
имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Людмила Яковлевна Плотникова, lya.plotnikova@omgau.org

Актуальность. Для защиты сортов мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) от ржавчинных болезней актуально расширение генетической базы селекции за счет родственных видов.

Материалы и методы. Материалом для исследований послужили 39 образцов яровой мягкой пшеницы с идентифицированными и неизвестными генами устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам (*Lr* и *Sr*) видов родов *Triticum* L. и *Aegilops* L. Оценка устойчивости образцов к ржавчинным болезням проводили в 2020–2024 гг. в полевых условиях Западной Сибири (г. Омск) или в лабораторных условиях на стадии проростков. При эпифитотии бурой и стеблевой ржавчины в 2024 г. образцы охарактеризовали с помощью показателей «Площадь под кривой развития болезни» (ПКРБ) и «Индекс устойчивости» (ИУ).

Результаты и заключение. Основная часть образцов была высокоустойчива к бурой и стеблевой ржавчинам в 2020–2022 гг. На фоне эпифитотии 2024 г. высокую устойчивость к двум болезням проявили образцы 'Дуэт' (*Lr9*), KS90WGRC10 (*Lr39*), линии сорта 'Thatcher' (*Tc*) с идентифицированными генами *Lr18*, *Lr28*, *Lr35/Sr39*, *Lr37/Sr38*, *Lr50*, *Lr51*, а также 'Pavon' (*Lr47*), TA5602 (*Lr57*), Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), 'Yektay 406', АНК-40. К стеблевой ржавчине были устойчивы *TcLr21*, *TcLr22a*, W2691 SR36TT1, 'Вировка', Allard 52-1-1-17-1, 'Gouritz', 'Livanjka', W2691 SR37TT2, 'Гартус 598', Wb. 58633, Лютесценс 849-81, Л-592, 'Элемент 22'. В образцах Allard 52-1-1-17-1, 'Gouritz' и 'Livanjka' с помощью ПЦР-анализа идентифицирован ген *Sr36*. Устойчивые к болезням образцы имели низкую урожайность, что необходимо учитывать при их использовании в селекционных программах.

Ключевые слова: *Triticum aestivum*, родственные виды, бурая ржавчина, стеблевая ржавчина

Благодарности: работа выполнена по теме «Исследование фундаментальных основ устойчивости культурных и диких злаков к грибным болезням и абиотическим факторам среды», государственная регистрация № 121111100022-4. Молекулярно-генетические исследования проведены в рамках тематического плана Института цитологии и генетики по теме FWN-2025-0020.

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

Для цитирования: Плотникова Л.Я., Кнауб В. В., Жанболат Т.М., Сколотнева Е.С., Лаприна Ю.В., Зуев Е.В. Резистентность интрогрессивных образцов мягкой пшеницы с генетическим материалом родов *Triticum* и *Aegilops* к ржавчинным болезням в Западной Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):270-284. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-270-284

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-270-284

Resistance of bread wheat introgression accessions with genetic material from the *Triticum* and *Aegilops* genera to rust diseases in Western Siberia

Lyudmila Ya. Plotnikova¹, Valeria V. Knaub¹, Tleuzhan M. Zhanbolat¹, Ekaterina S. Skolotneva²,
Yulia V. Laprina², Evgeny V. Zuev³

¹ Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia;

² Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

³ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Lyudmila Ya. Plotnikova, lya.plotnikova@omgau.org

Background. Protection of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars from rust diseases strongly requires expanding the genetic base of breeding with relative species.

Materials and methods. The research material included 39 accessions of spring bread wheat with identified or unknown resistance genes (*Lr* and *Sr*) against leaf and stem rusts transferred from *Triticum* spp. or *Aegilops* spp. The leaf and stem rust development was estimated in 2020–2024 in the fields of Western Siberia (Omsk) and, at the seedling stage, under laboratory conditions. Under rust epidemics in 2024, the accessions' resistance was characterized using the indicators "Area Under the Disease Progress Curve" (AUDPC) and "Resistance Index" (RI).

Results and conclusion. Most of the accessions were highly resistant to leaf and stem rusts in 2020–2022. Under the 2024 epidemics, the following accessions manifested high resistance to both diseases: 'Duet' (*Lr9*), KS90WGRC10 (*Lr39*), the lines of cv. 'Thatcher' (Tc) with identified genes *Lr18*, *Lr28*, *Lr35/Sr39*, *Lr37/Sr38*, *Lr50* and *Lr51*, as well as 'Pavon' (*Lr47*), TA5602 (*Lr57*), Allard 52-1-1-17-1 (k-45165), 'Yektay 406', and ANK-40. Resistance to stem rust was determined in Tc*Lr21*, Tc*Lr22a*, W2691 SR36TT1, 'Virovka', Allard 52-1-1-17-1, 'Gouritz', 'Livanjka', W2691 SR37TT2, 'Gartus 598', Wb. 58633, *Lutescens* 849-81, L-592, and 'Element 22'. The *Sr36* gene was identified in Allard 52-1-1-17-1, 'Gouritz', and 'Livanjka' using a PCR analysis. The resistant accessions had low grain yields, which must be taken into account when using them in breeding programs.

Keywords: *Triticum aestivum*, relative species, leaf rust, stem rust

Acknowledgements: the work was carried out on the theme "Research on the fundamental resistance bases of cultivated and wild cereals to fungal diseases and abiotic environmental factors", State Registration No. 121111100022-4. The molecular genetic research was performed according the theme plan of the Institute of Cytology and Genetics, SB RAS, Theme No. FWNR-2025-0020.

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

For citation: Plotnikova L.Ya., Knaub V.V., Zhanbolat T.M., Skolotneva E.S., Laprina Yu.V., Zuev E.V. Resistance of bread wheat introgression accessions with genetic material from the *Triticum* and *Aegilops* genera to rust diseases in Western Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):270-284. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-270-284

Введение

Мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.) относится к числу важнейших видов, обеспечивающих питанием население планеты. В связи с ростом народонаселения необходимо повышать сборы зерна за счет увеличения потенциальной урожайности сортов, а также снижения потерь от абиотических и биотических факторов среды (Baker et al., 2020). По оценке FAO (Food and Agriculture Organization), наиболее вредоносными для растениеводства являются засухи с экстремальными температурами, а также болезни растений. Среди возбудителей болезней наиболее опасными признаны ржавчинные грибы, отличающиеся быстрой изменчивостью и способностью к массовому размножению и трансграничным/трансконтинентальным миграциям (FAO, 2021).

Пшеницу поражают 3 вида ржавчины: бурая, стеблевая и желтая (возбудители *Puccinia triticina* Erikss., *P. graminis* f. sp. *tritici* Erikss. et Henn. и *P. striiformis* West. f. sp. *tritici* Erikss., соответственно). *P. triticina* – наиболее пластичный вид из этого набора, который поражает посевы во всех земледельческих зонах мира. Бурая ржавчина долгое время регулярно развивалась на посевах пшеницы в зерновых регионах России, но в последние десятилетия отмечена депрессия болезни. Развитие стеблевой ржавчины во второй половине XX в. было ограничено массовым распространением в регионах мира сортов, защищенных геном *Sr31* от *Secale cereale* L. Однако после появления вирулентной к *Sr31* гену расы Ug99 болезнь распространилась в странах Африки, Ближнего Востока и Европы (Patpour et al., 2022). На территории России после длительной депрессии вспышки стеблевой ржавчины отмечены в Поволжье в 2013–2014 гг. и в Западной Сибири в 2015 г. Позже болезнь регулярно поражала посевы в разных регионах страны (Baranova et al., 2023). Изучение популяционного состава *Puccinia triticina* и *P. graminis* f. sp. *tritici* показало, что на обширной территории РФ существуют европейские и азиатские популяции, различающиеся по вирулентности и молекулярным маркерам. Западносибирские и североказахстанские популяции патогенов имеют высокий коэффициент сходства и отличаются большим набором генов вирулентности, по сравнению с европейскими (Gulyaeva et al., 2018, 2023; Skolotneva et al., 2023).

В настоящее время известно около сотни генов и ОТЛ-локусов (Quantitative Trait Loci, QTLs) устойчивости пшеницы к бурой и стеблевой ржавчинам (McIntosh et al., 2018). Однако большая часть из них была преодолена ржавчинными грибами или малоэффективна. Для устойчивого зернового производства необходимо расширять спектр эффективных генов устойчивости в сортах пшеницы. После разработки методов межвидовой и межродовой (отдаленной) гибридизации в геном пшеницы перенесли большой набор генов устойчивости к грибным болезням от видов семейства Poaceae Barnh. Основными донорами генов устойчивости послужили виды родов *Triticum* L., *Aegilops* L. и *Thinopyrum* A. Löve (King et al., 2024; Plotnikova, Knaub, 2024). В связи с активными микроэволюционными процессами в популяциях патогенов актуальна информация об устойчивости образцов мягкой пшеницы с известными и неидентифицированными генами к ржавчинным болезням в различных регионах страны.

Целью исследований были мониторинг устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам набора интрогрессивных образцов *Triticum aestivum* с генетичес-

ким материалом видов родов *Triticum* и *Aegilops* в Западной Сибири и характеристика их хозяйственно ценных свойств.

Материалы и методы

Растительный материал

Материалом для исследований служили 39 образцов яровой мягкой пшеницы, включая: 1) 23 интрогрессивных сорта и линии различного происхождения с генетическим материалом видов родов *Triticum* и *Aegilops* из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР, г. Санкт-Петербург); 2) 16 образцов с известными и неидентифицированными генами устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам от тех же родственных видов (таблица). Идентифицированные гены устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам имели: линии сорта 'Thatcher' (Tc) TcLr18 (T5BS.5BL-5G#1L), TcLr21 (1DL,1DS), TcLr22a, TcLr28 (T4AS.4AL-7S#2S), TcLr35/Sr39 (2B/2SL-2SS#2.2SL#2), TcLr37/Sr38 (NS/2AS), TcLr44 (1B), TcLr51 (T1AS.1AL-1S#F7-12L-1AL); другие сорта и линии KS90W-GRC10 (Lr39 = Lr41) (2DS), 'Pavon' (Lr47) (7AS-7S#1S-7AS.7AL), KS96WGRC36 (Lr50) (2BL), TA5602 (Lr57) (5DL.5DS-T5MS⁶); CI 7778 (Sr9e) (6AL), W2691 SR36TT1 (Sr36) (2BS), W2691 SR37TT2 (Sr37) (4BL), RL 6087 (Sr40) (T2BL/2G#2S) (McIntosh et al., 2018). Гены Lr22a, Lr37 и Lr50 определяют возрастную устойчивость к бурой ржавчине (Adult Plant Resistance, APR). Остальные гены проявляются на всех стадиях развития растений, включая проростки (All-Stage Resistance, ASR). В качестве стандартов для полевых экспериментов использовали сорта западносибирской селекции: 'Памяти Азиева' (среднеранний), 'Дуэт' (среднеспелый), 'Элемент 22' (среднепоздний). Среднепоздний сорт 'Серебристая' служил индикатором восприимчивости к болезням.

Полевые эксперименты

Опыты проводили в южной лесостепи Западной Сибири (г. Омск) в 2020–2024 гг. Посев осуществляли по пару во второй половине мая на участке с лугово-черноземным типом почвы. Образцы высевали на делянках площадью 1 м² с нормой высева 500 всхожих зерен/м² в однократной повторности. В течение сезона проводили учет полевой всхожести образцов (в %) и фенологические наблюдения по общепринятым методикам. Уборку осуществляли механизированным способом в стадии полной спелости зерна. Перед уборкой часть растений убирала вручную для структурного анализа. Анализ элементов структуры урожая проводили по стандартным методикам. По результатам структурного анализа вычисляли средние значения показателей и ошибку средней (приведены на рис. 3) (Dospikhov, 1985).

Условия проведения полевых опытов

Погодные условия в период исследований были контрастными. В 2020–2023 гг. проявилась характерная для региона весенне-раннелетняя засуха в период с мая по первую половину июля. В 2021–2023 гг. недостаток осадков при повышенных температурах (на 3–10°C выше нормы) отмечали в период со второй половины июля по август. В 2024 г. регулярно выпадали умеренные осадки при температуре, близкой к средним многолетним значениям, но в третьей декаде мая (время посева) значительно снизилась температура. Гидротермический коэффициент (ГТК) за период с мая по август составил: в 2020 г. – 0,6; в 2021 г. – 0,7; в 2022 г. – 0,9; в 2023 г. – 0,8; в 2024 г. – 1,5. В соответствии с ГТК, сезоны 2020 и 2021 г.

характеризуются как очень засушливые, 2022 и 2023 г. – засушливые, а 2024 г. – влажный.

Оценка развития болезней

Учеты развития болезней в поле проводили в динамике с 7-суточным интервалом между наблюдениями. Реакцию растений на развитие бурой ржавчины оценивали по 5-балльной шкале: 0 – иммунитет (без пустул); 1 и 2 – пустулы мелкого или среднего размера, окруженные зонами некроза; 3 – средние и крупные пустулы, окруженные зонами хлороза; 4 – крупные сливающиеся пустулы (Mains, Jackson, 1926). Реакцию на поражение стеблевой ржавчиной в поле определяли по шкале, принятой в международном центре CIMMYT: R – иммунитет, без пустул; MR – мелкие пустулы с зонами некроза; MS – средние и крупные пустулы, окруженные зоной хлороза; S – крупные сливающиеся пустулы. Дополнительно развитие бурой и стеблевой ржавчины оценивали по степени поражения (в %) (Koyshebaev, 2018). В связи с отсутствием болезней на посевах, в 2022 г. была проведена лабораторная оценка реакции образцов на заражение бурой ржавчиной, а в 2022 и 2023 г. – стеблевой ржавчиной. Оценку проводили на 10-суточных проростках, для заражения использовали образцы урединиоспор популяций *Puccinia triticina* и *P. graminis* f. sp. *tritici*, собранных осенью на озимых сортах пшеницы. Реакцию растений на инокуляцию *P. triticina* и *P. graminis* f. sp. *tritici* оценивали по 5-балльной шкале (Mains, Jackson, 1926; Stackman et al., 1962, соответственно). Реакции «0–2» считали устойчивыми, «3–4» – восприимчивыми.

Для определения особенностей взаимодействия пшеницы с популяциями ржавчинных патогенов по результатам динамических оценок поражения (в %) в 2024 г. были построены графики развития болезней и вычислены показатели «Площадь под кривой развития болезни» (ПКРБ) и «Индекс устойчивости» (ИУ). ПКРБ (в условных единицах) вычисляли по формуле (Kovalenko et al., 2012):

$$\text{ПКРБ} = 0,5 \cdot (x_1 + x_2) \cdot (t_2 - t_1) + \dots + 0,5 \cdot (x_{n-1} + x_n) \cdot (t_n - t_{n-1}),$$

где x_1 – поражение при первом учете, %; x_2 – поражение при втором учете, %; x_n – поражение при последнем учете; $(t_2 - t_1)$ – количество дней между вторым и первым учетом; $(t_n - t_{n-1})$ – количество дней между последним и предпоследним учетом; n – количество учетов.

ИУ к заболеваниям определяли как отношение ПКРБ конкретного образца к максимальной ПКРБ в опыте. На основании ИУ образцы классифицировали по уровню устойчивости: 0–10 – очень высокий; 0,11–0,35 – высокий; 0,36–0,65 – средний; 0,66–0,80 – низкий; > 0,80 – восприимчивый (Kovalenko et al., 2012).

Молекулярно-генетический анализ и фитопатологический тест

Присутствие гена *Sr36* в образцах, имеющих в родословной вид *Triticum timopheevii*, определяли с применением микросателлитного маркера *Xstm773* и фитопатологического теста. Для молекулярного анализа использовали пару праймеров STM773-2F (5'-ATGGTGTGTGTTGTGTGTAGG-3') и STM773-2R (5'-AAACGCCCAACCACCTCTCTC-3') (<https://maswheat.ucdavis.edu/protocols/Sr36>). ДНК растений выделяли с помощью модифицированного метода экстракции СТАВ (подробно описан в статье Skolotneva et al., 2020). В 13 мкл реакционной смеси, состоящей из 6,5 мкл SE-БуферAS (Ammonium Sulfate), dNTPs (0,2 мМ каждого), праймеров (0,5 мкМ каждого), 1 е. а. Таq ДНК полимеразы (SibEnzyme) и стерильной де-

ионизированной воды (до конечного объема), концентрация ДНК матрицы составляла 30–35 нг/мкл. ПЦР-амплификацию выполняли на приборе BioRad T100 (BioRad, США). Отжиг праймеров STM773-2F/R осуществляли при 64–57–55°C. Детекцию продуктов амплификации проводили в 2-процентном агарозном геле, размер фрагментов оценивали с помощью маркера Step 50 plus («Биолабмикс»). В качестве положительного контроля использовали линию с геном *Sr36* (CI12632)/8*LMPG. Для фитопатологического теста использовали монопустульные изоляты *P. graminis* f. sp. *tritici* с генами авирулентности/вирулентности к *Sr36* (*Vir36/vir36*) из коллекции лаборатории молекулярной фитопатологии Института цитологии и генетики (ИЦиГ СО РАН). Тест проводили на 10-суточных проростках с соблюдением международных протоколов для работы с ржавчинными грибами (Skolotneva et al., 2020). Реакцию растений оценивали по шкале E. C. Stackman et al. (1962).

Результаты

В исследование включены образцы различного происхождения, созданные на основе видов родов *Triticum* и *Aegilops*. Среди этих видов *T. dicoccum* Schrank ex Schubert, *T. spelta* L. и *A. tauschii* Coss. имели субгеномы, гомологичные *T. aestivum* (BBA^aDD). Остальные виды по генному составу частично или полностью отличались от *T. aestivum* (таблица). Мониторинг развития болезней проводили на естественном инфекционном фоне в период 2020–2024 гг. Погодные условия оказали сильное влияние на поражение пшеницы болезнями. В 2020 и 2022 г. исследуемые образцы созрели до начала развития бурой ржавчины, в 2021 и 2022 г. – до стеблевой, а в 2023 г. ржавчинные болезни на посевах не отмечены. Лучшие условия для развития комплекса ржавчинных болезней сложились в 2024 г.

В засушливом 2021 г. развитие бурой ржавчины на посевах было умеренным, при этом восприимчивые сорта 'Памяти Азиева' и 'Серебристая' были поражены до 20–30% (см. таблицу). Не были поражены сорта 'Дуэт' (*Lr9*), 'Элемент 22' (*Lr26/Sr31 + Sr35*), а также образцы с известными генами устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам: *Lr21*, *Lr28*, *Lr35/Sr39*, *Lr39*, *Lr44*, *Lr47*, *Lr51*, *Lr57*, *Sr9e*, *Sr36*, *Sr37*, *Sr40*. Высокую устойчивость (поражение ≤ 10%) проявили линия *TcLr35/Sr39* и образцы с APR-генами *Lr22a*, *Lr37* и *Lr50*. Большая часть образцов из коллекции ВИР не поразила бурой ржавчиной, за исключением 'Dipka', ВФТ-3 и Лютеценс 849-81 (поражение 4 / 10%). В 2022 г. провели лабораторную оценку устойчивости образцов к популяции *Puccinia triticina* на стадии проростков. Восприимчивую реакцию (3–4 балла) проявили сорта 'Памяти Азиева', 'Серебристая', 'Вировка', 'Руслада', I.B.O. 3048/433, Wb. 59484, 'Dipka', ВФТ-3, а также образцы с APR-генами *Lr22a*, *Lr37/Sr38*, *Lr50*. Остальные образцы из коллекции ВИР были устойчивы (0–2 балла).

Во влажном 2024 г. развитие бурой ржавчины имело эпифитотийный характер. Первые симптомы болезни отмечены в фазе «колошение» 15 июля, а к 14 августа поражение большинства образцов достигло 70–100% (см. таблицу). На интенсивном инфекционном фоне высокую устойчивость (поражение 10%) проявили только образцы с генетическим материалом рода *Aegilops*: *TcLr28*, 'Pavon' (*Lr47*), *TcLr51* (от *A. speltoides* Tausch); TA5602 (*Lr57*) и 'Yektay 406' (от *A. geniculata* Roth); ANK-40 (*A. biuncialis* Vis.). В средней степени (3–4 / 20–30%) были пора-

Таблица. Результаты изучения развития болезней на образцах яровой мягкой пшеницы в Западной Сибири (г. Омск) (2020, 2021, 2024 г.)
Table. Results of studying the development of diseases on spring bread wheat accessions in Western Siberia (Omsk) (2020, 2021, and 2024)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец, ген, происхождение / Accession, origin, gene	Источник устойчивости, геном / Resistance source, genome	Бурая ржавчина / Leaf rust				ИУ* / RI*	Стеблевая ржавчина / Stem rust			
			Реакция, % / Reaction, %		ПКРБ* / AUDPC*	% Реакция / % Reaction		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*		
2021	2024	2020	2024								
62867	‘Памяти Азиева’, РФ	–	4/30	4/100	1755	0,71	50S	60S	570	0,65	
63500	‘Дуэт’, РФ, <i>Lr9</i>	<i>Aegilops umbellulata</i> UU	0/0	4/50	633	0,26	40S	30S	148	0,17	
–	‘Элемент 22’, РФ, <i>Lr26/Sr31+Sr35</i>	<i>Secale. cereale, Triticum monosocum</i> RR+A ^m A ^m	0/0	4/100	1755	0,71	10MS	30S	190	0,22	
64994	‘Серебристая’, РФ	–	4/20	4/100	1755	0,71	50S	70S	570	0,67	
–	CI 7778, <i>Sr9e</i>	<i>Triticum dicossum</i> BA ^u	0/0	4/100	1945	0,79	30S	60S	345	0,39	
63719	‘Вировка’, РФ		0/0	4/100	2455	1,00	20MS	10S	120	0,14	
66008	‘Руслада’, РФ		0/0	4/100	1945	0,79	40S	50S	570	0,67	
67413	<i>TcLr44</i>	<i>Triticum spelta</i> BA ^D	4/10	4/80	1110	0,45	30S	40S	345	0,39	
64657	Лютеценс 393ae9-1, РФ		0/0	4/100	1755	0,71	30S	50S	345	0,39	
58624	<i>TcLr21</i>	<i>Aegilops tauschii</i> DD	0/0	4/100	1260	0,51	0R	5MS	60	0,07	
65463	<i>TcLr22a</i>		3/20	4/100	1260	0,51	5S	5MS	60	0,07	
–	KS90WGRC10, <i>Lr39 (= Lr41)</i>		0/0	4/10	240	0,10	0R	10MS	70	0,07	
65264	– Мексика		0/0	4/100	1755	0,71	10MS	30S	428	0,49	
–	RL6087, <i>Sr40</i>	<i>Triticum araraticum</i> AA ^{CGG}	0/0	4/100	1755	0,71	0R	50S	515	0,59	

Таблица. Продолжение
Table. Continued

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец, ген, происхождение / Accession, origin, gene	Источник устойчивости, геном / Resistance source, genome	Бурая ржавчина / Leaf rust				Стеблевая ржавчина / Stem rust			
			Реакция, % / Reaction, %		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*	% Реакция / % Reaction		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*
			2021	2024			2020	2024		
49454	TcLr18	Triticum timopheevii A'A'GG	0/0	4/20	390	0,16	10MS	5MS	60	0,07
-	KS96WGRC36, Lr50		4/10	4/30	390	0,16	0R	30S	148	0,17
-	W2691 SR36TT1, Sr36		2/5	4/100	860	0,35	10MS	10S	386	0,44
-	W2691 SR37TT2, Sr37		0/0	4/100	1755	0,71	0R	20S	155	0,18
45163	Wb. 59484, Канада		0/0	4/100	1010	0,41	10MS	100S	563	0,64
45164	Wb. 58633, Канада		0/0	4/50	1210	0,49	30S	30S	275	0,31
45165	Allard 52-1-1-17-1, США		0/0	4/60	508	0,21	30MS	30MS	190	0,22
49928	Allard 52-1-1-17-1, США		0/0	4/100	1820	0,74	10MS	50S	345	0,39
46224	I.BO. 3048/433, Италия		0/0	4/80	1645	0,65	20S	70S	570	0,67
57142	'Kalkee', Австралия		0/0	4/100	1755	0,71	50S	60S	570	0,67
58905	'Gowritz', Замбия		0/0	4/80	1755	0,71	10MR	50S	710	0,72
59398	'Гартус 598', РФ		0/0	4/100	1755	0,71	30S	20S	155	0,18
60340	'Dipka', ЮАР		4/10	4/100	1755	0,71	50S	50S	345	0,39
60991	'Livanjka', Югославия		0/0	4/100	1350	0,55	10MS	10MS	120	0,14
64137	'Gouritz', ЮАР		0/0	4/100	1336	0,54	5MR	10MS	120	0,14
48066	ВФТ-3, РФ	Triticum timonovum A'A'A'AGGG	4/10	4/100	1905	0,78	50S	80S	875	1,00
56970	Лютесценс 849-81, РФ		4/20	4/100	1360	0,52	50S	10S	120	0,14

Таблица. Окончание
Table. The end

№ по каталогу VIR catalogue No.	Образец, ген, происхождение Accession, origin, gene	Источник устойчивости, геном / Resistance source, genome	Бурая ржавчина / Leaf rust			Стеблевая ржавчина / Stem rust			
			Реакция, % / Reaction, %	ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*	% Реакция / % Reaction		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*
						2020	2024		
67410	TcLr28	<i>Aegilops speltoides</i> SS	0/0	4/10	0,05	5MR	20MS	155	0,18
66207	TcLr35/Sr39		4/10	4/10	0,11	5MR	20S	155	0,18
44748	'Pavon', Lr47		0/0	3/10	0,05	0R	30S	275	0,31
67418	TcLr51		0/0	3/10	0,05	0R	5MS	60	0,07
62905	Л-592, РФ		0/0	4/100	0,55	30S	20S	155	0,18
65829	CS 2A/2M, Lr28, Австралия		0/0	4/10	0,05	10MS	10MS	155	0,18
67422	TA5602, Lr57, Австралия	<i>Aegilops geniculata</i> U ^S U ^S M ^c M ^c	0/0	3/10	0,05	0R	10MS	35	0,04
42640	'San Marino', Италия		0/0	4/100	0,41	5MS	100S	563	0,64
44769	'Fenotipo 3', Италия		0/0	4/100	0,71	50S	100S	563	0,64
62576	'Yektaу 406', Турция		0/0	2/10	0,05	5MR	10MS	35	0,04
-	АНК-40, РФ	<i>Aegilops biuncialis</i> UUM ^c M ^c	0/0	3/10	0,05	0	10MS	35	0,04
-	TcLr37/Sr38	<i>Aegilops ventricosa</i> DDN ^v N ^v	3/10	3/20	0,11	10MR	20S	155	0,18
-	Среднее	-	-	-	0,48±0,11	-	-	316 ± 45	0,35 ± 0,05

Примечание: * - 2024 г.; ИУ - индекс устойчивости; ПКРБ - площадь под кривой развития болезни; Тс - почти изогенная линия сорта 'Thatcher'
 Note: * - 2024; RI - Resistance Index; AUDPC - Area Under The Disease Progress Curve; Тс - near-isogenic line of cv. 'Thatcher'

жены образцы с генами *TcLr18* и *KS96WGRC36 (Lr50)* (от *Triticum timopheevii*) и *TcLr37/Sr38* (от *Aegilops ventricosa* Tausch). Большинство образцов, созданных с участием *Triticum dicoccum*, *T. spelta*, *T. araraticum* Jakubz., *T. timonovum* Heslot et Ferrary и *Aegilops tauschii*, были поражены в сильной степени (4 / 50–100%). В наборе образцов из коллекции ВИР присутствовали два образца Allard 52-1-1-17-1, различных по свойствам; из них более устойчивым был к-45165.

Для понимания особенностей проявления устойчивости образцов важную информацию дают графики развития болезней, а также показатели ПКРБ и ИУ. ПКРБ отражает скорость и длительность поражения образцов болезнью. ИУ дает возможность оценить устойчивость конкретного образца по сравнению с максимально пораженным, с учетом интенсивности инфекционного фона. Увеличение ПКРБ и ИУ коррелирует с потерями урожая зерна пшеницы (Kovalenko et al., 2012). Средние значения ПКРБ набора изученных образцов показали, что интенсивность поражения бурой ржавчиной была значительно выше, чем стеблевой (ПКРБ = 11 563 и 316, соответственно) (см. таблицу).

Анализ графиков развития бурой ржавчины показал большое разнообразие взаимодействия образцов с популяцией *Puccinia triticina* (рис. 1, а). По динамике поражения образцы разделились на несколько групп. Наиболее рано и стремительно бурая ржавчина развивалась на сорте 'Вировка', ее поражение через 14 сут. достигло 100%, а ПКРБ = 2455, и ИУ = 1,0 были максимальными в опыте (см. таблицу и рис. 1, а, трек 6). На многих образцах болезнь развивалась медленнее, включая: 'Руслада', Allard 52-1-1-17-1 (к-49928) и ВФТ-3 (трек 5,7,22,30); 'Памяти Азиева', 'Элемент 22', 'Серебристая', CI 7778 (*Sr9e*) и др. (трек 1, 3, 4, 9, 13, 14, 18, 24, 26, 27, 40); IBO 3048/433 (трек 23). В соответствии с ИУ (0,68–0,79) перечисленные образцы были классифицированы как низкоустойчивые. На образцах *TcLr21*, *TcLr22a*, 'Livjanka', 'Gouritz', Лютеценс 849-81, Л-582 с генетическим материалом *Aegilops tauschii*, *Triticum timopheevii* и *T. timonovum* развитие бурой ржавчины началось на 14 сут. позже, но развивалось стремительно и достигло 100% к финальной оценке (трек 10, 11, 25, 28, 29, 31, 36). За счет более позднего поражения их ПКРБ была меньше, и по ИУ = 0,55 эти образцы были отнесены к среднеустойчивым. В эту же группу (ИУ = 0,45–0,49) вошли *TcLr44* и Wb. 58633, на которых болезнь прогрессировала медленнее или стабилизировалась в конце вегетации (треки 8 и 20).

Для образцов с APR-генами характерно замедленное развитие болезни (slow rusting) при восприимчивой реакции растений (Plotnikova, Shtubey, 2012). В 2024 г. эффект slow rusting к бурой ржавчине в сильной степени проявился у образцов с APR-генами *Lr37* и *Lr50* и ASR-генами *Lr18* и *Lr35* (см. рис. 1, а, треки 15, 16 и 33, 43). За счет этого ПКРБ были низкими, и образцы отнесли к высокоустойчивым (ИУ = 0,11–0,16). Менее выраженное замедление болезни проявилось на образцах Allard 52-1-1-17-1 (к-45165) и 'Дуэт' (ИУ = 0,21 и 0,26 соответственно) (треки 21 и 2). Самую высокую устойчивость (ИУ = 0,05) проявили образцы с генами видов: *Aegilops tauschii* – *KS90WGRC10 (Lr39)*; *A. speltoides* – *TcLr28*, CS 2A/2M (*Lr28*), 'Pavon' (*Lr47*), *TcLr51*; *A. geniculata* – TA5602 (*Lr57*), 'Yek-tay 406'; *A. biuncialis* – АНК-40. На этих образцах слабое поражение проявилось к концу вегетации и быстро стабилизировалось (трек 12, 32, 34, 35, 37, 38, 41, 42).

Стеблевая ржавчина в 2020 г. в средней степени поразила посевы, максимальное поражение 50S проявили

образцы 'Памяти Азиева', 'Серебристая', 'Dipka', 'Kalkee', ВФТ-3, Лютеценс 849-81, 'Fenotipo 3' (см. таблицу). Высокую устойчивость (0R–10MR–MS) проявили образцы с генетическим материалом: *Aegilops tauschii* – *TcLr21*, *TcLr22a*, *KS90WGRC10 (Lr39)*, к-65264; *Triticum timopheevii* – *TcLr18*, *KS96WGRC36 (Lr50)*, W2691 SR36TT1 (*Sr36*), W2691 SR37TT2 (*Sr37*), Wb. 59484, Allard 52-1-1-17-1 (к-49928), 'Gouritz', 'Livjanka'; *Aegilops speltoides* – *TcLr28*, CS 2A/2M (*Lr28*), *TcLr35/Sr39*, *TcLr51*; *A. geniculata* – TA5602 (*Lr57*), 'San Marino', 'Yek-tay 406'; *A. biuncialis* – АНК-40; *A. ventricosa* – *TcLr37/Sr38*. При лабораторной оценке в 2022 и 2023 г. большая часть образцов показала устойчивую реакцию (0–2 балла), кроме сортов 'Памяти Азиева', 'Kalkee' и ВФТ-3.

В 2024 г. первые симптомы стеблевой ржавчины на посевах отмечены на две недели позже, чем бурой, – 29 июля. Иммунные к болезни образцы выявлены не были. Динамика развития болезни на изученных образцах различалась. Поражение образца ВФТ-3 развивалось стремительно (см. рис. 1, б, трек 30) и достигло 80S к финальной оценке (ПКРБ = 875, ИУ = 1,0) (см. таблицу). На образцах Wb. 59484, 'San Marino' и 'Fenotipo 3' болезнь развивалась медленно в период с 22 июля по 7 августа, но затем в течение 7 сут. поражение составило 100S (трек 19, 39, 40). Образцы с генетическим материалом *Triticum dicoccum* (CI 7778 (*Sr9e*), *T. spelta* (*TcLr44* и Лютеценс 393ae9-1) (трек 5, 8, 9, 22, 27) имели финальную оценку 50S и проявили умеренный эффект slow rusting.

Образцы, имеющие в родословной виды *T. timopheevii* и *T. timonovum*, изучали с помощью молекулярно-генетического и фитопатологического анализов на присутствие гена *Sr36* (эффективен против расы возбудителя стеблевой ржавчины Ug99). На ДНК-матрицах тестируемого материала при использовании микросателлитного маркера STM773 получили ампликоны размером 155 пн и 180 пн, соответствующие аллелям *Sr36* устойчивого (R) и восприимчивого (S) генотипа. Аллель R в гомозиготе выявлен у образцов Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), 'Gouritz' и 'Livjanka' (рис. 2, образцы 5, 7 и 10 соответственно). Результаты молекулярно-генетического анализа подтвердили с помощью фитопатологического теста с использованием двух изолятов, несущих гены авирулентности или вирулентности к *Sr36*.

На образцах RL6087 (*Sr40*) и 'Gowritz', происходящих от *T. araraticum* и *T. timopheevii*, болезнь начала развиваться на неделю позже и стабилизировалась на поздних этапах (см. рис. 2, б, трек 20, 34; ИУ = 0,59). На ряде образцов разного происхождения скорость развития ржавчины была умеренной, но при финальной оценке достигла 50% (см. рис. 2, б, трек 5, 8, 9, 22, 27; ИУ = 0,39). В группе с финальной оценкой 30S наблюдалась стабилизация развития болезни на образце к-65264 (трек 13). На остальных образцах с такой же оценкой развитие болезни было значительно замедлено (треки 20, 34 и 2, 3, 16, 21); Wb. 58633, 'Pavon' (*Lr47*), 'Дуэт' (*Lr9*), 'Элемент 22' (*Lr26/Sr31 + Sr35*), Allard 52-1-117-1 (к-45165). Образцы с идентифицированными генами устойчивости *Sr36* (W2691 SR36TT1, 'Gouritz', 'Livjanka'), *Sr37* (W2691 SR37TT2), *Sr38* (*TcLr37/Sr38*) и *Sr39* (*TcLr35/Sr39*) имели сходные ИУ = 0,18–0,19 и относились к высокоустойчивым. Аналогичные показатели были у образцов разного происхождения: *KS90WGRC10 (Lr39)*, 'Гартус 598', Л-592, *TcLr28*, 'Вировка', Лютеценс 849-81 (треки 18, 26, 32, 33, 36, 43 и 6, 12, 17, 28, 29, 31). Очень высокую устойчивость (поражение 5MS, ИУ = 0,07) проявили образцы с генетическим материалом *T. timopheevii* – *TcLr18*; *Aegilops*

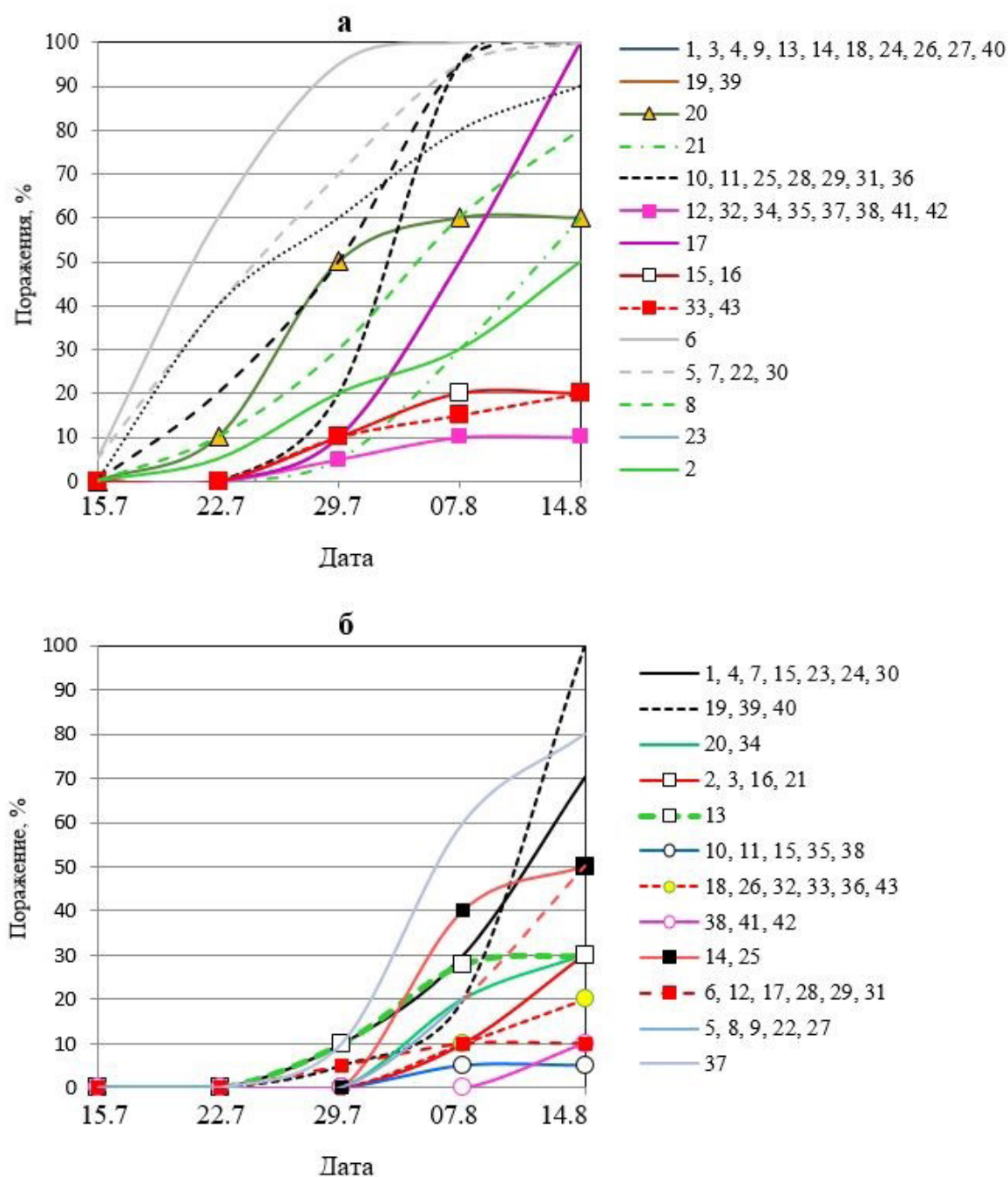


Рис. 1. Динамика развития бурой ржавчины (а) и стеблевой ржавчины (б) на образцах яровой мягкой пшеницы в Западной Сибири (г. Омск, 2024). Образцы: 1 – 'Памяти Азиева'; 2 – 'Дуэт'; 3 – 'Элемент 22'; 4 – 'Серебристая'; 5 – CI 7778 (*Sr9e*); 6 – 'Вировка'; 7 – 'Руслада'; 8 – *TcLr44*; 9 – Лютеценс 393ae9-1; 10 – *TcLr21*; 11 – *TcLr22a*; 12 – KS90WGRC10 (*Lr39*); 13 – κ-65264; 14 – RL6087 (*Sr40*); 15 – *TcLr18*; 16 – KS96WGRC36 (*Lr50*); 17 – W2691 SR36TT1; 18 – W2691 SR37TT2; 19 – Wb. 59484; 20 – Wb. 58633; 21 – Allard 52-1-1-17-1 (κ-45165); 22 – Allard 52-1-1-17-1 (κ-49928); 23 – I.B.O. 3048/433; 24 – 'Kalkee'; 25 – 'Gowritz'; 26 – 'Гартус 598'; 27 – 'Dipka'; 28 – 'Livanjka'; 29 – 'Gouritz'; 30 – ВФТ-3; 31 – Лютеценс 849-81; 32 – *TcLr28*; 33 – *TcLr35/Sr39*; 34 – 'Pavon' (*Lr47*); 35 – *TcLr51*; 36 – L-592; 37 – CS 2A/2M (*Lr28*); 38 – TA5602 (*Lr57*); 39 – 'San Marino'; 40 – 'Fenotipo 3'; 41 – 'Yektay 406'; 42 – ANK-40; 43 – *TcLr37/Sr38*

Fig. 1. Dynamics of the leaf rust (a) and stem rust (b) development on spring bread wheat accessions in Western Siberia (Omsk, 2024). Accessions: 1 – 'Pamyati Azieva'; 2 – 'Duet'; 3 – 'Element 22'; 4 – 'Serebristaya'; 5 – CI 7778 (*Sr9e*); 6 – 'Virovka'; 7 – 'Ruslada'; 8 – *TcLr44*; 9 – Lutescence 393ae9-1; 10 – *TcLr21*; 11 – *TcLr22a*; 12 – KS90WGRC10 (*Lr39*); 13 – κ-65264; 14 – RL6087 (*Sr40*); 15 – *TcLr18*; 16 – KS96WGRC36 (*Lr50*); 17 – W2691 SR36TT1; 18 – W2691 SR37TT2; 19 – Wb. 59484; 20 – Wb. 58633; 21 – Allard 52-1-1-17-1 (κ-45165); 22 – Allard 52-1-1-17-1 (κ-49928); 23 – I.B.O. 3048/433; 24 – 'Kalkee'; 25 – 'Gowritz'; 26 – 'Gartus 598'; 27 – 'Dipka'; 28 – 'Livanjka'; 29 – 'Gouritz'; 30 – ВФТ-3; 31 – Lutescence 849-81; 32 – *TcLr28*; 33 – *TcLr35/Sr39*; 34 – 'Pavon' (*Lr47*); 35 – *TcLr51*; 36 – L-592; 37 – CS 2A/2M (*Lr28*); 38 – TA5602 (*Lr57*); 39 – 'San Marino'; 40 – 'Fenotipo 3'; 41 – 'Yektay 406'; 42 – ANK-40; 43 – *TcLr37/Sr38*

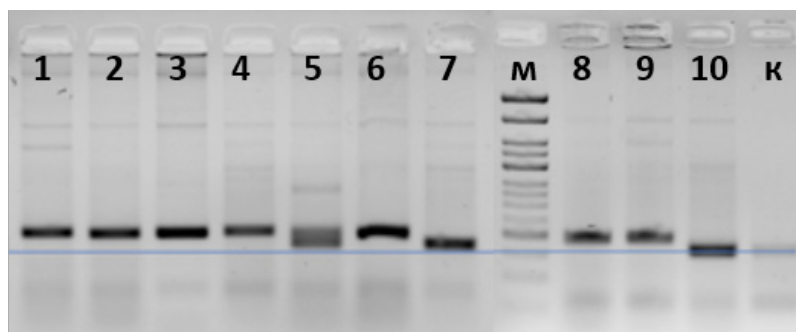


Рис. 2. Результаты определения маркера Xstm773 к гену *Sr36* в образцах яровой мягкой пшеницы:

М – ДНК-маркер Step 50 plus («Биолабмикс»); **к** – положительный контроль, линия *Sr36* CI12632)/8*LMPG; **1** – Wb. 59484; **2** – Wb. 58633; **3** – Allard 52-1-1-17-1 (к-49928); **4** – I.BO. 3048/433; **5** – Allard 52-1-1-17-1' (к-45165); **6** – 'Kalkee'; **7** – 'Gouritz'; **8** – 'Гартус 598'; **9** – 'Dipka'; **10** – 'Livanjka'

Fig. 2. Identification results for the marker Xstm773 to the *Sr36* gene in spring bread wheat accessions:

M – DNA-marker Step 50 plus (Biolabmix); **k** – positive control, line *Sr36* CI12632)/8*LMPG; **1** – Wb. 59484; **2** – Wb. 58633; **3** – Allard 52-1-1-17-1 (к-49928); **4** – I.BO. 3048/433; **5** – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165); **6** – 'Kalkee'; **7** – 'Gouritz'; **8** – 'Gartus 598'; **9** – 'Dipka'; **10** – 'Livanjka'

tauschii – *TcLr21*, *TcLr22a*; *A. speltoide*s – *TcLr51* (трек 10, 11, 15, 35, 38). На образцах с генетическим материалом *A. geniculata* (TA5602 (*Lr57*) и 'Yektay 406'), а также *A. biuncialis* (АНК-40) слабое поражение (10MS) появилось только при финальной оценке (ИУ = 0,04).

Для использования образцов в селекционных программах необходимы сведения об их хозяйственно ценных свойствах. В работе приведены данные об основных признаках образцов, выделившихся по ИУ к болезням за 2022–2024 гг. Средний вегетационный период набора образцов колебался от 70,2 сут. (2023 г.) до 82,4 сут. (2022 г.) (рис. 3, а). Удлинение вегетационного периода в 2022 г. было связано с тем, что после длительной засухи в конце июля выпали осадки, спровоцировавшие образование дополнительных побегов и замедление созревания растений. В 2023 г. засуха и высокие температуры синхронизировали развитие растений и способствовали созреванию всех образцов в течение 68–73 сут. В 2024 г. вегетационный период большинства образцов не превысил 83 сут., кроме Лютесценс 849–81 (90 сут.). Самый короткий средний вегетационный период (71–75 сут.) имели образцы: 'Вировка', KS90WGRC10 (*Lr39*), W2691 SR36TT1 (*Sr36*), W2691 SR37TT2 (*Sr37*), 'Гартус 598', *TcLr35/Sr39*.

Урожайность образцов коррелирует с полевой всхожестью и массой зерна растений (продуктивностью). Адаптированные к условиям зоны сорта-стандарты 'Памяти Азиева', 'Дуэт' и 'Элемент 22' в условиях жесткой весенне-раннелетней засухи в 2022 и 2023 г. имели самую высокую всхожесть 60–70%, а во влажном 2024 г. – 68–72% (рис. 3, б). Среди изученных образцов наиболее близки по всхожести к стандартам в 2022–2024 гг.: KS90WGRC10 (*Lr39*) (63–71%) и Wb. 58633 (50–65%). Остальные образцы по всхожести в засушливых условиях значительно уступали стандартам. В 2024 г. посев проводили во влажную почву при пониженной температуре (среднедекадная – 8°C). Такие условия спровоцировали развитие корневых гнилей, что вызвало снижение всхожести до 40–53% у части образцов инорайонной селекции: *TcLr18*, W2691 SR37TT2 (*Sr37*), Wb. 58633, Wb. 59484, Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), 'Yektay 406', TA5602 (*Lr57*).

Самую высокую среднюю массу зерна растений за контрастные 2022, 2023 и 2024 г. показали сорта-стандарты – от 2,04 до 2,30 г/растение (рис. 3, в). Среди остальных образцов наиболее высокую среднюю массу

зерна растений сформировали 'Гартус 598' (2,00 г), а также 'Вировка', Wb. 59484 и АНК-40 (1,62–1,66 г). Самую низкую массу зерна растения имел высокоустойчивый к болезням сорт 'Yektay 406' (0,83 г). Урожайность образцов значительно колебалась в годы изучения. У сортов-стандартов средняя урожайность составила 267–282 г/м² (рис. 3, г). Ближе всего к стандартам по урожайности были KS90WGRC10 (*Lr39*), 'Гартус 598' и АНК-40 (168–198 г/м²). Другие образцы уступали сортам-стандартам по средней урожайности в 1,5–3,8 раза.

Обсуждение

При разработке перспективных программ селекции пшеницы необходимо учитывать результаты мониторинга устойчивости потенциальных родительских форм к комплексу характерных для региона болезней. Для защиты пшеницы от ржавчинных болезней в геном мягкой пшеницы из видов родов *Triticum*, *Thinopyrum*, *Aegilops* и *Secale* был перенесен большой набор единичных или тесно сцепленных генов, которые использовались для защиты сортов.

Многолетние исследования популяций *Puccinia triticina* на территории России показали, что высокую эффективность на территории России в период 2000–2020 гг. проявили гены видов *Triticum dicoccoides* – *Lr53*; *T. timopheevii* – *Lr50*; *Thinopyrum* spp. – *Lr24*, *Lr29*, *Lr6Agi2*; *Aegilops tauschii* – *Lr39* и *Lr42*; *A. speltoide*s – *Lr28*, *Lr47*, *Lr51*, *LrAsp*; *A. geniculata* – *Lr57*; *Secale cereale* – *Lr45*. Ген *Lr9* (от *Aegilops umbellulata* Zhuk.) был преодолен на территории Западной Сибири и Южного Урала, но сохранил эффективность в других регионах (Gulyaeva et al., 2021). При вспышках стеблевой ржавчины в регионах России в 2014 и 2015 г. эффективными оказались гены видов *Triticum araraticum* – *Sr40*; *T. timopheevii* – *Sr36*, *Sr37*; *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey – *Sr6Agi*; *Aegilops speltoide*s – *Sr38* (Baranova et al., 2024). Однако в образцах азиатской популяции *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, собранных в Омской и Новосибирской областях в 2017 г., выявлена значительная доля изолятов, вирулентных к *Sr36* и *Sr38*, но вирулентность к *Sr24*, *Sr31*, *Sr39* и *Sr40* не установлена (Skolotneva et al., 2020).

В последние десятилетия основная часть сортов яровой мягкой пшеницы для Западной Сибири, Южного Урала и Северного Казахстана создается в рамках сотрудни-

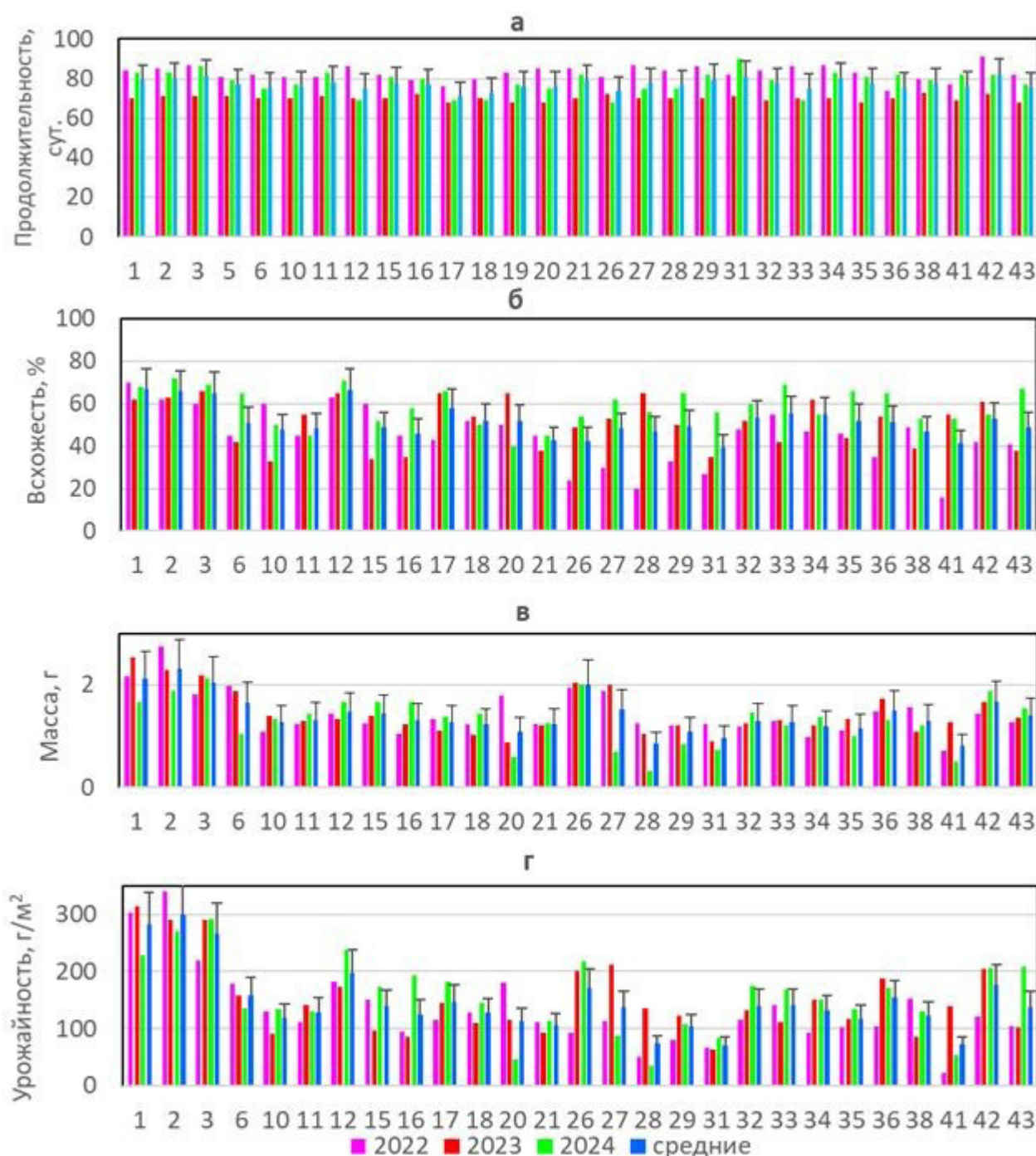


Рис. 3. Хозяйственно ценные признаки образцов яровой мягкой пшеницы: а – вегетационный период (сут.); б – полевая всхожесть (%); в – масса зерна растения (г); г – урожайность (г/м²). Образцы: 1 – ‘Памяти Азиева’; 2 – ‘Дует’; 3 – ‘Элемент 22’; 4 – ‘Серебристая’; 5 – CI 7778 (*Sr9e*); 6 – ‘Вировка’; 10 – TcLr21; 11 – TcLr22a; 12 – KS90WGRC10 (*Lr39*); 15 – TcLr18; 16 – KS96WGRC36 (*Lr50*); 17 – W2691 SR36TT1; 18 – W2691 SR37TT2; 19 – Wb. 59484; 20 – Wb. 58633; 21 – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165); 26 – ‘Гартус 598’; 27 – ‘Dipka’; 28 – ‘Livanjka’; 29 – ‘Gouritz’; 31 – Лютесценс 849-81; 32 – TcLr28; 33 – TcLr35/*Sr39*; 34 – ‘Pavon’ (*Lr47*); 35 – TcLr51; 36 – Л-592; 38 – TA5602 (*Lr57*); 41 – ‘Yektay 406’; 42 – АНК-40; 43 – TcLr37/*Sr38*

Fig. 3. Important agronomic traits of spring bread wheat accessions: а – vegetation period (days); б – seed germination in the field (%); в – grain weight per plant (g); г – grain yield (g/m²). Accessions: 1 – ‘Pamyati Azieva’; 2 – ‘Duet’; 3 – ‘Element 22’; 4 – ‘Serebristaya’; 5 – CI 7778 (*Sr9e*); 6 – ‘Virovka’; 10 – TcLr21; 11 – TcLr22a; 12 – KS90WGRC10 (*Lr39*); 15 – TcLr18; 16 – KS96WGRC36 (*Lr50*); 17 – W2691 SR36TT1; 18 – W2691 SR37TT2; 19 – Wb. 59484; 20 – Wb. 58633; 21 – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165); 26 – ‘Gartus 598’; 27 – ‘Dipka’; 28 – ‘Livanjka’; 29 – ‘Gouritz’; 31 – Lutescence 849-81; 32 – TcLr28; 33 – TcLr35/*Sr39*; 34 – ‘Pavon’ (*Lr47*); 35 – TcLr51; 36 – L-592; 38 – TA5602 (*Lr57*); 41 – ‘Yektay 406’; 42 – ANK-40; 43 – TcLr37/*Sr38*

чества по программе KASIB (Kazakhstan-Siberia Network for Spring Wheat Improvement), курируемой CIMMYT. В 2000–2016 гг. для защиты пшеницы от бурой и стеблевой ржавчины преимущественно использовали чужеродные гены/транслокации *Lr21*, *Lr9*, *Lr19/Lr25*, *Lr26/Sr31* и *Lr34/Sr57* с добавлением пшеничных расоспецифических генов *Lr1*, *Lr3*, *Lr10*, *Lr14a*, *Lr17*, *Lr20*. В единичных сортах выявлены *Lr24/Sr24*, *Lr37/Sr38*, *Lr39*, *LrAsp* и *Lr6Agi2/Sr6Agi2* (Skolotneva et al., 2021; Gulyaeva et al., 2024). В 2017–2019 гг. в сортах чаще всего были представлены гены *Lr1*, *Lr10* и *Lr26/Sr31*, а *Lr9*, *Lr19/Lr25*, *Lr24/Sr24*, *Lr6Agi2/Sr6Agi2* и ржаная транслокация 1AL/1RS встречались в единичных сортах, как правило, в комбинациях (Gulyaeva et al., 2024).

С учетом необходимости расширения генетического разнообразия сортов в наши исследования были включены образцы, созданные на основе набора видов родов *Triticum* и *Aegilops*, генетический материал которых отсутствовал или был мало представлен в сортах, предназначенных для возделывания в Западной Сибири, на Южном Урале и в Северном Казахстане. Большая часть изученного материала несла гены или имела в родословных виды с отличными от *Triticum aestivum* (гомеологичными) геномами: *T. timopheevii* (A'A'GG), *Aegilops speltoides* (SS), *A. geniculata* и *A. biuncialis* (UUMM), *A. ventricosa* (DDN^v N^v). Вид *Triticum timopheevii* признан перспективным донором устойчивости к грибным болезням, на его основе создан синтетический октоплоид *T. timonovum* (A'A'A'A'GGGG) (Murashov, Morozova, 2008). Опыт использования интрогрессий от видов с гомеологичными геномами показал, что в них могут присутствовать комплексы генов устойчивости к набору болезней.

Оценка включенного в исследование материала в засушливых условиях 2020–2023 гг. показала, что основная часть образцов, включая образцы с идентифицированными *Sr*-генами и сорт 'Дуэт' (*Lr9*), проявила иммунитет или высокую устойчивость к бурой ржавчине. Исключение составили образцы с генетическим материалом *Triticum dicoccum* ('Вировка', 'Руслада') и часть образцов с генами *T. timopheevii* и *T. timonovum* (I.BO. 3048/433, Wb. 59484, 'Dipka', ВФТ-3). Выявленный в поле иммунитет образцов с генами *Lr9*, *Lr28*, *Lr47*, *Lr51* и *Lr57* подтверждается результатами анализа популяции *Puccinia tritici-na* 2022 г., в которой соответствующие гены вирулентности не были определены (Meshkova, 2024). Полевая оценка выявила меньшую долю высокоустойчивых к стеблевой ржавчине образцов ($\leq 10\text{MS-S}$) в 2020 г. В их число вошли образцы с генетическим материалом *T. araraticum*, *T. timopheevii* (кроме Wb. 58633, 'Kalkee', 'Тартус 598', 'Dipka'), *Aegilops tauschii*, *A. speltoides* (кроме Л-592) и *A. biuncialis*.

Анализ графиков развития ржавчинных болезней, показателей ПКРБ и ИУ в 2024 г. показал большие различия между образцами. Выявлены четыре варианта взаимодействия образцов пшеницы с популяциями патогенов: 1) раннее и быстрое поражение растений; 2) инфицирование с задержкой на 7–14 сут. с дальнейшим стремительным развитием заболеваний; 3) замедление развития болезней; 4) стабилизация поражения. Стремительное развитие болезней на образцах второй группы свидетельствует о том, что в популяциях патогенов появлялись и быстро размножались вирулентные клоны. В трех последних вариантах значительно уменьшались ПКРБ и ИУ, что важно для снижения потерь урожая.

Для защиты сортов представляют интерес образцы, способные обеспечивать неспецифические эффекты

slow rusting или стабилизации болезней при низком уровне поражения. В наибольшей степени устойчивость к бурой и стеблевой ржавчине за счет замедления или стабилизации поражения проявили образцы с генетическим материалом *Triticum timopheevii* – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), *TcLr18* и *TcLr50*; *Aegilops tauschii* – KS90WGRC10 (*Lr39*); *A. speltoides* – *TcLr28*, *TcLr35/Sr39*, 'Pavon' (*Lr47*), *TcLr51*; *A. geniculata* – TA5602 (*Lr57*) и 'Yektay 406'; *A. biuncialis* – АНК-40; *A. ventricosa* – *TcLr37/Sr38*; *A. umbellulata* – 'Дуэт' (*Lr9*). Значительный эффект slow rusting и стабилизацию стеблевой ржавчины проявили образцы с генами *Triticum dicoccum* – 'Вировка'; *T. timopheevii* – 'Gouritz' (*Sr36*), 'Livanjka' (*Sr36*), W2691 SR37TT2 (*Sr37*), Wb. 58633 и 'Тартус 598'; *T. timonovum* – Лютесценс 849-8; *Aegilops tauschii* – *TcLr21*, *TcLr22a* и к-65264; *A. speltoides* – Л-592. Большинство этих образцов сохранило устойчивость к болезням в период 2020–2024 гг.

Устойчивость растений к болезням зависит от состава популяций патогенов. Проведенные ранее исследования популяций ржавчинных грибов показали, что они представляют динамические системы, в которых набор и соотношение рас зависят от биологических особенностей видов, генетического полиморфизма растений, условий среды, деятельности человека. В благоприятных условиях в популяциях преобладают сложные расы с большим числом генов вирулентности. При наступлении неблагоприятных условий увеличивается доля простых рас (Dyakov et al., 1998). После длительного периода депрессии, вызванного действием стрессовых факторов, состав популяций патогенов может измениться. Во время эпифитотий повышается вероятность возникновения новых фенотипов по вирулентности. Для закрепления в популяции вирулентная форма должна иметь достаточную приспособленность (Fitness), которая зависит от жизнеспособности и интенсивности размножения патогенов. Появление генов вирулентности может оказывать разное влияние на приспособленность – от отрицательного (вплоть до летального) до нейтрального и положительного. При летальном действии аллелей вирулентности новые патотипы в популяции не появляются, а при умеренном отрицательном размножаются медленно и могут элиминироваться в неблагоприятных условиях (Zhan, McDonald, 2013). В ходе длительных исследований *Puccinia tritici-na* показано, что около половины новых патотипов к следующему году элиминируется из популяций (Gulyaeva et al., 2023).

Причинами наблюдавшегося нами замедления и стабилизации развития ржавчинных болезней могут быть малая доля вирулентных клонов, низкая их приспособленность. Кроме того, дополнительным фактором может быть формирование системной приобретенной устойчивости (Systemic Acquired Resistance, SAR) в растениях. SAR может быть индуцирована контактом с неспециализированными патогенами, авирулентными штаммами специализированных патогенов или химическими индукторами. В результате развития SAR формируется комплекс защитных механизмов, который обеспечивает неспецифическую устойчивость к разным патогенам и вредителям (Prasad et al., 2020). Индукция SAR приводит к сокращению размеров мицелия и частичному подавлению размножения ржавчинных грибов, включая *P. tritici-na* (Plotnikova, 2009). Замедление развития бурой ржавчины на сорте 'Дуэт' (*Lr9*) может быть связано с развитием SAR после контакта с авирулентными штаммами, присутствующими в большом количестве в омской популяции

P. triticina (Meshkova, 2024). При последующем заражении стеблевой ржавчиной 'Дуэт' проявил эффект slow rusting, хотя ранее был восприимчив к этому заболеванию. Значительное замедление развития стеблевой ржавчины на линиях со сложными транслокациями *TcLr35/Sr39* и *TcLr37/Sr38* также могло быть связано с индукцией SAR после предварительного контакта с *P. triticina*. Действие SAR необходимо учитывать при проведении оценок в случаях поражения растений комплексом болезней, а также при создании пирамид генов устойчивости к ржавчинным болезням.

В омской популяции *P. triticina* выявлены резкие флуктуации по вирулентности. Так, в 2013 г. отметили вспышку размножения вирулентных к *Lr47* клонов (до 70%), но позже они элиминировались из популяции (Plotnikova et al., 2018). В популяции 2022 г. доли изолятов, вирулентных к *Lr47* и *Lr57*, составили 2,5% и 0,0%, а в 2023 г. они возросли до 29% и 82% соответственно (Meshkova, 2024). С учетом активных микроэволюционных процессов в западносибирских популяциях ржавчинных грибов необходим дальнейший мониторинг источников устойчивости к болезням, а также создание сортов с комплексом генов устойчивости, проявивших эффективность в условиях эпитотии.

При включении источников устойчивости к болезням в селекционные программы важно учитывать их основные хозяйственно ценные свойства. Исследования набора образцов в контрастных погодных условиях Западной Сибири показали, что полезным свойством изученных образцов был короткий вегетационный период. Однако большая часть материала не была адаптирована к характерным для юга Западной Сибири засухам и почвенной микрофлоре и показала низкую урожайность. Как правило, образцы инорайонной селекции имели низкие показатели полевой всхожести, массы зерна растений и массы 1000 зерен. Исключение составил небольшой набор российских образцов ('Гартус 598', 'Вировка', АНК-40) и канадский Wb. 59484.

Выводы

1. Основная часть изученных образцов проявила иммунитет или высокую устойчивость к бурой и стеблевой ржавчинам при оценке в полевых и лабораторных условиях в 2020–2022 гг. Имунные образцы не выявлены при вспышке бурой и стеблевой ржавчины в 2024 г.

2. В 2024 г. высокую групповую устойчивость (по индексу устойчивости) к бурой и стеблевой ржавчинам за счет позднего инфицирования, замедления или стабилизации поражения проявили образцы: KS90WGRC10 (*Lr39*), Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), *TcLr18*, *TcLr50*, *TcLr28*, *TcLr35/Sr39*, 'Pavon' (*Lr47*), *TcLr51*, TA5602 (*Lr57*), 'Yektay 406', АНК-40, *TcLr37/Sr38*, 'Дуэт' (*Lr9*).

3. Высокую устойчивость к стеблевой ржавчине в 2024 г. показали образцы 'Вировка', *TcLr21*, *TcLr22a*, к-65264, W2691 SR36TT1, 'Gouritz' (*Sr36*), 'Livanjka' (*Sr36*), W2691 SR37TT2 (*Sr37*), 'Гартус 598', Wb. 58633, Лютеценс 849-81, Л-592, 'Элемент 22' (*Lr26/Sr31* + *Sr35*).

References / Литература

Baker L., Grewal S., Yang C.Y., Hubbart-Edwards S., Scholefield D., Ashling S. et al. Exploiting the genome of *Thinopyrum elongatum* to expand the gene pool of hexaploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2020;133(7):2213-2226. DOI: 10.1007/s00122-020-03591-3

Baranova O., Solyanikova V., Kyrova E., Kon'kova E., Gaponov S., Sergeev V. et al. 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

Baranova O.A., Adonina I.G., Sibikeev S.N. Molecular cytogenetic characteristics of new spring bread wheat introgressive lines resistant to stem rust. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;28(4):377-386. [in Russian] (Баранова О.А., Адонина И.Г., Сибикеев С.Н. Молекулярно-цитогенетическая характеристика новых интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы, устойчивых к стеблевой ржавчине. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2024;28(4):377-386). DOI: 10.18699/vjgb-24-43

Dospikhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 5th ed. Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. Москва: Агропромиздат; 1985).

Dyakov Yu.T. Population biology of phytopathogenic fungi (Populyatsionnaya biologiya fitopatogennykh gribov). Moscow: Muravey; 1998. [in Russian] (Дьяков Ю.Т. Популяционная биология фитопатогенных грибов. Москва: Муравей; 1998).

FAO. The impact of disasters and crises on agriculture and food security. Rome: FAO; 2021. DOI: 10.4060/cb3673en

Gulyaeva E., Gannibal Ph., 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., Shaydayuk E., Shreyder E., Kushnirenko I., Shamanin V. Genetic diversity of promising spring wheat accessions from Russia and Kazakhstan for rust resistance. *Plants*. 2024;13(17):2469. DOI: 10.3390/plants13172469

Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Gannibal Ph.B. Leaf rust resistance genes in wheat cultivars registered in Russia and their influence on adaptation processes in pathogen populations. *Agriculture*. 2021;11(4):319. DOI: 10.3390/agriculture11040319

Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Shamanin V.P., Akhmetova A.K., Tyunin V.A., Shreyder E.R. et al. Genetic structure of Russian and Kazakhstani leaf rust causative agent *Puccinia triticina* Erikss. populations as assessed by virulence profiles and SSR markers. *Agricultural Biology*. 2018;53(1):85-95. DOI: 10.15389/agrobiol.2018.1.85eng

King J., Dreisigacker S., Reynolds M., Bandyopadhyay A., Braun H., Crespo-Herrera L. et al. Wheat genetic resources have avoided disease pandemics, improved food security, and reduced environmental footprints: A review of historical impacts and future opportunities. *Global Change Biology*. 2024;30(8):e17440. DOI: 10.1111/gcb.17440

Koishybaev M. Wheat diseases. Ankara: FAO; 2018. [in Russian] (Койшыбаев М. Болезни пшеницы. Анкара: ФАО; 2018).

Kovalenko E.D., Kolomiets T.M., Kiseleva M.I., Zhemchuzhina A.I., Smirnova L.A., Shcherbik A.A. Methods for evaluation and selection of source material while developing wheat cultivars resistant to brown rust: Guidelines of the All-Russian Research Institute of Phytopathology (Metody otsenki i otbora iskhodnogo materiala pri sozdanii sortov pshenitsy, ustoychivyykh k buroy rzhavchine: metodicheskiye rekomendatsii VNIIF). Moscow; 2012. [in Russian] (Коваленко Е.Д., Коломиец Т.М., Киселева М.И., Жемчужина А.И., Смирнова Л.А., Щербик А.А. Методы оценки

- и отбора исходного материала при создании сортов пшеницы устойчивых к бурой ржавчине: методические рекомендации ВНИИФ. Москва; 2012).
- Mains E.B., Jackson H.S. Physiologic specialization in the leaf rust of wheat *Puccinia triticina* Erikss. *Phytopathology*. 1926;16(2):89-120.
- McIntosh R.A., Dubcovsky J., Rogers W.J., Xia X.C., Raupp W.J. Catalogue of gene symbols for wheat: 2018 supplement. *Annual Wheat Newsletter*. 2018;64:73-93.
- Meshkova L.V. Virulence of spore samples of leaf rust of wheat in the forest-steppe of Omsk Province (Virulentnost sporovykh obraztsov buroy rzhavchiny pshenitsy v lesostepi Omskoy oblasti). In: "Youth and Science-2024: The Driver of the Present and the Key to a Successful Future": *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Vol. 1*. Petropavlovsk: Kozybaev University; 2024. p.339-341. [in Russian] (Мешкова Л.В. Вирулентность споровых образцов бурой ржавчины пшеницы в лесостепи Омской области. В кн.: «Молодежь и наука-2024: двигатель настоящего и залог успешного будущего»: материалы международной научно-практической конференции: Т. 1. Петропавловск: СКУ им. М. Козыбаева; 2024. С.339-341).
- Murashov V.V., Morozova Z.A. Comparative morphogenesis of *Triticum timopheevii* (Zhuk.) and synthetic octoploid species *T. timonovum* Heslot et Ferrary. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2008;63(3):127-133 DOI: 10.3103/S0096392508030073
- Patpour M., Hovmöller M.S., Rodriguez-Algaba J., Randazzo B., Villegas D., Shamanin V.P. et al. Wheat stem rust back in Europe: diversity, prevalence and impact on host resistance. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:882440. DOI: 10.3389/fpls.2022.882440
- Plotnikova L.Ya. Effect of benzothiadiazole, an inducer of systemic acquired resistance, on the pathogenesis of wheat brown rust. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2009;56(4):517-526. DOI: 10.1134/S1021443709040116
- Plotnikova L.Ya., Knaub V.V. Exploitation of the genetic potential of *Thinopyrum* and *Agropyron* genera to protect wheat from diseases and environmental stresses. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;28(5):536-553. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Кнауб В.В. Использование генетического потенциала родов *Thinopyrum* и *Agropyron* для защиты пшеницы от болезней и абиотических стрессов. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2024;28(5):536-553). DOI: 10.18699/vjgb-24-60
- 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
- Plotnikova L.Ya., Shtubey T.Yu. Effectiveness of the wheat *Lr22b*, *Lr34*, and *Lr37* genes for adult plant resistance to leaf rust in west Siberia and the cytophysiological basis of their action. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2012;16(1):123-131. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Штубей Т.Ю. Эффективность генов возрастной устойчивости пшеницы к бурой ржавчине *Lr22b*, *Lr34*, *Lr37* в Западной Сибири и цитофизиологическая основа их действия. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2012;16(1):123-131).
- Prasad P., Savadi S., Bhardwaj S.C., Gupta P.K. The progress of leaf rust research in wheat. *Fungal Biology*. 2020;124(6):537-550. DOI: 10.1016/j.funbio.2020.02.013
- Skolotneva E.S., Kelbin V.N., Morgunov A.I., Boiko N.I., Shamanin V.P., Salina E.A. Races composition of the Novosibirsk population of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *Mycology and Phytopathology*. 2020;54(1):49-58. [in Russian] (Сколотнева Е.С., Кельбин В.Н., Моргунов А.И., Бойко Н.И., Шаманин В.П., Салина Е.А. Расовый состав новосибирской популяции *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *Микология и фитопатология*. 2020;54(1):49-58). DOI: 10.31857/S0026364820010092
- 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. [in Russian] (Сколотнева Е.С., Кельбин В.Н., Шаманин В.П., Бойко Н.И., Апарина В.А., Салина Е.А. Ген *Sr38*: значение для селекции мягкой пшеницы в условиях Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(7):740-745). DOI: 10.18699/VJ21.084
- Skolotneva E.S., Kosman E., Kelbin V.N., Morozova E.V., Laprina Yu.V., Baranova O.A. et al. SSR variability of stem rust pathogen on spring bread wheat in Russia. *Plant Disease*. 2023;107(2):493-499. DOI: 10.1094/pdis-10-22-2373-re
- Stakman E.C., Stewart D.M., Loegering W.Q. Identification of physiological races of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. Washington, DC: USDA; 1962.
- Zhan J., McDonald B.A. Experimental measures of pathogen competition and relative fitness. *Annual Review of Phytopathology*. 2013;51:131-153. DOI: 10.1146/annurev-phyto-082712-102302

Информация об авторах

Людмила Яковлевна Плотникова, доктор биологических наук, профессор, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск. Институтская пл., 1, lya.plotnikova@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0002-9287-9870>

Валерия Вячеславовна Кнаб, ассистент, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, vv.knaub@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0003-3035-0629>

Тлеужан Маратулы Жанболат, аспирант, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, tm.zhanbolat1912@omgau.org, <https://orcid.org/0009-0004-3706-8882>

Екатерина Сергеевна Сколотнева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, skolotnevaES@bionet.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8047-5695>

Юлия Владимировна Лаприна, лаборант-исследователь, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, yulia.laprina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-2575-2667>

Евгений Валерьевич Зуев, кандидат сельскохозяйственных наук, руководитель отдела, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, ezuev@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9259-4384>

Information about the authors

Lyudmila Ya. Plotnikova, Dr. Sci. (Biology), Professor, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutetskaya Sq., Omsk 644008, Russia, lya.plotnikova@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0002-9287-9870>

Valeria V. Knaub, Assistant, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutetskaya Sq., Omsk 644008, Russia, vv.knaub@omgau.org, <https://orcid.org/0000-0003-3035-0629>

Tleuzhan M. Zhanbolat, Postgraduate Student, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutetskaya Sq., Omsk 644008, Russia, tm.zhanbolat1912@omgau.org, <https://orcid.org/0009-0004-3706-8882>

Ekaterina S. Skolotneva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, skolotnevaES@bionet.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8047-5695>

Yulia V. Laprina, Laboratory Research Assistant, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, yulia.laprina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-2575-2667>

Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, ezuev@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 01.04.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 14.07.2025. The article was submitted on 01.04.2025; approved after reviewing on 23.06.2025; accepted for publication on 14.07.2025.