



DOI: 10.22363/2312-797X-2025-20-3-354-367

EDN VAXWJL

УДК 631.527.21: 632.4.01.08: 632.938.1

Научная статья / Research article

Устойчивость сортов яровой мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. к бурой ржавчине в условиях Центрального Нечерноземья

Б.Б. Наджодов^{1,2}  , В.С. Рубец^{2,3} , М.Г. Дивашук^{1,2} ¹Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева,
г. Москва, Российская Федерация²Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии,
г. Москва, Российская Федерация³Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, г. Москва, Российская Федерация
 boburnajodov@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований полевой устойчивости сортов яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) к бурой ржавчине в условиях Центрального района Нечерноземной зоны России (ЦРНЗ). Изучены 15 сортообразцов яровой мягкой пшеницы в полевых условиях в 2021–2024 гг. Цель исследования — установить зависимость урожайности сортов яровой пшеницы от эффективности генов устойчивости к бурой ржавчине в условиях ЦРНЗ. Для поиска публикаций по теме исследования и идентификации сортов с *Lr*-генами использованы базы данных Wheatpedigree, Scopus, NCBI, PubMed, Google Scholar, РИНЦ и Cyberleninka. Оценка устойчивости сортов к бурой ржавчине проводили по универсальной 9-балльной шкале ВИР. Выявлено, что в годы с благоприятными метеорологическими условиями в период от всходов до колошения устойчивость сортов пшеницы к листовой ржавчине положительно влияет на урожайность зерна, при засухе в этот период — нет. Гены устойчивости *Lr*, имеющиеся у изученного набора сортов, относительно эффективно защищают их в годы с невысокой инфекционной нагрузкой. В годы эпифитотий их защиты недостаточно. Поэтому следует искать более эффективные гены или их комплексы при создании новых сортов в ЦРНЗ. Наиболее эффективными за 2021–2024 гг. оказались гены *Lr19 + Lr6* (донор сорт Тулайковская 108) и *Lr 21* (донор сорт Гранни).

Ключевые слова: *Puccinia tritica*, селекция на устойчивость, листовая ржавчина, *Lr*-гены

Вклад авторов: Наджодов Б.Б. — проведение полевых экспериментов, сбор и статистический анализ данных, интерпретация результатов, подготовка первоначального варианта рукописи, утверждение окончательной версии статьи; Рубец В.С., Дивашук М.Г. — общее научное руководство, критический анализ и редактирование текста рукописи, утверждение окончательной версии статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Наджодов Б.Б., Рубец В.С., Дивашук М.Г., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

История статьи: поступила в редакцию 25 октября 2024 г., принята к публикации 10 июля 2025 г.

Для цитирования: Наджодов Б.Б., Рубец В.С., Дивашук М.Г. Устойчивость сортов бурой мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. к бурой ржавчине в условиях Центрального Нечерноземья // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2025. Т. 20. № 3. С. 354–367. doi: 10.22363/2312-797X-2025-20-3-354-367 EDN: VAXWJL

Resistance of spring wheat *Triticum aestivum* L. to leaf rust under the conditions of the Central Non-Black-Earth region

Boburjon B. Najodov^{1, 2}  , Valentina S. Rubets^{2, 3} ,
Mikhail G. Divashuk^{1, 2} 

¹Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

²All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russian Federation

³Tsitin Main Moscow Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

 boburnajodov@gmail.com

Abstract. The results of experimental studies on field resistance of spring common wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties to leaf rust in the Central Region of the Non-Black Soil Zone of Russia were described. Fifteen spring wheat varieties were evaluated under field conditions from 2021 to 2024. The study aimed to analyze the yield performance of these varieties depending on the effectiveness of resistance genes (Lr genes) against leaf rust in the Central Non-Black Earth region of Russia. A search for relevant publications and identification of Lr genes in the varieties was conducted using databases such as Wheatpedigree, Scopus, NCBI, PubMed, Google Scholar, RSCI, and Cyberleninka. Resistance to brown rust was assessed using the 9-point VIR scale. The results showed that in years with favorable weather conditions from sprouting to heading, resistance to leaf rust positively influenced grain yield. However, during drought periods, this resistance had no significant effect on yield. Lr resistance genes in the studied varieties provided relatively effective protection in years with low infection pressure, but were insufficient during epidemic years. Therefore, more effective genes or their combinations should be considered when developing new varieties for the Central Non-Black Earth region of Russia. The most effective resistance genes identified from 2021 to 2024 were *Lr19 + Lr6* (from the donor variety Tulaykovskaya 108) and *Lr21* (from the donor variety Granny).

Key words: *Puccinia triticina*, breeding for resistance, brown rust, Lr genes

Authors' contribution. Najodov B.B. — conducting field experiments, data collection, statistical analysis and interpretation of results, preparation of the original manuscript draft and approval of the final manuscript version; Rubets V.S., Divashuk M.G. — general scientific supervision, critical review, editing, and approval of the final manuscript version.

Conflict of interests. The authors declared no conflict of interests.

Article history: received 25 October 2024; accepted 10 July 2025.

For citation: Najodov BB, Rubets VS, Divashuk MG. Resistance of spring soft wheat *Triticum aestivum* L. varieties to leaf rust in conditions of Central Non-Black Earth region. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2025;20(3):354–367. doi: 10.22363/2312-797X-2025-20-3-354-367 EDN: VAXWJL

Введение

Сокращение потерь урожая, вызванных грибными патогенами, является эффективной мерой для увеличения производства пшеницы [1]. Вредители и болезни ежегодно приводят в мире к потерям 20...40 % урожая продовольственных культур и экономическим убыткам около 220 млрд долларов США¹. В ходе длительного естественного отбора и искусственной селекции пшеница потеряла множество отличных генов устойчивости к болезням [3, 4]. Один из самых вредоносных грибных патогенов пшеницы — *Puccinia triticina* Eriksson (Pt) — возбудитель бурой (листовой) ржавчины пшеницы. Это заболевание встречается в большинстве регионов выращивания пшеницы и вызывает значительные потери урожая у восприимчивых сортов при благоприятных климатических условиях [5–7]. Наиболее эффективным, экономически выгодным и экологически оправданным способом защиты растений от болезней является селекция и районирование устойчивых сортов. Однако для Центральной Нечерноземной и Черноземной зон России эта проблема остается нерешенной [8].

По некоторым оценкам, устойчивость к листовой ржавчине, обусловленная определенным геном *Lr*, сохраняется не более 5–7 лет [9], поэтому задача поиска и использования новых эффективных генов *Lr* весьма актуальна в селекции. Первым широко распространенным сортом, устойчивым к листовой ржавчине благодаря гену *Lr14a*, стал Repown (зарегистрирован в 1937 г.) [10–12]. Для Центрального региона России (ЦРНЗ) характерна устойчивость к листовой ржавчине, обеспечиваемая генами *Lr19*, *Lr23*, *Lr9*, *Lr24*, *Lr25*, *Lr28*, *Lr27*, *Lr31* и *Lr39*, а для Центрально-Черноземного региона важны гены *Lr9*, *Lr44* и *Lr49*, которые обеспечивают ювенильную устойчивость, в то время как гены возрастной устойчивости, такие как *Lr24*, *Lr38*, *Lr39*, *Lr43*, *Lr49*, *Lr1*, *Lr2* и *LrAgi*, проявляют высокую эффективность в полевых условиях [13, 14]. Анализ литературных источников показал, что ген *Lr10*, локализованный на хромосоме 1AS, встречается у сортов Злата (st), Саратовская 74, Агата, Симбирцит и Маргарита. Данный ген широко использовался в селекционных программах в России, Австралии, США и международном центре CIMMYT долгие годы [15].

К настоящему времени каталогизировано более 82 *Lr*-генов устойчивости к листовой ржавчине [16, 17], из которых около 50 % происходят от других видов. Эти гены распределены по всем 21 хромосоме пшеницы, причем большинство из них находятся на коротких плечах хромосом [18, 19]. Однако из-за размера и сложности генома пшеницы до сих пор удалось клонировать только десять генов *Lr1*, *Lr9*, *Lr10*, *Lr13*, *Lr4a*, *Lr21*, *Lr22a*, *Lr34*, *Lr42* и *Lr67* [6, 20–22].

Цель исследования — оценить устойчивость набора сортов яровой мягкой пшеницы к бурой ржавчине на естественном инфекционном фоне ЦРНЗ и подтвердить эффективность генов *Lr*, выявленных по литературным источникам.

¹ The Food and Agriculture Organization of the United Nations Home Page. Режим доступа: <https://www.fao.org/director-general/news/news%20article/zh/c/1301879/> (Дата обращения: 15.11.2022).

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования послужили 15 сортов яровой мягкой пшеницы коллекции РГАУ — МСХА имени К.А. Тимирязева (табл. 1). Полевые эксперименты проводили в 2021–2024 гг. по общепринятой агротехнике для данной зоны. Устойчивость к бурой ржавчине оценивали по универсальной 9-балльной шкале ВИР дважды: в фазу колошения и фазу цветения, согласно методическим рекомендациям по изучению мировой коллекции пшеницы². Использовали стандартную 9-балльную шкалу:

- 1 балл (очень низкая устойчивость) соответствовал сильному поражению листьев (более 50...100 % площади);
- 3 балла (низкая устойчивость) — сильному поражению (около 50 %);
- 5 баллов (средняя устойчивость) — умеренному поражению (20...30 %);
- 7 баллов (высокая устойчивость) — слабому поражению (10...20 %);
- 9 баллов (очень высокая устойчивость) — отсутствию поражения (0 %).

Таблица 1

Материал для исследования

Сорт	Оригинатор	Страна	Год допуска
Злата (st)	ФГБНУ ФИЦ «Немчиновка», ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ»	Россия	2009
Саратовская 74	ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока»	Россия	2012
Агата	ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Немчиновка», ФГБНУ «ВИМ»	Россия	2014
Тулайковская 108	ФГБНУ «СФИИЦ РАН», ФАНЦ Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого	Россия	2014
Симбирцит	ФГБНУ «СФИИЦ РАН», ФГУП «Колос»	Россия	2006
Тюменская 29	ФГБНУ «ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН	Россия	2013
Обская 2	ФГБНУ ФИЦ «Институт цитологии и генетики СО РАН»	Россия	2014
Тобольская	ФГБНУ «Федеральный Алтайский научный центр Агробиотехнологий»	Россия	2014
Алтайская Жница	ФГБНУ «Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий»	Россия	2014
Маргарита	ФГБНУ «Самарский ФИИЦ РАН», АО «Приволжское»	Россия	2008
Учитель	ФГБНУ «ФНЦ Биологических систем и агротехнологий РАН»	Россия	2001
Фаворит	ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока»	Россия	2007
Гранни	SAATBAU LINZ EGEN	Чехия	2009
Тризо	DEUTSCHE SAATVEREDELUNG AG (DSV)	Германия	2004
Ирень	ФГБНУ «Уральский ФАНИЦ РАН	Россия	1998

Источник: выполнено Б.Б. Наджодовым.

² Дорофеев В.Ф., Руденко М.И., Шитова И.П., Корнейчук В.А. Методические указания по изучению мировой коллекции пшеницы. Л. : ВИР; 1977.

Образцы, имеющие оценки в диапазоне 7–9 баллов, относили к высокоустойчивым. Для поиска и подтверждения наличия генов устойчивости (*Lr*-генов) у исследуемых сортов использовали данные из опубликованных источников (табл. 2)³.

Для статистической обработки экспериментальных данных использовали методы однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), позволяющего выявить достоверное влияние сортов на урожайность в условиях многолетних полевых испытаний. В дополнение применен анализ главных компонент (PCA), направленный на обобщение и визуализацию взаимосвязей между тремя ключевыми признаками: урожайностью, степенью устойчивости к бурой ржавчине и наличием генов устойчивости (*Lr*-генов). PCA позволил выявить дифференциацию сортов по их адаптивным реакциям в разные годы — от благоприятных до засушливых. Такой подход позволяет комплексно оценивать вклад в формирование урожая как биотических, так и абиотических факторов. Все расчеты и визуализация выполнены с использованием языка программирования Python (версия 3.13) с применением библиотек *pandas*, *scipy*, *statsmodels*, *matplotlib* и *sklearn*.

Результаты исследования и обсуждение

Бурая ржавчина наблюдается в условиях ЦРНЗ не каждый год. Для ее развития необходимы благоприятные метеорологические условия. В годы исследований они довольно сильно различались, и, как следствие, не во все годы было отмечено развитие болезни (рис. 1, табл. 2).

В 2021 г. посев провели 11 мая вследствие переувлажнения почвы и низких температур. Погода в первую половину вегетации благоприятствовала развитию растений. Однако во второй половине наблюдалась жесткая засуха при высокой температуре воздуха. Такие условия неблагоприятны для развития листовой ржавчины, тем не менее естественный инфекционный фон имел место. Все сорта пшеницы были поражены в той или иной степени.

Стандарт Злата, Тулайковская 108, Алтайская Жница, Маргарита, Фаворит, Гранни и Тризо показали среднюю степень устойчивости (5 баллов). Почти у всех перечисленных сортов имеются различные идентифицированные гены устойчивости *Lr* (табл. 2). Эти сорта сформировали высокую урожайность (рис. 2).

Более высокой устойчивостью и урожайностью отличались сорта Саратовская 74, Симбирцит, Тюменская 29, Обская 2, Тобольская (7 баллов). Не для всех сортов удалось найти в литературе, какие гены устойчивости *Lr* содержатся в их генотипе. Однако они оказались эффективными для защиты растений от болезни в условиях ЦРНЗ.

Различную степень восприимчивости показали сорта Агата, Учитель и Ирен. Такие результаты неожиданны для сорта Агата, несущего комплекс генов *Lr10 + Lr19* (табл. 2). Несмотря на довольно сильное поражение, этот сорт

³ Реестр селекционных достижений. Режим доступа: <https://gossortrf.ru/registry/> (дата обращения: 01.10.2024); GRIS (Genetic Resources Information System for Wheat and Triticale). Режим доступа: <http://www.wheatpedigree.net/> (дата обращения: 01.10.2024).

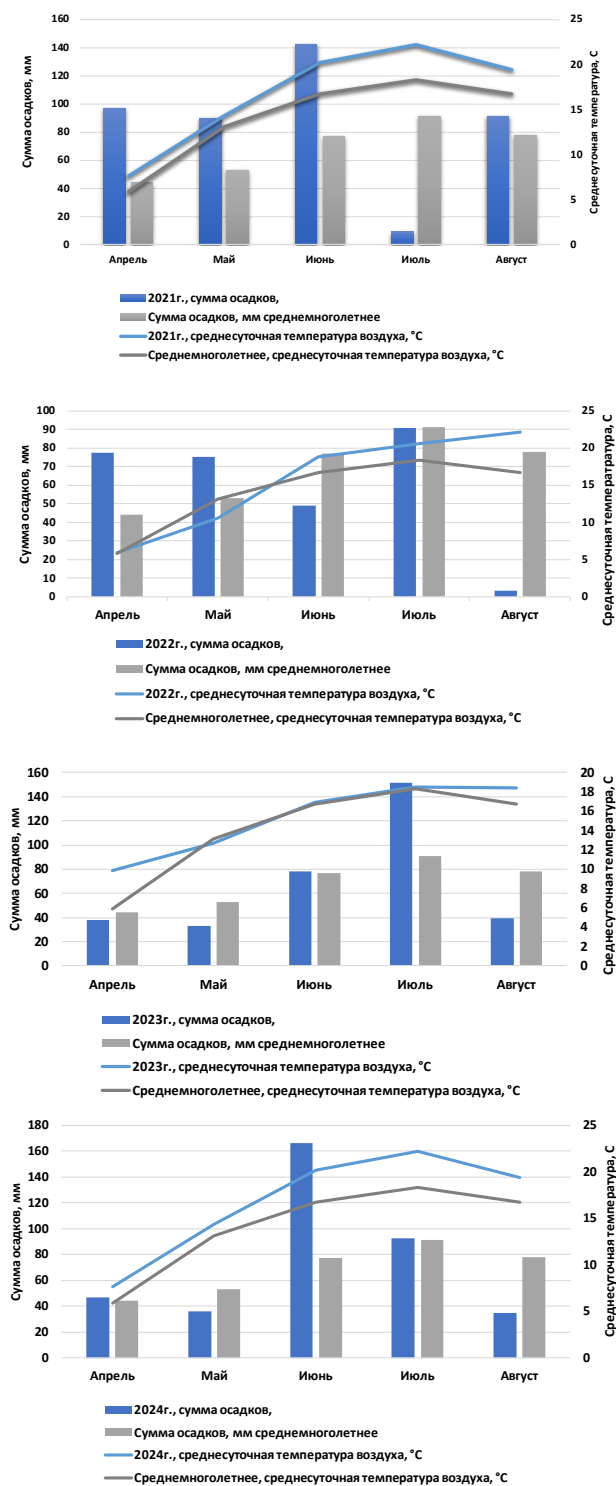


Рис. 1. Метеорологические условия в годы исследований (2021–2024 гг.)
Источник: выполнено Б.Б. Надждовым с помощью MS Excel и MS Word.

оказался толерантным и сформировал высокую урожайность (рис. 2). В целом корреляционный анализ показал, что в 2021 г. наблюдалась довольно сильная положительная корреляционная связь между урожайностью зерна и устойчивостью к бурой ржавчине $r = 0,616$ (рис. 3). Коэффициент детерминации r^2 показывает, что около 38 % изменчивости по урожайности пшеницы определяется генотипом.

В 2022 г. посев был проведен в оптимальные сроки, 5 мая, при условиях, близких к среднесезонным (см. рис. 1). Период от всходов до колошения проходил при пониженных температурах и достаточном увлажнении. Вторая половина вегетации проходила при благоприятных для развития фитопатогенов (в т. ч. листовой ржавчины), что отрицательно сказалось на урожайности (рис. 2).

Возможно, отсутствие визуальных признаков бурой ржавчины (естественный инфекционный фон не наблюдался, табл. 2), а также слабое развитие других болезней растений в 2022 г. и отдельные годы способствовали формированию максимальной урожайности за весь период исследований у некоторых сортов: Маргарита, Учитель, Гранни, Тризо и Ирень (рис. 2, табл. 3). Урожайность остальных сортов в целом оставалась на уровне 2021 г. Однако следует отметить, что оценка устойчивости сортов к болезням традиционно проводится не только по урожайности и степени поражения в условиях естественного инфекционного фона, но и при сравнении с защищенным контролем (фитосанитарной обработанным вариантом того же сорта).

В нашем исследовании защищенный контроль не использовался, что ограничивало возможность полной оценки толерантности сортов. Это требует дополнительных наблюдений в годы с более выраженным развитием патогенов.

Таблица 2

Устойчивость сортов яровой пшеницы к бурой ржавчине, 2021–2024 гг.

Сорт	2021	2022	2023	2024	Среднее	Δ	Гены устойчивости (по литературным источникам)
Злата (st)	5,0	9,0	9,0	3,0	6,5	b	<i>Lr10</i> [23]
Саратовская 74	7,0	9,0	9,0	3,0	7,0	ab	<i>Lr10</i> [24]
Агата	3,0	9,0	5,0	3,0	5,0	c	<i>Lr10, Lr19</i> [25, 26]
Тулайковская 108	5,0	9,0	7,0	7,0	7,0	a	<i>Lr19, Lr6</i> [27, 28]
Симбирцит	7,0	9,0	9,0	3,0	7,0	ab	<i>Lr10</i> [29]
Тюменская 29	7,0	9,0	9,0	3,0	7,0	ab	—
Обская 2	7,0	9,0	9,0	3,0	7,0	ab	—
Тобольская	7,0	9,0	9,0	1,0	6,5	b	—
Алтайская Жница	5,0	9,0	7,0	3,0	6,0	bc	—
Маргарита	5,0	9,0	7,0	3,0	6,0	bc	<i>Lr49, Lr34, Lr10</i> [30]
Учитель	3,0	9,0	9,0	3,0	6,0	bc	—

Окончание табл. 2

Сорт	2021	2022	2023	2024	Среднее	Δ	Гены устойчивости (по литературным источникам)
Фаворит	5,0	9,0	7,0	1,0	5,5	с	Lr6Agi [31]
Гранни	5,0	9,0	9,0	7,0	7,5	а	Lr21 [32, 33]
Тризо	5,0	9,0	7,0	3,0	6,0	bc	Lr2a, Lr18, Lr20 [34–36]
Ирень	1,0	9,0	5,0	5,0	5,0	с	—
Среднее по году	5,0	9,0	7,0	3,0	5,0		—

*Примечание: значения с одинаковыми буквами в столбце «Δ — Группы Дункана» статистически не отличаются друг от друга при уровне значимости $p \leq 0,05$. В 2022 г. отсутствовал естественный инфекционный фон по бурой ржавчине.

Источник: выполнено Б.Б. Наджодовым с помощью MS Excel и MS Word.

В 2023 г. посев осуществили в благоприятные сроки — 22 апреля. Условия теплообеспеченности и увлажнения способствовали быстрому и дружному появлению всходов. Однако дальнейшая вегетация сопровождалась сильной засухой при умеренной температуре (см. рис. 1). В результате растения пшеницы ускорили свое развитие и, в целом, недостаточно сформировали вегетативное тело. Во второй половине вегетации выпавшие осадки распределялись крайне неравномерно. В таких условиях листовая ржавчина проявилась слабо (см. табл. 2).

У сортов не было заметно видимых признаков поражения. Только у сортов Тулайковская 108, Алтайская Жница, Маргарита, Фаворит и Тризо обнаружили немногочисленные пустулы. Сорта Агата и Ирень показали средний уровень устойчивости. В 2023 г. снизили урожайность до минимальной за 4 года многие сорта: Злата, Тулайковская 108, Симбирцит, Тюменская 29, Обская 2, Алтайская Жница, Фаворит (табл. 3, рис. 2). Урожайность остальных также была низкой относительно предыдущих лет. Поскольку ржавчины в 2023 г. было мало, то и ее влияние на урожайность сортов пшеницы была незначительной, что подтверждается отсутствием корреляции между урожайностью и устойчивостью (рис. 3).

Таблица 3

Урожайность сортов яровой пшеницы, г/м², в 2021–2024 гг.

Сорт	Урожайность, г/м²							Δ
	2021	2022	2023	2024	Среднее	min	max	
Злата (st)	421,3	423	272,1	308,7	356,3	272,1	423,0	b
Саратовская 74	436,4	426,2	288,7	231,9	345,8	231,9	436,4	ab
Агата	456,8	415,6	270,7	189,5	333,2	189,5	456,8	с
Тулайковская 108	426,9	294,4	252,1	356,5	332,5	252,1	426,9	а
Симбирцит	478,5	483,5	269	313,6	386,2	269,0	483,5	ab

Окончание табл. 3

Сорт	Урожайность, г/м ²							Δ
	2021	2022	2023	2024	Среднее	min	max	
Тюменская 29	436,6	434,3	232,1	277,9	345,2	232,1	436,6	ab
Обская 2	499,6	469,3	258,9	397,5	406,3	258,9	499,6	ab
Тобольская	527,2	497,4	315,8	273,6	403,5	273,6	527,2	b
Алтайская Жница	460,9	417,4	267,7	336,5	370,6	267,7	460,9	bc
Маргарита	489,3	717,0	353,7	252,8	453,2	252,8	717,0	bc
Учитель	311,9	466,4	219,4	164,6	290,6	164,6	466,4	bc
Фаворит	511,3	498,8	201,4	205,3	354,2	201,4	511,3	c
Гранни	467,9	500,7	282	198,7	362,3	198,7	500,7	a
Тризо	397,4	431,4	276,8	227,5	333,3	227,5	431,4	bc
Ирень	364,0	440,4	256,1	252,9	328,4	252,9	440,4	c
Среднее	445,7	461,1	267,8	336,5	377,8	267,8	461,1	–
НСР ₀₅	76,0	154,4	53,1	57,3	152,2	–	–	–

Примечание. Средние, помеченные одинаковыми буквами, не различаются при $p \leq 0,05$ (критерий Дункана); НСР₀₅ = г/м².

Источник: выполнено Б.Б. Наджодовым с помощью MS Excel и MS Word.

Анализ урожайности сортов яровой пшеницы за 2021–2024 гг. показал существенную изменчивость как по годам, так и между сортами. Средняя урожайность варьировала от 290,6 до 483,5 г/м². Минимальные значения урожайности большинства сортов зафиксированы в 2023 г., что, вероятно, связано с неблагоприятными погодными условиями в первой половине вегетации. Наибольшую стабильность по годам продемонстрировали сорта Злата (ст), Тулайковская 108, Обская 2 и Гранни. Сорт Маргарита показал максимальный уровень урожайности за весь период (717 г/м² в 2022 г.), однако отличался высокой амплитудой между годами (Δ = bc). По результатам однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) различия между сортами статистически значимы; НСР₀₅ = 152,2 г/м². Группировка средних по критерию Дункана выделила сорта с наивысшими показателями — Симбирцит, Тобольская, Обская 2, а также Тулайковская 108, вошедшая в группу «а», что свидетельствует о её высокой и стабильной продуктивности.

Не было заметно видимых признаков поражения сортов, только у сортов Тулайковская 108, Алтайская Жница, Маргарита, Фаворит и Тризо были обнаружены немногочисленные пустулы. Сорта Агата и Ирень показали средний уровень устойчивости. Многие сорта в 2023 г. снизили урожайность до минимальной за 4 года: Злата, Тулайковская 108, Симбирцит, Тюменская 29, Обская 2, Алтайская Жница, Фаворит (см. табл. 3, рис. 2). Урожайность остальных также была низкой

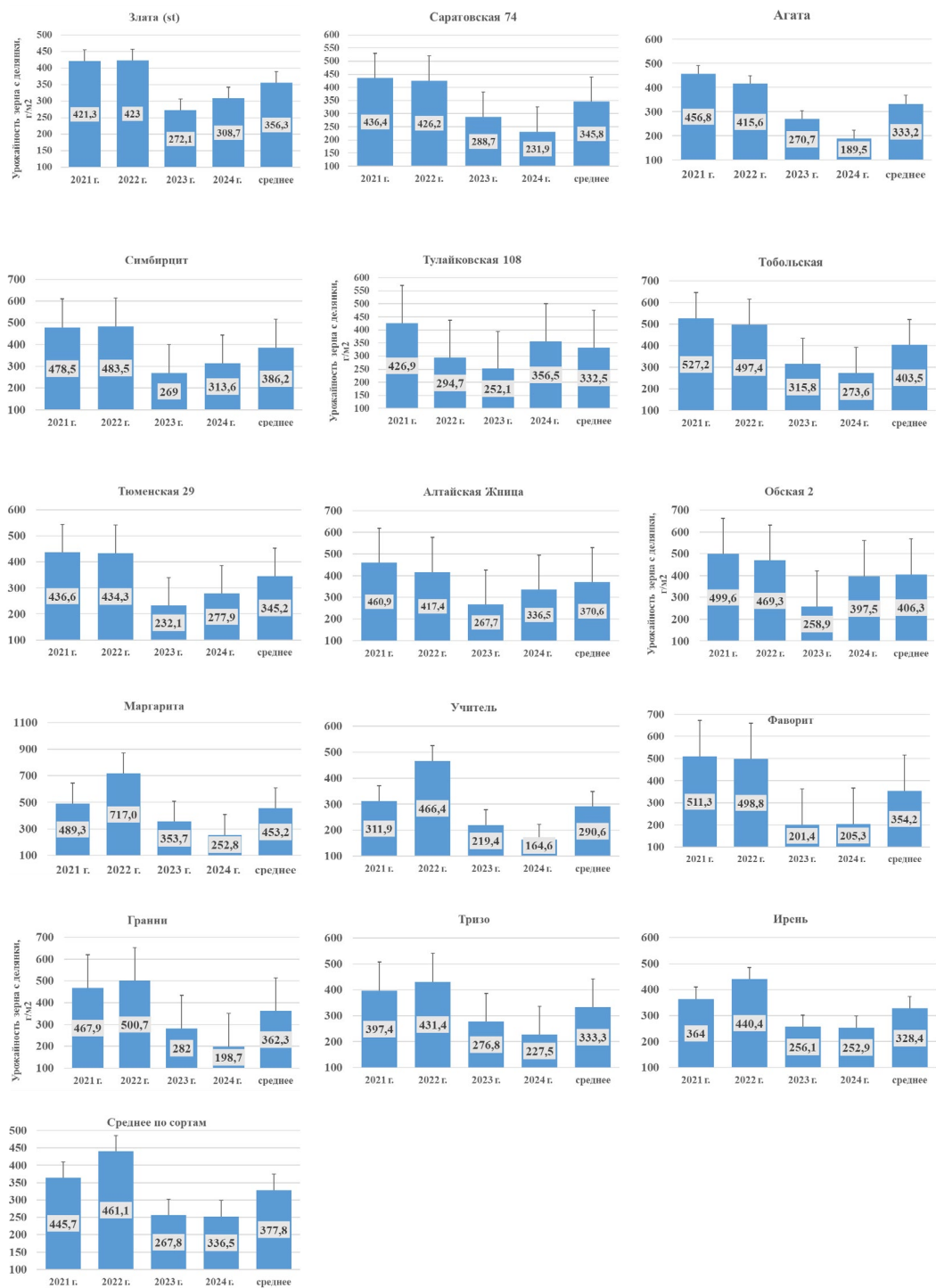


Рис. 2. Урожайность сортов яровой пшеницы, г/м², в 2021–2024 гг. и в среднем по годам (в качестве планки погрешности приведено значение НСР₀₅)

Источник: выполнил Б.Б. Наджодов с помощью программы Python 3.13.

относительно предыдущих лет. Поскольку ржавчины в 2023 г. было мало, то и ее влияние на урожайность сортов пшеницы оказалась незначительной.

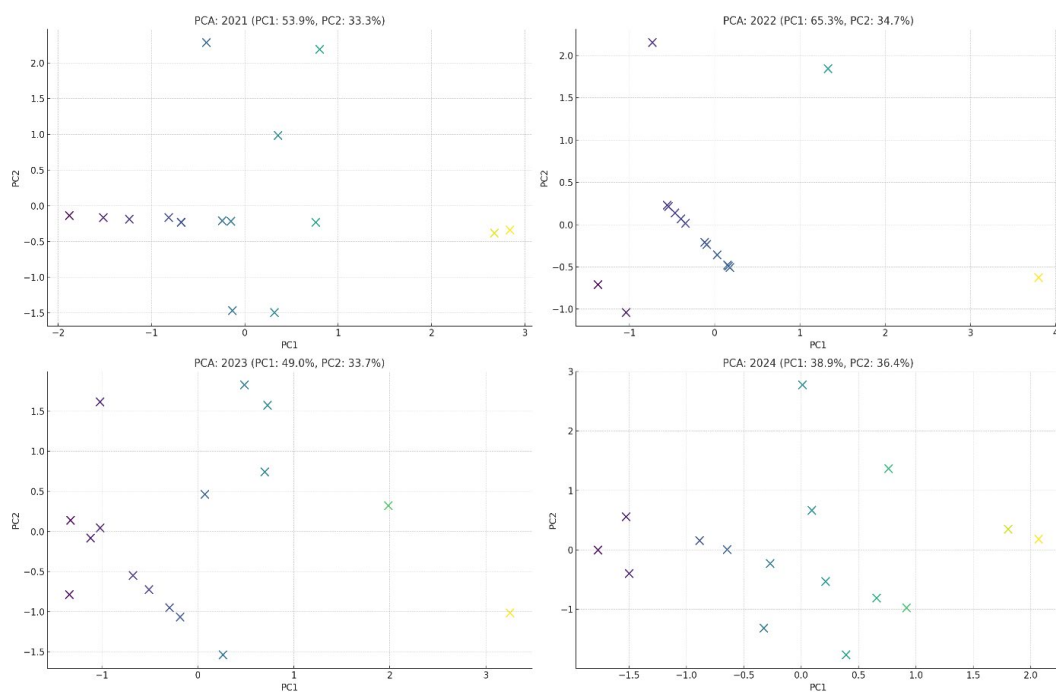


Рис. 3. Результаты анализа главных компонент (PCA) по урожайности, устойчивости к бурой ржавчине и наличию генов устойчивости у сортов яровой пшеницы в 2021–2024 гг.

Источник: выполнил Б.Б. Наджодов с помощью программы Python 3.13.

В 2024 г. после посева 29 апреля наблюдалось резкое понижение температуры, всходы появились только 14 мая. В период от всходов до колошения наблюдалась сильная засуха на фоне высоких температур (см. рис. 1). Это не позволило растениям пшеницы сформировать развитые побеги, аналогично 2023 г. Дальнейшая вегетация проходила при избытке осадков и повышенной температуре, что благоприятствовало развитию бурой ржавчины (см. табл. 2). Из всего набора сортов только Тулайковская 108 и Гранни показали высокую устойчивость (7 баллов), Ирень — среднюю (5 баллов), возможно, вследствие своей раннеспелости. Остальные сорта продемонстрировали различную степень восприимчивости (1–3 балла). Таким образом, в 2024 г. на засуху наложилась эпифитотия бурой ржавчины, что привело к низкой урожайности зерна (см. рис. 2). Отдельные сорта оказались толерантны к болезни и сформировали урожайность несколько выше, чем в 2023 г.: Злата, Тулайковская 108, Симбирцит, Тюменская 29, Алтайская Жница, Обская 2. Анализ главных компонент (PCA), выполненный на основе данных по урожайности, устойчивости к бурой ржавчине и наличию генов устойчивости, позволил дифференцировать сорта яровой пшеницы по их реакции на совокупность биотических и абиотических факторов в условиях Центрального Нечерноземья. Полученные

РСА-графики по годам (2021–2024) продемонстрировали, что в благоприятные годы (например, в 2022) сорта с высокой устойчивостью формировали отдельные группы с повышенной урожайностью. Напротив, в годы с выраженным абиотическим стрессом (например, засуха в 2024 г.), решающим фактором снижения урожайности было ограниченное развитие вегетативной массы, независимо от степени устойчивости к ржавчине. Таким образом, результаты РСА подтверждают, что комплексная адаптивность сортов зависит не только от наличия устойчивости к патогенам, но и от способности противостоять неблагоприятным погодным условиям, особенно в засушливые периоды.

Возвращаясь к генам устойчивости к бурой ржавчине у изученного набора сортов пшеницы мягкой яровой, можно сказать, что в годы с невысоким естественным инфекционным фоном в ЦРНЗ они вполне эффективно защищают растения от болезни. Но в годы, благоприятные для развития эпифитотий, их защиты недостаточно. По нашим данным, наиболее высокую защиту в эпифитотийный год дают гены *Lr19 + Lr6* (сорт Тулайковская 108) и *Lr 21* (сорт Гранни).

Заключение

В годы с благоприятными метеорологическими условиями в период от всходов до колошения в Центральном районе Нечерноземной зоны устойчивость сортов пшеницы мягкой яровой к бурой ржавчине положительно влияет на урожайность зерна. При засухе в этот период основным фактором снижения урожайности является плохое развитие растений. В годы с невысокой инфекционной нагрузкой гены устойчивости *Lr*, имеющиеся у изученного набора сортов, относительно эффективно защищают их. В годы эпифитотий защиты этих генов недостаточно. Поэтому следует искать более эффективные гены или их комплексы при создании новых сортов в ЦРНЗ. Наиболее эффективными за 2021–2024 гг. оказались гены *Lr19 + Lr6* (донор сорт Тулайковская 108) и *Lr 21* (донор сорт Гранни).

Список литературы

1. Chai Y, Senay S, Horvath D, Pardey P. Multi-peril pathogen risks to global wheat production: A probabilistic loss and investment assessment. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:1034600. doi: 10.3389/fpls.2022.1034600 EDN: LSNITO
2. Cheng F, Wu J, Cai X, Liang J, Freeling M, Wang X. Gene retention, fractionation and subgenome differences in polyploid plants. *Nature Plants*. 2018;4:258–268. doi: 10.1038/s41477-018-0136-7
3. Liang YM, Liu HJ, Yan JB, Tian F. Natural variation in crops: Realized understanding, continuing promise. *Annual Review of Plant Biology*. 2021;72:357–385. doi: 10.1146/annurev-arplant-080720-090632 EDN: ELZUFR
4. Huerta-Espino J, Singh RP, German S, McCallum BD, Park RF, Chen WQ, et al. Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Euphytica*. 2011;179:143–160. doi: 10.1007/s10681-011-0361-x EDN: OKOVB
5. Prasad P, Savadi S, Bhardwaj SC, Gupta PK. The progress of leaf rust research in wheat. *Fungal Biology*. 2020;124(6):537–550. doi: 10.1016/j.funbio.2020.02.013 EDN: YJYXSQ
6. Li H, Hua L, Zhao S, Hao M, Song R, Pang S, et al. Cloning of the wheat leaf rust resistance gene *Lr47* introgressed from *Aegilops speltoides*. *Nature Communications*. 2023;14:6072. doi: 10.1038/s41467-023-41833-2 EDN: FDNXXI

7. Репникова Е.Г., Зеленева Ю.В., Судникова В.П. Головневые болезни пшеницы на территории Центрально-Черноземного заповедника, выявление источников и доноров устойчивости // Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. 2020. Т. 29. С. 214–221. doi: 10.30679/2587-9847-2020-29-214-22 EDN: XNREHN
8. Крупин П.Ю., Груздев И.В., Дивашук М.Г., Баженов М.С., Кочешкова А.А., Черноок А.Г., Дудников М.В., Карлов Г.И., Соловьев А.А. Анализ коллекции яровой тритикале по генам устойчивости к листовой ржавчине с помощью ПЦР-маркеров // Генетика. 2019. Т. 55. № 8. С. 893–903. doi: 10.1134/S0016675819080083 EDN: WCJGGM
9. Peturson B. Wheat rust epidemics in Western Canada in 1953, 1954, and 1955. *Canadian Journal of Plant Science*. 1985;38:16–28. EDN: WCJGGM
10. Samborski DJ. Wheat leaf rust. In: Roelfs AP, Bushnell WR. (eds.) *The Cereal Rusts*. New York: Academic Press; 1985. p.39–59.
11. McCallum BD, DePauw RM. A review of wheat cultivars grown in the Canadian prairies. *Canadian Journal of Plant Science*. 2008;88(4):649–677. doi: 10.4141/CJPS07159
12. Зеленева Ю.В., Гулятьева Е.И., Плахотник В.В. Идентификация Lr-генов у образцов мягкой пшеницы, устойчивых к возбудителю бурой ржавчины в условиях ЦЧР, с использованием ДНК-маркеров // Вестник защиты растений. 2013. № 3. С. 34–39. EDN: RBZVYL
13. Рубец В.С., Лаппо А.А., Пыльнев В.В., Ворончихина И.Н., Ворончихин В.В. Селекция мягкой пшеницы на устойчивость к бурой ржавчине в Российской Федерации // Кормопроизводство. 2023. № 7. С. 32–43. doi: 10.25685/krm.2023.7.2023.006 EDN: NSUJLH
14. McIntosh RA, Hart GE, Gale MD. Catalogue of gene symbols for wheat. In: Li ZS, Xin ZY. (eds.) *Proceedings of the 8th International Wheat Genetics Symposium*. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press; 1993. p.1333–1500.
15. Xu XY, Kolmer J, Li G, Tan C, Carver BF, Bian R, et al. Identification and characterization of the novel leaf rust resistance gene *Lr81* in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2022;135:2725–2734. doi: 10.1007/s00122-022-04145-5 EDN: SQYXAO
16. Bariana HS, Babu P, Forrest KL, Park RF, Bansal UK. Discovery of the new leaf rust resistance gene *Lr82* in wheat: Molecular mapping and marker development. *Genes*. 2022;13(6):964. doi: 10.3390/genes13060964 EDN: PKZPQY
17. Kumar K, Jan I, Saripalli G, Sharma PK, Mir RR, Balyan HS, et al. An update on resistance genes and their use in the development of leaf rust resistant cultivars in wheat. *Frontiers in Genetics*. 2022;13:816057. doi: 10.3389/fgene.2022.816057 EDN: VWWYZA
18. Kou H, Zhang Z, Yang Y, Wei C, Xu L, Zhang G. Advances in the mining of disease resistance genes from *Aegilops tauschii* and the utilization in wheat. *Plants*. 2023;12(4):880. doi: 10.3390/plants12040880 EDN: EHJEDG
19. Lin G, Chen H, Tian B, Sehgal SK, Singh L, Xie J, et al. Cloning of the broadly effective wheat leaf rust resistance gene *Lr42* transferred from *Aegilops tauschii*. *Nature Communications*. 2022;13:3044. doi: 10.1038/s41467-022-30784-9 EDN: XXYONA
20. Krattinger SG, Lagudah ES, Spielmeier W, Singh RP, Huerta-Espino J, McFadden H, et al. A putative ABC transporter confers durable resistance to multiple fungal pathogens in wheat. *Science*. 2009;323(5919):1360–1363. doi: 10.1126/science.11664
21. Moore JW, Herrera-Foessel S, Lan C, Schnippenkoetter W, Ayliffe M, Huerta-Espino J, et al. A recently evolved hexose transporter variant confers resistance to multiple pathogens in wheat. *Nature Genetics*. 2015;47:1494–1498. doi: 10.1038/ng.3439
22. Гулятьева Е.И., Алпатьева Н.В. Устойчивость к возбудителю бурой ржавчины сортов пшеницы, испытываемых на Госсортоучастках Северо-Запада РФ // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2011. Т. 168. С. 95–106. EDN: UBNLRH
23. Сочалова Л.П., Пискарев В.В. Устойчивость образцов мягкой пшеницы к *Blumeria graminis* и *Puccinia recondita* с известными генами устойчивости // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 11. С. 34–42. doi: 10.24411/0235-2451-2019-11108 EDN: FQYWQD
24. Долматович Т.В., Булойчик А.А., Гриб С.И. Идентификация генов устойчивости к бурой, стеблевой и желтой ржавчине в сортах яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2017. Т. 61. № 5. С. 97–102. EDN: ZSUHLX
25. Сочалова Л.П., Бойко Н.И., Потешкина А.А., Пискарев В.В. Эффективные в Новосибирской области гены устойчивости пшеницы к бурой ржавчине в связи с изменчивостью популяции *Puccinia*

triticina // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. Т. 184. № 2. С. 235–244. doi: 10.30901/2227-8834-2023-2-235-244 EDN: WVGXSY

26. Гулытьева Е.И. Разнообразие российских сортов мягкой пшеницы по генам устойчивости к бурой ржавчине // Современные проблемы иммунитета растений к вредным организмам : тезисы докладов IV Междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 11–13 октября 2016. СПб., 2016. С. 24. EDN: WNYGYF

27. Сюков В.В., Зубов Д.Е. Генетическая коллекция мягкой пшеницы по устойчивости к бурой ржавчине: методические рекомендации. Самара : СамНЦ РАН, 2008. 24 с. EDN: XDVRQT

28. Крупнов В.А., Сибикеев С.Н., Крупнова О.В., Воронина С.А., Дружин А.Е. Эффекты взаимодействия транслокаций от пырея удлиненного и пырея промежуточного в генофонде мягкой пшеницы // Аграрный вестник Юго-Востока. 2010. № 1(4). С. 11–14. EDN: WMVNDN

29. Сюков В.В., Тырышкин Л.Г., Захаров В.Г. Доноры полевой устойчивости яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) к листовой бурой ржавчине (*Puccinia recondita* Rob ex Desm) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 5–3. С. 1166–1172. EDN: TPIEIZ

30. Mebrate SA, Dehne HW, Pillen K, Oerke EC. Postulation of seedling leaf rust resistance genes in selected Ethiopian and German bread wheat cultivars. *Crop Science*. 2008;48(2):507–516. doi: 10.2135/cropsci2007.03.0173 EDN: MMWNSH

31. Bundessortenamt. (ed.) *Beschreibende Sortenliste: Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen, Hackfrüchte*. Hannover: Bundessortenamt; 1995.

32. Bundessortenamt. (ed.) *Beschreibende Sortenliste 1997*. Hannover: Landbuch-Verlag; 1997. p.72–73.

33. Stepien L, Chelkowski J, Wenzel G, Mohler V. Combined use of linked markers for genotyping the *Pm1* locus in common wheat. *Cellular and Molecular Biology Letters*. 2004;9:819–827. EDN: MGMURH

34. Kolomiets TM, Kovalenko ED, Zhemchuzhina AI, Pankratova LF, Lapochkina IF. Postulated resistance genes in cultivars and lines with alien genes to leaf rust of wheat. In: *The International Cereal Rusts and Powdery Mildews Conference*; Norwich: John Innes Centre; 2004. p.32.

35. Mohler V, Hsam SLK, Zeller FJ, Wenzel G. An STS marker distinguishing the rye-derived powdery mildew resistance alleles at the *Pm8/Pm17* locus of common wheat. *Plant Breeding*. 2001;120(5):448–450. doi: 10.1046/j.1439-0523.2001.00622.x EDN: BASERJ

36. Neu C, Stein N, Keller B. Genetic mapping of the *Lr20–Pm1* resistance locus reveals suppressed recombination on chromosome arm 7AL in hexaploid wheat. *Genome*. 2002;45(4):737–744. doi: 10.1139/g02-040

Об авторах:

Наджодов Бобурджон Баходурович — аспирант кафедры генетики, селекции и семеноводства, Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Российская Федерация, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; лаборант-исследователь лаборатории прикладной геномики и частной селекции сельскохозяйственных растений, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Российская Федерация, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42; e-mail: boburnajodov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1932-9522 SPIN-код: 9735-3156

Рубец Валентина Сергеевна — доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории спидбридинга в селекции сельскохозяйственных культур, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Российская Федерация, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42; ведущий научный сотрудник, Отдел отдаленной гибридизации, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Российская Федерация, 127276, г. Москва, ул. Ботаническая, д. 4; e-mail: Valentina.rubets50@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1870-7242 SPIN-код: 8963-2357

Дивашук Михаил Георгиевич — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией прикладной геномики и частной селекции сельскохозяйственных растений, Курчатowski геномный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Российская Федерация, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 42; доцент кафедры генетики, селекции и семеноводства, Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; e-mail: divashuk@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6221-3659 SPIN-код: 8314-5270