

 pismavavilov.ru

DOI 10.18699/letvjgb-2024-10-17

Оригинальное исследование

Идентификация *Sr* генов возрастной устойчивости в отечественных сортах мягкой пшеницы методом молекулярно-генетического маркирования

Е.С. Сколотнева ^{1,2}✉, Ю.В. Лаприна¹, М.И. Киселева², В.Н. Кельбин ¹, Т.М. Коломиец²

Аннотация: Генетические основы устойчивости мягкой пшеницы Нечерноземной зоны к возбудителю стеблевой ржавчины пшеницы, *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, обусловлены генами, экспрессирующими возрастную тип устойчивости, ценность которых состоит в долгосрочной защите от популяции патогена, представленной различными по вирулентности клонами гриба. В пяти сортах яровой и трех сортах озимой пшеницы, включенных в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, по Центральному региону РФ, с помощью метода ПЦР-анализа определены гены возрастной устойчивости к *P. graminis* f. sp. *tritici*: *Sr2*, *Sr15*, *Sr22*, *Sr23* и *Sr57*. В генотипах трех сортов озимой мягкой пшеницы обнаружен ген возрастной устойчивости *Sr23*, сцепленный с геном устойчивости к бурой ржавчине *Lr16*, который встречается в селекционном материале мягкой яровой пшеницы Западной Сибири, обеспечивая эффективную защиту от ржавчинных болезней. В образцах яровой пшеницы найдены по одному-два генам устойчивости: *Sr2*, *Sr15*, *Sr22*, *Sr57*. Фитопатологическая оценка материала в полевых условиях в сравнении со стандартами восприимчивости и устойчивости подтверждает, что сорта озимой мягкой пшеницы Московская 40, Немчиновская 24, Немчиновская 85, Сударыня, Злата, Каменка, Любава и яровой мягкой пшеницы Экада обладают качествами, способствующими получению более высокого урожая.

Ключевые слова: мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.); гены устойчивости; молекулярные маркеры; стеблевая ржавчина.

Для цитирования: Сколотнева Е.С., Лаприна Ю.В., Киселева М.И., Кельбин В.Н., Коломиец Т.М. Идентификация *Sr* генов возрастной устойчивости в отечественных сортах мягкой пшеницы методом молекулярно-генетического маркирования. *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2024;10(3):151-157. DOI 10.18699/letvjgb-2024-10-17

Финансирование: Фитопатологический анализ образцов выполнен при поддержке бюджетного проекта FGGU-2022-0008, молекулярно-генетические исследования образцов проведены при поддержке бюджетного проекта FWNR-2022-0007.

Original article

Identification of adult resistance *Sr* genes in domestic common wheat varieties using molecular markers

Е.С. Skolotneva ^{1,2}✉, Yu.V. Laprina¹, M.I. Kiseleva², V.N. Kelbin ¹, T.M. Kolomiets²


Abstract: The resistance of the varieties of the Non-Chernozem zone against stem rust, *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, is due to the adult resistance genes, which provide the long-term protection from the pathogen population represented by different virulence clones of the fungus. Using the PCR analysis method, in five varieties of spring and three varieties of winter wheat, released in the Central region of Russia, the adult plant resistant genes to *P. graminis* f. sp. *tritici* were determined *Sr2*, *Sr15*, *Sr22*, *Sr23* and *Sr57*. In the genotypes of three winter wheat varieties, the adult stem rust resistant gene *Sr23* was found, linked to brown rust resistance gene *Lr16*, which is also found in the germplasm of soft spring wheat in Western Siberia. One or two resistance genes were found in spring wheat samples: *Sr2*, *Sr15*, *Sr22*, *Sr57*. In this regard, the varieties Moskovskaya 40, Nemchinovskaya 24, Nemchinovskaya 85, Sudarinya, Zlata, Kamenka, Lyubava and Ekada in comparison with the susceptible and resistance standards, have qualities that contribute to obtaining a higher yield.

Key words: bread wheat (*Triticum aestivum* L.); resistance genes; molecular markers; stem rust.

¹ Федеральное исследовательское учреждение Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия
Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, р.п. Большие Вяземы, Одинцовский район, Московская область, Россия
All-Russian Scientific Research Institute of a Phytopathology, Bolshie Vyazemy, Odintsovo district, Moscow region, Russia

 sk-ska@yandex.ru

 Сколотнева Е.С., Лаприна Ю.В., Киселева М.И., Кельбин В.Н., Коломиец Т.М., 2024

For citation: Skolotneva E.S., Laprina Yu.V., Kiseleva M.I., Kelbin V.N., Kolomiets T.M. Identification of adult resistance *Sr* genes in domestic common wheat varieties using molecular markers. *Pisma v Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Letters to Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;10(3):151-157. DOI 10.18699/letvjgb-2024-10-17 (in Russian)

Funding: Phytopathological analysis of samples was carried out with the support of budget project FGGU-2022-0008, molecular genetic studies of samples were carried out with the support of budget project FWNR-2022-0007.

Введение

Стеблевую ржавчину пшеницы, вызываемую облигатным грибом *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, относят к болезням, причиняющим значительный экономический ущерб не только в России, но и во многих районах возделывания культуры в мире (Санин и др., 2010; Dean et al., 2012; Рсалиев А.С., Рсалиев Ш.С., 2018). Часто на посевах сортов пшеницы, восприимчивых к патогену, возникают эпифитотии гриба, приводящие к тотальному уничтожению растений. Широко известный пример – появление в 1998 г. в Уганде (Восточная Африка) расы стеблевой ржавчины Ug99 и ее модификаций Ug99+*Sr24*, Ug99+*Sr36* оказалось катастрофичным для стран Северной Африки и Центральной Азии (Singh et al., 2011). В регионах возделывания мягкой пшеницы в Российской Федерации стеблевую ржавчину отмечают регулярно, как правило, в конце вегетации. Естественным барьером распространения патогена в центральных и северо-восточных районах России считают климат, не соответствующий экологическим «предпочтениям» гриба (Шаманин и др., 2015). В этих условиях к факторам, негативно влияющим на интенсивность развития гриба, относят сочетание температур и влажности в период от колошения до созревания хлебов, а также холодные продолжительные зимы с частыми оттепелями. Однако нельзя исключать массового появления стеблевой ржавчины при благоприятных условиях погоды и миграции спор воздушными потоками (Синяк, Волкова, 2015). В последние годы практически повсеместно наблюдают тенденцию к более интенсивному проявлению этой болезни, что, в свою очередь, вызывает повышенное внимание к исследованиям, направленным на разработку иммунологической устойчивости пшеницы (Kokhmetova et al., 2011; Shamanin et al., 2016).

Основные методы борьбы с *P. graminis* f. sp. *tritici* включают использование химических средств защиты и возделывание устойчивых сортов. Причем последний способ считают менее дорогостоящим и экологически значимым для сельского хозяйства в целом. Прерогатива селекционных исследований заключается в создании сортов пшеницы, генетическая основа устойчивости которых обуславливается сочетанием генов, обеспечивающих многоуровневый иммунитет растения, в том числе и против возбудителя стеблевой ржавчины пшеницы.

С появлением методов тонкого картирования генов устойчивости изучение генома пшеницы идет ускоренными темпами, список молекулярных маркеров к генам устойчивости очень быстро увеличивается (Сколотнева и др., 2017). К настоящему времени генотипирование коллекций мягкой пшеницы, подобно коллекции «Арсенал» (Федеральный исследовательский центр «Немчиновка») (Гайнуллин и др., 2007; Лапочкина и др., 2016) сортов, вовлеченных в челноч-

ную селекцию (Shamanin et al., 2016), и видов-сородичей пшеницы (Баранова и др., 2015), привело к накоплению информации о донорах генов устойчивости к патогену. Однако анализ отечественных и зарубежных исследований генетической основы устойчивости селекционного материала показывает, что они фокусируются главным образом на поиске специфических генов устойчивости или мажорных, отвечающих за лиганд-рецепторное узнавание патогена (Сколотнева, Салина, 2019; Кельбин и др., 2020). Их проще идентифицировать в поле и на лабораторном столе, а также популярность их объясняется видимым эффектом при введении в селекционный материал. Однако после включения в Госреестр РФ и интенсивного внедрения в производство сорта с главными генами подвергаются риску быстрой потери устойчивости из-за появления новых вирулентных рас патогена. В отношении возбудителей ржавчинных заболеваний коммерческие сорта мягкой пшеницы оказываются восприимчивыми к инфекции уже через 7–10 лет (Коваль и др., 2010).

Введение в генотип дополнительных генов, отвечающих за возрастную устойчивость, повышает гарантии длительного иммунитета у нового сорта или селекционной линии. Механизм действия таких генов до конца не изучен, но большинство из них отвечает за количественную составляющую устойчивости к патогену (Krattinger et al., 2009).

Цель настоящего исследования – выявление с помощью метода молекулярно-генетического маркирования *Sr* генов возрастной устойчивости в сортах озимой и яровой мягкой пшеницы, районированных в Нечерноземной зоне Российской Федерации.

Материалы и методы

Для идентификации генов возрастной устойчивости к возбудителю стеблевой ржавчины методом молекулярного маркирования по результатам фитопатологической оценки типа устойчивости было отобрано 13 отечественных сортов мягкой пшеницы, включенных в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, по Центральному региону РФ: озимые (оригинатор ФИЦ «Немчиновка») – Московская 39, Московская 40, Московская 56, Немчиновская 17, Немчиновская 24, Немчиновская 57, Немчиновская 85; яровые – Агата, Экада (ФИЦ «Немчиновка»), Злата, Любава (ФИЦ «Немчиновка» и Верхневолжский федеральный аграрный научный центр), Сударыня и Каменка (Верхневолжский ФАНЦ). В качестве контроля использованы сорта пшеницы Чебаркульская 3 (озимая) и Хакасская (яровая).

Фитопатологическую оценку сортов осуществляли в полевом питомнике Всероссийского научно-исследовательского института фитопатологии (ФГБНУ ВНИИФ, Московская

область) на фоне естественной популяции патогена в 2015 (озимые), 2017 и 2021 гг. (яровые). Для этого на посевах сортов озимой и яровой пшеницы, начиная с появления первых признаков болезни, проводили оценку интенсивности поражения растений по шкале Кобба в динамике каждую неделю, вплоть до созревания пшеницы (Peterson et al., 1948). При каждом учете интенсивность поражения стеблевой ржавчиной оценивали не менее чем на 20–50 растениях каждого сорта.

Тип реакции растений определяли по шкале, рекомендованной Международным центром улучшения пшеницы и кукурузы (CYMMIT) (Койшыбаев и др., 2014), где 0R – иммунный тип; TR – почти иммунный тип: пустулы не развиваются, но заметны пятна, связанные с реакцией сверхчувствительности (0); R – устойчивый тип: мелкие пустулы, окруженные некротической зоной (1 балл, поражение до 5 %); MR – умеренно устойчивый тип: пустулы небольших размеров, окруженные хлорозом или некротической каймой (2 балла, поражение до 25 %); MS – умеренно восприимчивый тип: пустулы средней величины, некроз отсутствует, но могут развиваться зоны хлороза (3 балла, поражение до 40 %); S – восприимчивый тип: пустулы крупные, часто сливающиеся (4 балла, поражение более 60 %).

Период от появления первых признаков болезни до ее максимального развития на растениях пшеницы растягивался примерно на 1.5–2 недели, что соответствовало 3–4 полевым оценкам динамики развития *P. graminis* f. sp. *tritici* на сортах пшеницы.

Исследования по выявлению генов устойчивости к *P. graminis* f. sp. *tritici* в отобранных генотипах проводили на базе лаборатории молекулярной фитопатологии Федерального исследовательского центра Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск). Выделение ДНК из образцов осуществляли с использованием метода экстракции СТАВ, модифицированного для растительного материала (Michiels et al., 2003). Поиск в сортах озимой и яровой пшеницы генов возрастной устойчивости к стеблевой ржавчине выполнен методом ПЦР-анализа со специфическими праймерами к маркерам генов *Sr2* (*Xgwm533*), *Sr15* (*Xsts638*), *Sr22* (*CFA2019*), *Sr23* (*RGA-266585*) и *Sr57* (*csLV34*) по протоколам, приведенным на сайте MASWHEAT (<https://maswheat.ucdavis.edu/protocols>).

В качестве положительных контролей использовали сорта и линии мягкой пшеницы, любезно предоставленные к. б. н. А.И. Моргуновым (CIMMYT, The International Maize and Wheat Improvement Center), несущие гены *Sr2* (Arthur), *Sr15* (W2692/NORKA-SR15), *Sr22* (SWSR22T.B), *Sr23* (EXCHANGE-SR23), *Sr57* (NIL-THATCHER-LR34-PI58548). Реактивы для постановки ПЦР (смесь БиоМастер *HS-Taq* ПЦР-Color, буфер для проведения реакции, Hot Start *Taq* ДНК полимеразы), а также маркер молекулярных масс (ДНК-маркер Step50 plus) были поставлены фирмой «Биолабмикс» (<https://biolabmix.ru/catalog/pcr/>). Для исключения присутствия в генотипе генов специфической устойчивости к анализу были привлечены также известные молекулярные маркеры к генам *Sr25*, *Sr26*, *Sr31*, *Sr35*, *Sr38*, *Sr39*, *Sr44*, *Sr45* (<https://maswheat.ucdavis.edu/protocols>).

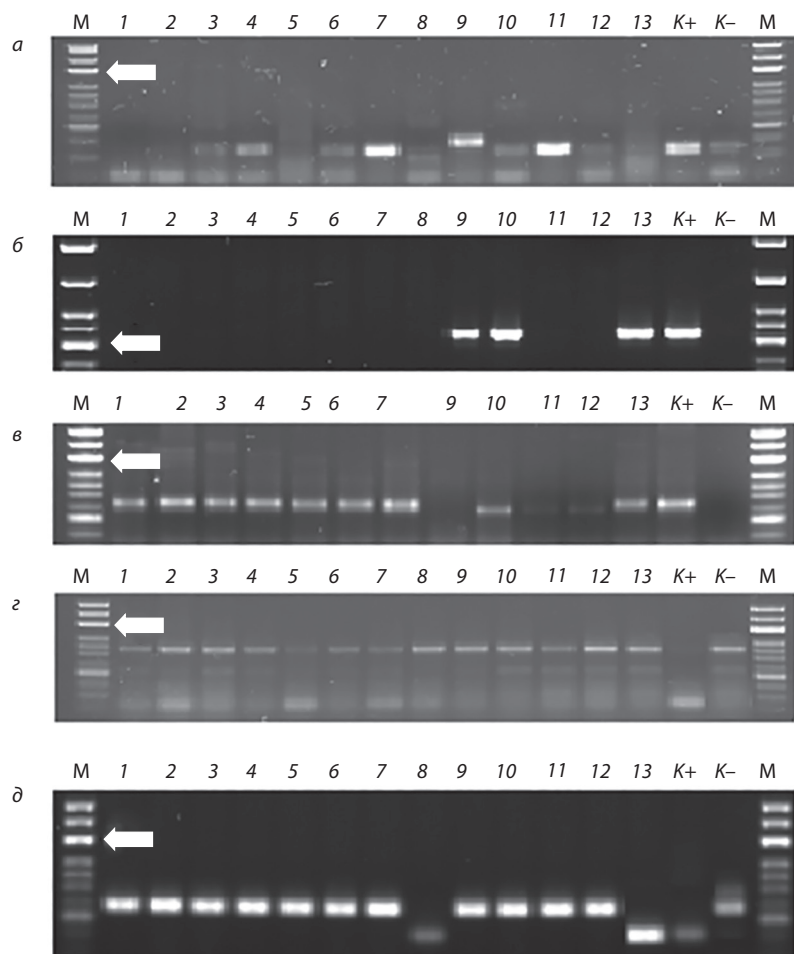
Результаты

В годы испытаний в инфекционном питомнике ФГБНУ ВНИИФ (Московская область) признаки поражения *P. graminis* f. sp. *tritici* появлялись на сортах озимой и яровой пшеницы отечественной селекции в фазу молочной спелости. Условия погоды, сложившиеся в 2015, 2017 и 2021 гг., были благоприятными для развития возбудителя стеблевой ржавчины на посевах пшеницы. Независимо от года исследования, конечный уровень поражения восприимчивого контроля озимой пшеницы сорта Чебаркульская 3 составил 80 %, яровой пшеницы сорта Хакасская – 100 % при восприимчивом типе реакции (S). Для дальнейшего исследования образцов с помощью молекулярных маркеров к генам возрастной устойчивости были отобраны сорта, на которых формировались пустулы гриба с устойчивым (R, MR) или слабовосприимчивым (MS) типами реакции, а интенсивность поражения озимых менялась от 5 до 40 %, яровых – от 25 до 40 % (см. таблицу).

Согласно данным, полученным методом молекулярно-генетического маркирования, у восьми сортов мягкой яровой и озимой пшеницы, районированных в Московской области, отмечено наличие генов возрастной устойчивости, контролирующей развитие *P. graminis* f. sp. *tritici*: Московская 40, Немчиновская 24, Немчиновская 85, Сударыня, Злата, Каменка, Любава и Экада. Среди указанных сортов не обнаружено носителей генов специфической устойчивости *Sr25*, *Sr26*, *Sr31*, *Sr35*, *Sr38*, *Sr39*, *Sr44*, *Sr45*.

На рисунке приведены результаты электрофоретического разделения продуктов амплификации при использовании специфических праймеров к генам *Sr2*, *Sr15*, *Sr22*, *Sr23* и *Sr57*. Размер диагностического фрагмента при ПЦР-идентификации маркера *Xgwm533* к гену *Sr2* соответствует 120 п. н. Маркер обнаружен на матрицах сортов Немчиновская 85 и Сударыня. Маркер *Xsts638* к гену *Sr15* получен на матрицах сортов Злата, Каменка и Экада, его диагностический фрагмент имеет размер 542 п. н. Для поиска гена *Sr22* использована пара микросателлитных праймеров, CFA2019 F и CFA2019 R. Маркер размером 238 п. н. был получен на ДНК-матрицах сорта Злата. Маркер *RGA-266585* к гену *Sr23*, имеющий короткий диагностический фрагмент размером 57 п. н., обнаружен на ДНК-матрицах образцов Московская 40, Немчиновская 24, Немчиновская 85. При ПЦР-идентификации кодоминантного маркера *csLV34* к гену *Sr57* амплифицируются два фрагмента, 150 и 229 п. н. Присутствие в генотипе первого более короткого резистентного аллеля свидетельствует о том, что образец обладает соответствующим типом возрастной устойчивости. Среди протестированного материала аллель маркера *csLV34* к гену *Sr57*, экспрессирующий резистентность, обнаружен у сортов Любава и Экада.

Высокую устойчивость к стеблевой ржавчине (5–10 % R, MR) проявили четыре сорта озимой пшеницы, в двух из которых были обнаружены диагностические фрагменты молекулярных маркеров на гены *Sr23* (Немчиновская 24) и *Sr2*, *Sr23* (Немчиновская 85). Слабым уровнем поражения и устойчивым типом реакции к *P. graminis* f. sp. *tritici* характеризовались сорта яровой пшеницы Злата (*Sr15*, *Sr22*), Экада (*Sr15*, *Sr57*) и сорт озимой пшеницы Московская 40 (*Sr23*).



Идентификация генов возрастной устойчивости *Sr2*, *Sr15*, *Sr22*, *Sr23* и *Sr57* в образцах 13 отечественных сортов мягкой пшеницы, районированных в Нечерноземной зоне Российской Федерации, с помощью молекулярных маркеров.

a – амплификация маркера *Xgwm533* к гену *Sr2*; *b* – амплификация маркера *Xsts638* к гену *Sr15*; *c* – амплификация маркера *CFA2019* к гену *Sr22*; *d* – амплификация маркера *RG-266585* к гену *Sr23*; *e* – амплификация маркера *cslV34* к гену *Sr57*. М – ДНК-маркер Step50 plus; стрелка указывает на маркерный фрагмент размером 500 п. н. 1 – Московская 39; 2 – Московская 40; 3 – Московская 56; 4 – Немчиновская 7; 5 – Немчиновская 24; 6 – Немчиновская 57; 7 – Немчиновская 85; 8 – Любава; 9 – Злата; 10 – Каменка; 11 – Сударыня; 12 – Агата; 13 – Экада

Identification of adult resistance genes *Sr2*, *Sr15*, *Sr22*, *Sr23*, and *Sr57* in samples of 13 domestic varieties of bread wheat, released in the Non-Chernozem zone of the Russian Federation, using molecular markers.

a – amplification of the *Xgwm533* marker to the *Sr2* gene; *b* – amplification of the *Xsts638* marker to the *Sr15* gene; *c* – amplification of the *CFA2019* marker to the *Sr22* gene; *d* – amplification of the *RG-266585* marker to the *Sr23* gene; *e* – amplification of the *cslV34* marker to the *Sr57* gene. M – DNA marker Step50 plus; the arrow indicates the marker fragment of 500 bp. 1 – Moskovskaya 39; 2 – Moskovskaya 40; 3 – Moskovskaya 56; 4 – Nemchinovskaya 7; 5 – Nemchinovskaya 24; 6 – Nemchinovskaya 57; 7 – Nemchinovskaya 85; 8 – Lyubava; 9 – Zlata; 10 – Kamenka; 11 – Sudarynya; 12 – Agatha; 13 – Ekada

Несмотря на то что интенсивность поражения двух сортов озимой пшеницы и четырех сортов яровой была несколько выше (40 %), на них образовывались пустулы устойчивого и умеренно восприимчивого типов. Из них в четырех сортах яровой пшеницы методом молекулярного анализа были определены гены: Любава, Экада – *Sr57*, Каменка, Экада – *Sr15*, Сударыня – *Sr2*.

Образцы, в генотипе которых выявлено большее количество генов возрастной устойчивости, при полевых испытаниях оказались менее пораженными стеблевой ржавчиной. Так, сочетание двух генов, *Sr15* и *Sr57*, обнаруженное в гено-

типе сорта Экада, лучше сдерживало развитие болезни по сравнению с образцом сорта Любава с одним идентифицированным геном, *Sr57* (до 25MR против 40MR). Комбинация генов *Sr15* и *Sr22* у сорта Злата оказалась эффективнее единичного гена возрастной устойчивости *Sr15* у сорта Каменка (до 25MR против 40MR). Таким образом, с большой долей вероятности можно утверждать, что данные, полученные методом ПЦР-анализа генов устойчивости к возбудителю стеблевой ржавчины пшеницы, подтверждаются результатами фитопатологической оценки сортов пшеницы.

Результаты полевой оценки развития стеблевой ржавчины на районированных сортах мягкой пшеницы в условиях инфекционного питомника ФГБНУ ВНИИФ (Московская область) в 2015, 2017, 2021 гг. и идентификации генов *Sr* методом молекулярно-генетического маркирования

The field scoring for the stem rust disease of releasing bread wheat varieties in the infectious nursery of the Federal State Budgetary Institution VNIIF (Moscow region) in 2015, 2017, 2021 and identification of *Sr* genes using the molecular genetic markers

Сорт пшеницы	Тип реакции	Интенсивность поражения, %	Ген <i>Sr</i>
Озимые сорта пшеницы (максимальные показатели полевых испытаний 2015, 2017 гг.)			
Чебаркульская 3	S	80	–
Московская 39	MR, MS	40	–
Московская 40	R, MR	25	<i>Sr23</i>
Московская 56	MR, MS	40	–
Немчиновская 17	TR, R	10	–
Немчиновская 24	TR, R	10	<i>Sr23</i>
Немчиновская 57	TR, R	5	–
Немчиновская 85	OR	15	<i>Sr2, Sr23</i>
Яровые сорта пшеницы (максимальные показатели полевых испытаний 2017, 2021 гг.)			
Хакасская	S	100	–
Агата	MR, MS	40	–
Экада	R, MR	25	<i>Sr15, Sr57</i>
Любава	MR	40	<i>Sr57</i>
Злата	R, MR	25	<i>Sr15, Sr22</i>
Каменка	MR	40	<i>Sr15</i>
Сударыня	MR	40	<i>Sr2</i>

Обсуждение

Диагностика методом молекулярного маркирования генов *Sr* в 13 сортах яровой и озимой пшеницы, районированных в Нечерноземной зоне России, включая Московскую область, выявила в 10 из них наличие 5 генов, отвечающих за возрастную устойчивость: *Sr2* (Немчиновская 85 и Сударыня), *Sr15* (Злата, Каменка и Экада), *Sr22* (Злата), *Sr23* (Московская 40, Немчиновская 24, Немчиновская 85), *Sr57* (Любава). При этом в сортах озимой пшеницы встречался ген *Sr23*, а в сортах яровой – *Sr15*. По данным зарубежных исследователей, ген *Sr23* возрастной устойчивости к стеблевой ржавчине сцеплен с геном *Lr16*, отвечающим за экспрессию как ювенильной, так и возрастной устойчивости к бурой ржавчине (McIntosh, Luig, 1973). Он также встречается в селекционном материале мягкой яровой пшеницы Западной Сибири, обеспечивая эффективную защиту против ржавчинных заболеваний (Kelbin et al., 2022).

Интерес представляют сорта Любава и Экада, в генотипе которых определен резистентный аллель маркера *csLV34* к гену *Sr57*. Этот плейотропный ген *Sr57* (*Lr34/Yr18/Pm38/Vdv1*) широко применяется в селекции на иммунитет при создании пирамиды генов. Он обеспечивает неспецифическую устойчивость к биотрофным патогенам, описанную на различных инфекционных фонах как возрастная устойчивость (McIntosh et al., 1993). Большинство сортов омской

и казахской селекции, обладающих длительной устойчивостью к *P. graminis* f. sp. *tritici*, являются носителями гена *Sr57* (Shamanin et al., 2016).

Ген *Sr2*, молекулярный маркер которого определен в сортах Немчиновская 85 и Сударыня, на сегодняшний день – один из наиболее популярных генов неспецифической устойчивости в селекции на иммунитет к стеблевой ржавчине. Комбинации с *Sr2* повсеместно, за исключением Канады, обладают эффективностью, обеспечивая устойчивость взрослых растений (Лапочкина и др., 2018; Кельбин и др., 2020).

У сортов Немчиновская 85 (*Sr23* и *Sr2*), Злата (*Sr15* и *Sr22*) и Экада (*Sr57* и *Sr15*) обнаружены сложные генотипы, состоящие из двух генов возрастной устойчивости. Данные сорта обладают генетическими основами длительной устойчивости. Они могут быть рекомендованы в качестве исходного материала при скрещивании с носителями специфических генов устойчивости, таких как *Sr24*, *Sr31*, *Sr25*, широко представленными в современных зерновых хозяйствах страны (Baranova et al., 2019).

Заключение

Отечественные сорта мягкой яровой и озимой пшеницы Московская 40, Немчиновская 24, Немчиновская 85, Сударыня, Злата, Каменка, Любава и Экада являются носителями генов

возрастной устойчивости, обеспечивающими урожайность в условиях Нечерноземной полосы России. Кроме того, их можно использовать в качестве источников устойчивости для создания новых пирамидированных генотипов, эффективных против местной популяции *P. graminis* f. sp. *tritici*.

Список литературы / References

- Баранова О.А., Лапочкина И.Ф., Анисимова А.В., Гайнуллин Н.Р., Иорданская И.В., Макарова И.Ю. Идентификация генов *Sr* у новых источников устойчивости мягкой пшеницы к расе стеблевой ржавчины Ug99 с использованием молекулярных маркеров. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2015;19(3):316-322. DOI 10.18699/VJ15.041
- [Baranova O.A., Lapochkina I.F., Anisimova A.V., Gajnullin N.R., Iordan'skaya I.V., Makarova I.Yu. Identification of *Sr* genes in new common wheat sources of resistance to stem rust race Ug99 using molecular markers. *Russ. J. Genet. Appl. Res.* 2016;6(3):344-350. DOI 10.1134/S2079059716030011]
- Гайнуллин Н.Р., Лапочкина И.Ф., Жемчужина А.И., Киселева М.И., Коломиец Т.М., Коваленко Е.Д. Использование фитопатологического и молекулярно-генетических методов для идентификации генов устойчивости к бурой ржавчине у образцов мягкой пшеницы с чужеродным генетическим материалом. *Генетика*. 2007;43(8):1058-1064
- [Gajnullin N.R., Lapochkina I.F., Zhemchuzhina A.I., Kiseleva M.I., Kolomiets T.M., Kovalenko E.D. Phytopathological and molecular genetic identification of leaf rust resistance genes in common wheat accessions with alien genetic material. *Russ. J. Genet.* 2007;43(8):875-881. DOI 10.1134/S1022795407080078]
- Кельбин В.Н., Сколотнева Е.С., Салина Е.А. Возможности и перспективы формирования генетической защиты мягкой пшеницы от стеблевой ржавчины в Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020;24(8):821-828. DOI 10.18699/VJ20.679
- [Kelbin V.N., Skolotneva E.S., Salina E.A. Challenges and prospects for developing genetic resistance in common wheat against stem rust in Western Siberia. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(8):821-828. DOI 10.18699/VJ20.679 (in Russian)]
- Коваль С.Ф., Шаманин В.П., Коваль В.С. Стратегия и тактика отбора в селекции растений. Омск, 2010
- [Koval S.F., Shamanin V.P., Koval V.S. Selection Strategy and Tactics in Plant Breeding. Omsk: Omsk State Agrarian University Publ., 2010 (in Russian)]
- Койшыбаев М., Шаманин В.П., Моргунов А.И. Скрининг пшеницы на устойчивость к основным болезням: Метод. указания. Анкара: ФАО-СЕК, 2014
- [Koysybaev M., Shamanin V.P., Morgunov A.I. Wheat Screening for Resistance to Major Diseases: Guidelines. Ankara: FAO-SEK Publ., 2014 (in Russian)]
- Лапочкина И.Ф., Баранова О.А., Шаманин В.П., Волкова Г.В., Гайнуллин Н.Р., Анисимова А.В., Галингер Д.Н., Лазарева Е.Н., Гладкова Е.В., Ваганова О.Ф. Создание исходного материала яровой мягкой пшеницы для селекции на устойчивость к стеблевой ржавчине (*Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici*), в том числе и к расе Ug99, в России. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(3):320-328. DOI 10.18699/VJ16.167
- [Lapochkina I.F., Baranova O.A., Shamanin V.P., Volkova G.V., Gainullin N.R., Anisimova A.V., Galinger D.N., Lazareva E.N., Gladkova E.V., Vaganova O.F. The development of initial material of spring common wheat for breeding for resistance to stem rust (*Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici*), including race Ug99, in Russia. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(3):320-328. DOI 10.18699/VJ16.167
- Лапочкина И.Ф., Баранова О.А., Гайнуллин Н.Р., Волкова Г.В., Гладкова Е.В., Ковалева Е.О., Осипова А.В. Создание линий озимой пшеницы с несколькими генами устойчивости к *Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici* для использования в селекционных программах России. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(6):676-684. DOI 10.18699/VJ18.410
- [Lapochkina I.F., Baranova O.A., Gajnullin N.R., Volkova G.V., Gladkova E.V., Kovaleva E.O., Osipova A.V. The development of winter wheat lines with several genes for resistance to *Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici* for use in breeding programs in Russia. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(6):676-684. DOI 10.18699/VJ18.410 (in Russian)]
- Рсалиев А.С., Рсалиев Ш.С. Основные подходы и достижения в изучении расового состава стеблевой ржавчины пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(8):967-977. DOI 10.18699/VJ18.439
- [Rsaliyev A.S., Rsaliyev Sh.S. Principal approaches and achievements in studying race composition of wheat stem rust. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(8):967-977. DOI 10.18699/VJ18.439 (in Russian)]
- Санин С.С., Назарова Л.Н., Стрижекозин Ю.А., Корнева Л.Г., Жохова Т.П., Полякова Т.М., Копорова Т.И. Фитосанитарная обстановка на посевах пшеницы в Российской Федерации (1991–2008 гг.). *Защита и карантин растений*. 2010;2:69-80
- [Sanin S.S., Nazarova L.N., Strizhekozin Yu.A., Korneva L.G., Zhokhova T.P., Polyakova T.M., Koporova T.I. Phytosanitary situation on wheat crops in the Russian Federation (1991–2008). *Zashchita i Karantin Rastenij = Plant Protection and Quarantine*. 2010;2:69-80 (in Russian)]
- Сняк Е.В., Волкова Г.В. Распространение и вирулентность популяции возбудителя *Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici* Eriks. et Henn. на юге России. *Молодой ученый*. 2015;89(2):70-71
- [Snyak E.V., Volkova G.V. Spreading and virulence of *Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici* Eriks. et Henn. in Southern Russia. *Molodoy Uchenyj = Young Scientist*. 2015;89(2):70-71 (in Russian)]
- Сколотнева Е.С., Салина Е.А. Разнообразие механизмов устойчивости, вовлеченных в многоуровневый иммунитет пшеницы к ржавчинным заболеваниям. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(5):542-550. DOI 10.18699/VJ19.523
- [Skolotneva E.S., Salina E.A. Resistance mechanisms involved in complex immunity of wheat against rust diseases. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(5):542-550. DOI 10.18699/VJ19.523 (in Russian)]
- Сколотнева Е.С., Леонова И.Н., Букатич Е.Ю., Салина Е.А. Методические подходы к идентификации эффективных генов, определяющих устойчивость пшеницы к комплексу грибных заболеваний. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(7):862-869. DOI 10.18699/VJ17.307
- [Skolotneva E.S., Leonova I.N., Bukatich E.Yu., Salina E.A. Methodical approaches to identification of effective wheat genes providing broad-spectrum resistance against fungal diseases. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(7):862-869. DOI 10.18699/VJ17.307 (in Russian)]
- Шаманин В.П., Потоцкая И.В., Кузьмина С.П., Трущенко А.Ю., Чурсин А.С. Селекция яровой мягкой пшеницы на устойчивость к стеблевой ржавчине в Западной Сибири. Омск: Изд-во ФГБОУ ВПО ОмГАУ, 2015
- [Shamanin V.P., Pototskaya I.V., Kuzmina S.P., Trushchenko A.Yu., Chursin A.S. Spring Soft Wheat Breeding for Stem Rust Resistance in Western Siberia. Omsk: Omsk State Agrarian University Publ., 2015 (in Russian)]
- Baranova O.A., Sibikeev S.N., Druzhin A.E. Molecular identification of the stem rust resistance genes in the introgression lines of spring bread wheat. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(2):296-303. DOI 10.18699/VJ19.494
- Dean R., Van Kan J.A.L., Pretorius Z.A., Hammond-Kosack K.E., Di Pietro A., Spanu P.D., Rudd J.J., Dickman M., Kahmann R., Ellis J., Foster G.D. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Mol. Plant Pathol.* 2012;13(4):414-430. DOI 10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x
- Kelbin V.N., Skolotneva E.S., Shamanin V.P., Salina E.A. Diversity of stem rust resistance in modern Siberian bread wheat (*Triticum aestivum*) germplasm. *Plant Breed.* 2022;141(2):194-203. DOI 10.1111/pbr.12999
- Kokhmetova A., Morgunov A., Rsaliyev S., Rsaliyev A., Yessenbekova G., Typina L. Wheat germplasm screening for stem rust resistance using conventional and molecular techniques. *Czech J. Genet. Plant Breed.* 2011;47(10):S146-S154. DOI 10.17221/3270-CJGPB

- Krattinger S.G., Lagudah E.S., Spielmeier W., Singh R.P., Huerta-Espino J., McFadden H., Bossolini E., Selter L.L., Keller B. A putative ABC transporter confers durable resistance to multiple fungal pathogens in wheat. *Science*. 2009;323(5919):1360-1363. DOI 10.1126/science.1166453
- McIntosh R.A., Luig N.H. Linkage of genes for reaction to *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* and *P. recondita* in Selkirk wheat and related cultivars. *Aust. J. Biol. Sci.* 1973;26:1145-1152. DOI 10.1071/B19731145
- McIntosh R.A., Hart G., Gale M. Catalogue of gene symbols for wheat. In: Proceedings of the 8th International Wheat Genetics Symposium. China Agricultural Sciencetech Press, 1993;1333-1500
- Michiels A., Van Den Ende W., Tucker M., Van Riet L., Van Laere A. Extraction of high-quality genomic DNA from latex-containing plants. *Anal. Biochem.* 2003;315(1):85-89. DOI 10.1016/S0003-2697(02)00665-6
- Peterson R.F., Campbell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Canad. J. Res.* 1948;26:496-500
- Shamanin V., Salina E., Wanyera R., Zelenskiy Y., Olivera P., Morgounov A. Genetic diversity of spring wheat from Kazakhstan and Russia for resistance to stem rust Ug99. *Euphytica*. 2016;212(2):287-296. DOI 10.1007/s10681-016-1769-0
- Singh R.P., Hodson D.P., Huerta-Espino J., Jin Y., Bhavani S., Njau P., Herrera-Foessel S., Singh P.K., Singh S., Govindan V. The emergence of Ug99 races of the stem rust fungus is a threat to world wheat production. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2011;49:465-481. DOI 10.1146/annurev-phyto-072910-095423

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 16.08.2024. После доработки 26.08.2024. Принята к публикации 30.08.2024.