

Перевод на английский язык <https://vavilov.elpub.ru/jour>

Ген *Sr38*: значение для селекции мягкой пшеницы в условиях Западной Сибири

Е.С. Сколотнева¹✉, В.Н. Кельбин¹, В.П. Шаманин², Н.И. Бойко³, В.А. Апарина³, Е.А. Салина^{1, 4}

¹ Федеральное исследовательское учреждение Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Омск, Россия

³ Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

⁴ Курчатовский геномный центр ИЦиГ СО РАН, Новосибирск, Россия

✉ sk-ska@yandex.ru

Аннотация. Современная селекция пшеницы на иммунитет широко применяет генетический резерв близкородственных видов из семейства Triticeae. Транслокация 2NS/2AS привнесена в геном культурного злака *Triticum aestivum* от дикорастущего сородича *T. ventricosum* и содержит гены *Lr37*, *Yr17* и *Sr38*, которые отвечают за устойчивость пшеницы на уровне проростков к бурой, желтой и стеблевой ржавчине с соответствующими возбудителями: *Puccinia triticina* Eriks., *P. striiformis* West. f. sp. *tritici* и *P. graminis* Pers. f. sp. *tritici* Eriks. & E. Henn. Данная транслокация известна в таких мировых сортах, как Trident, Madsen, Rendezvous, а также в отечественных сортах южной селекции Морозко, Сварог, Граф, Маркиз и Гомер. При этом ген *Sr38* до сих пор не введен в производственные сорта, высеваемые на территории Западной Сибири, поэтому сохраняет практическое значение для селекции на иммунитет в областях, где патогенная популяция *P. graminis* f. sp. *tritici* представлена авирулентными клонами. Основная цель работы состояла в анализе частоты а/вирулентных клонов к гену *Sr38* в расширенной западносибирской выборке возбудителя стеблевой ржавчины. В лаборатории с контролируемым климатом (Институт цитологии и генетики СО РАН) на проростках универсального восприимчивого сорта Хакасская выделено 139 монопустульных изолятов *P. graminis* f. sp. *tritici* из образцов урединиоспор Новосибирской, Омской областей, Алтайского и Красноярского края, собранных в 2019–2020 гг. на производственных и селекционных посевах мягкой пшеницы. Путем заражения тестерных генотипов пшеницы, несущих ген *Sr38* (VPM1 и Trident), выявлены вариации по частоте а/вирулентных клонов в географических образцах *P. graminis* f. sp. *tritici*. В целом текущая западносибирская популяция представлена на 60 % авирулентными клонами гриба к гену *Sr38*, при этом в образцах популяции из Красноярского края не выявлено ни одного вирулентного изолята. Поиск источников гена устойчивости к стеблевой ржавчине среди отечественного селекционного материала был выполнен с помощью специфических молекулярных маркеров на транслокацию 2NS/2AS. Исходя из перспективы использования в регионе, выбор проводили среди коллекций линий и сортов мягкой яровой пшеницы Омского ГАУ, адаптированных к условиям Западной Сибири. Присутствие гена постулировалось путем проведения процедуры генотипирования с помощью специфических праймеров (VENTRIUP-LN2) и фитопатологического тестирования авирулентными клонами гриба. Носителями доминантных аллелей гена *Sr38* оказались линии Лютесценс 12-18, Лютесценс 81-17, Лютесценс 66-16, Эритроспермум 79/07, 9-31 и 8-26. Полученные данные по составу образцов западносибирской популяции *P. graminis* f. sp. *tritici* позволяют рассматривать ген *Sr38* в качестве кандидата для включения в селекцию пшеницы в Красноярском крае, а также в составе генных пирамид в Новосибирской области и Алтайском крае.

Ключевые слова: *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*; авирулентные клоны; устойчивость; *Triticum aestivum*; *Sr38*.

Для цитирования: 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

The gene *Sr38* for bread wheat breeding in Western Siberia

E.S. Skolotneva¹✉, V.N. Kelbin¹, V.P. Shamanin², N.I. Boyko³, V.A. Aparina³, E.A. Salina^{1, 4}

¹ Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia

³ Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – Branch of the Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

⁴ Kurchatov Genomic Center of ICG SB RAS, Novosibirsk, Russia

✉ sk-ska@yandex.ru

Abstract. Present-day wheat breeding for immunity exploits extensively closely related species from the family Triticeae as gene donors. The 2NS/2AS translocation has been introduced into the genome of the cultivated cereal *Triticum aestivum* from the wild relative *T. ventricosum*. It contains the *Lr37*, *Yr17*, and *Sr38* genes, which support

seedling resistance to the pathogens *Puccinia triticina* Eriks., *P. striiformis* West. f. sp. *tritici*, and *P. graminis* Pers. f. sp. *tritici* Eriks. & E. Henn, which cause brown, yellow, and stem rust of wheat, respectively. This translocation is present in the varieties Trident, Madsen, and Rendezvous grown worldwide and in the Russian varieties Morozko, Svarog, Graf, Marquis, and Homer bred in southern regions. However, the *Sr38* gene has not yet been introduced into commercial varieties in West Siberia; thus, it remains of practical importance for breeding in areas where populations of *P. graminis* f. sp. *tritici* are represented by avirulent clones. The main goal of this work was to analyze the frequency of clones (a)virulent to the *Sr38* gene in an extended West Siberian collection of stem rust agent isolates. In 2019–2020, 139 single pustule isolates of *P. graminis* f. sp. *tritici* were obtained on seedlings of the standard susceptible cultivar Khakasskaya in an environmentally controlled laboratory (Institute of Cytology and Genetics SB RAS) from samples of urediniospores collected on commercial and experimental bread wheat fields in the Novosibirsk, Omsk, Altai, and Krasnoyarsk regions. By inoculating test wheat genotypes carrying *Sr38* (VPM1 and Trident), variations in the purity of (a)virulent clones were detected in geographical samples of *P. graminis* f. sp. *tritici*. In general, clones avirulent to *Sr38* constitute 60 % of the West Siberian fungus population, whereas not a single virulent isolate was detected in the Krasnoyarsk collection. The Russian breeding material was screened for sources of the stem rust resistance gene by using molecular markers specific to the 2NS/2AS translocation. A collection of hybrid lines and varieties of bread spring wheat adapted to West Siberia (Omsk SAU) was analyzed to identify accessions promising for the region. The presence of the gene was postulated by genotyping with specific primers (VENTRIUP-LN2) and phytopathological tests with avirulent clones of the fungus. Dominant *Sr38* alleles were identified in Lutescens 12-18, Lutescens 81-17, Lutescens 66-16, Erythrospermum 79/07, 9-31, and 8-26. On the grounds of the composition of the West Siberian *P. graminis* f. sp. *tritici* population, the *Sr38* gene can be considered a candidate for pyramiding genotypes promising for the Novosibirsk, Altai, and Krasnoyarsk regions.

Key words: *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*; avirulent clones; resistance; *Triticum aestivum*; *Sr38*.

For citation: 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. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(7):740-745. DOI 10.18699/VJ21.084

Введение

Мягкая пшеница *Triticum aestivum* – культура с длительной историей возделывания в большинстве стран мира. Неизбежным становится истощение разнообразия генов пшеничного генома, готовых послужить новым источником важных хозяйственно ценных признаков, среди которых устойчивость к болезням. Современная селекция пшеницы на иммунитет широко применяет генетический резерв дикорастущих сородичей из семейства Triticeae, таких как *Triticum monococcum* L., *T. speltoides* (Tausch) Gren., *T. ventricosum* (McIntosh et al., 1995; Dubcovsky et al., 1996; Friebe et al., 1996). Протяженный участок хромосомы (25–38 сМ), содержащий три гена устойчивости к ржавчинным заболеваниям, был перенесен в геном мягкой озимой пшеницы сорта VPM1 от *T. ventricosum* (Maia, 1967) и локализован как транслокация 2NS/2AS (Bariana, McIntosh, 1993). Приобретенные гены *Lr37*, *Yr17* и *Sr38* отвечают за устойчивость пшеницы к бурой, желтой и стеблевой ржавчине с соответствующими возбудителями: *Puccinia triticina* Eriks., *P. striiformis* West. f. sp. *tritici* и *P. graminis* Pers. f. sp. *tritici* Eriks. & E. Henn. Транслокацию 2NS/2AS интрогрессировали и в другие коммерческие сорта – Trident, Madsen, Rendezvous (McIntosh et al., 1995), после чего она была интенсивно вовлечена в селекцию в различных регионах мира, обеспечивая эффективную защиту от ржавчинных патогенов, а также некоторых видов злаковых нематод (Duck, Lukow, 1988; Robert et al., 1999; Seah et al., 2000). В Национальном центре зерна им. П.П. Лукьяненко созданы, включены в Государственный реестр РФ и допущены к использованию в производстве по Центрально-Черноземному, Северо-Кавказскому, Средне-Волжскому и Нижне-Волжскому регионам сорта с идентифицированным геном устойчивости к бурой ржавчине *Lr37*, а соответственно, и с генами устойчивости к стеблевой и желтой ржавчине *Sr38*, *Yr17*:

Морозко (2015), Сварог (2017), Граф (2018), Маркиз (2019) и Гомер (2020) (Беспалова и др., 2019а, б).

Более двадцати лет назад ген *Sr38* потерял свою эффективность к стеблевой ржавчине в странах Азии и Северной Африки, откуда получила распространение южная агрессивная раса Ug99 (Pretorius et al., 2000). Однако в России раса Ug99 до сих пор не регистрируется среди фитопатогенного комплекса пшеницы (Баранова и др., 2015; Skolotneva et al., 2020). Более того, показано, что ген *Sr38* эффективнее экспрессируется при низких температурах (Helguera et al., 2003), что позволяет рассматривать его в качестве кандидата для включения в селекцию пшеницы в регионах с умеренным климатом. Ген *Sr38* до сих пор широко не введен в производственные сорта, высеваемые на территории Западной Сибири (Сочалова, Лихенко, 2015), поэтому сохраняет практическое значение для селекции на иммунитет в областях, где патогенная популяция *P. graminis* f. sp. *tritici* представлена авирулентными клонами.

Разработано несколько молекулярных маркеров к транслокации 2NS/2AS для облегчения переноса генов *Lr37*, *Yr17* и *Sr38* в коммерческие сорта. Первым предложенным маркером был доминантный SCAR маркер (sequence characterized amplified region), расположенный на расстоянии 0.8 ± 0.7 сМ от гена *Yr17* (Robert et al., 1999). В настоящее время для идентификации транслокации 2NS/2AS в генетическом материале пшеницы широко применяют два маркера (Helguera et al., 2003). Кодоминантный CAPS (cleavage amplified polymorphic sequence) маркер требует дополнительной стадии расщепления диагностического фрагмента с помощью ферментов рестрикции. Доминантный ПЦР-маркер разработан непосредственно на специфическую последовательность распространенного аллеля внутри транслокации 2NS/2AS. Для его получения используют пару праймеров VENTRIUP-LN2, разделяя про-

дукты амплификации в агарозном геле (<https://maswheat.ucdavis.edu/protocols/Sr38>), что является очевидным преимуществом маркера.

Целью данной работы был анализ частоты а/вирулентных клонов к гену *Sr38* в расширенной западносибирской выборке возбудителя стеблевой ржавчины за счет образцов из Красноярского края. Кроме того, последовательной частью работы стал поиск носителей гена *Sr38* с помощью молекулярных ДНК-маркеров. Использовалась коллекция линий и сортов мягкой яровой пшеницы, адаптированных к условиям Западной Сибири.

Материалы и методы

Расширенная западносибирская выборка возбудителя стеблевой ржавчины была представлена образцами из Новосибирской, Омской областей, Алтайского и Красноярского края, собранных в 2019–2020 гг. на производственных и селекционных посевах мягкой пшеницы. В условиях лаборатории с контролируемым климатом (ИЦиГ СО РАН) на проростках универсального восприимчивого сорта Хакасская из сборных образцов урединоспор было выделено 139 монопустульных изолятов *P. graminis* f. sp. *tritici* (табл. 1).

Для выявления частоты а/вирулентных клонов к гену *Sr38* использовали тестерные генотипы пшеницы: изогенную линию и сорта из наборов для дифференциации рас стеблевой ржавчины пшеницы США и Канады, несущие ген *Sr38* (VPM и Trident соответственно). Семенной материал был предварительно верифицирован с помощью молекулярных маркеров к гену, из дальнейшей работы исключены растения, для которых обнаружен отрицательный сигнал на ДНК-матрице.

Анализ устойчивости проводили на проростках, условия подготовки и проведения инокуляции клонами гриба подробно описаны в работе (Сколотнева и др., 2020). Для интерпретации инфекционных типов на тестерных генотипах пшеницы использовали 4-балльную шкалу Стэкмана (Stakman et al., 1962).

Коллекция из 80 линий и сортов мягкой яровой пшеницы, адаптированных к условиям Западной Сибири, представлена проф. В.П. Шаманиным (Омский ГАУ). Образцы ДНК выделяли из верхушек проростков растений с помощью СТАВ метода (Rogers, Bendich, 1985). Количество ДНК оценивали флуориметром Qubit 4 (Invitrogen, США).

Идентификацию гена *Sr38* в селекционном материале проводили с помощью пары праймеров VENTRIUP (5'-AGGGCTACTGACCAAGGCT-3') и LN2 (5'-TGCACTACAGCAGTATGTACACAAAA-3') на транслокацию 2NS/2AS. Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) осуществляли в конечном объеме 25 мкл реакционной смеси, содержащей 1 × SE-Буфер AS (Amomonium Sulfate), dNTPs (0.2 mM каждого), праймеры (0.2 мкМ каждого), MgCl₂ (1.5 mM), 50 нг геномной ДНК, 1 е. а. Таq ДНК полимеразы (SibEnzyme). Амплификацию выполняли на приборе Bio-Rad T100 (Bio-Rad, США) в следующем режиме: 7 мин при 94 °C, 30 циклов при 94 °C (30 с), 65 °C (30 с), 72 °C (40 с) и финальная элонгация 72 °C (10 мин). Детекцию продуктов амплификации проводили в 2 % агарозном геле. Для оценки размера фрагментов использовали ДНК-маркер Step 50 plus (Биолабмикс).

Таблица 1. Частота авирулентных клонов *P. graminis* f. sp. *tritici* на тестерных генотипах пшеницы с *Sr38*

Место сбора образца	Год	Кол-во монопустульных изолятов	Авирулентные клоны на линиях <i>Sr38</i> , %
Омская область	2020	33	9
Новосибирская область	2019, 2020	57	65
Алтайский край	2019	21	71
Красноярский край	2020	28	100
В целом		139	60

Постулирование гена завершалось процедурой фитопатологического тестирования устойчивости изолятами *P. graminis* f. sp. *tritici*, авирулентными к *Sr38*. Оценивалась устойчивость растений на стадии проростков по вышеупомянутой схеме, в качестве восприимчивого контроля был взят сорт Хакасская. Опыт выполнен на 10 растениях каждого генотипа в двух повторностях.

Результаты и обсуждение

Оценка образцов возбудителя стеблевой ржавчины пшеницы из различных областей Западно-Сибирского региона выявила вариации по частоте клонов гриба, не поражающих тестерные генотипы с *Sr38*, т. е. авирулентные к ним (см. табл. 1). Отмечен градиент с запада на восток: минимальная частота в Омской области против 100 % авирулентности образца популяции из Красноярского края. Полиморфизм обнаруженных инфекционных типов в ответ на заражение монопустульными изолятами *P. graminis* f. sp. *tritici* из различных выборок представлен на рис. 1. Получены все варианты, описываемые баллами «1», «2», «3» и «3+», но для образцов из Алтайского и Красноярского края преобладают варианты, соответствующие реакциям устойчивости и средней устойчивости хозяина. Интересно отметить факт появления авирулентных клонов в образцах новосибирской и алтайской инфекции, что не было зафиксировано при анализе расового состава западносибирской популяции, выполненном в 2017 г. (Skolotneva et al., 2020). Вероятным объяснением может быть занос инокулюма *P. graminis* f. sp. *tritici* из южных регионов: известно, что ген *Sr38* эффективен в северных районах Казахстана и в Китае (Койшыбаев, 2018; Li et al., 2018).

В целом текущая западносибирская популяция представлена на 60 % авирулентными клонами гриба к гену *Sr38*. Если исключить из рассмотрения выборку из Омской области, где уже несколько лет ген описывается в категории неэффективных к местному патогену (Shamanin et al., 2020), то частота клонов гриба, не поражающих генотипы с *Sr38*, возрастет до 78 %. Это позволяет предложить ген *Sr38* в качестве кандидата для включения в пирамиды генов в селекционных программах восточных областей региона. Эффективность генотипов *Sr25+Sr38*, *Sr31+Sr38* показана, например, на Урале, где одиночно *Sr38* не позволяет обеспечить должную защиту от стеблевой ржавчины

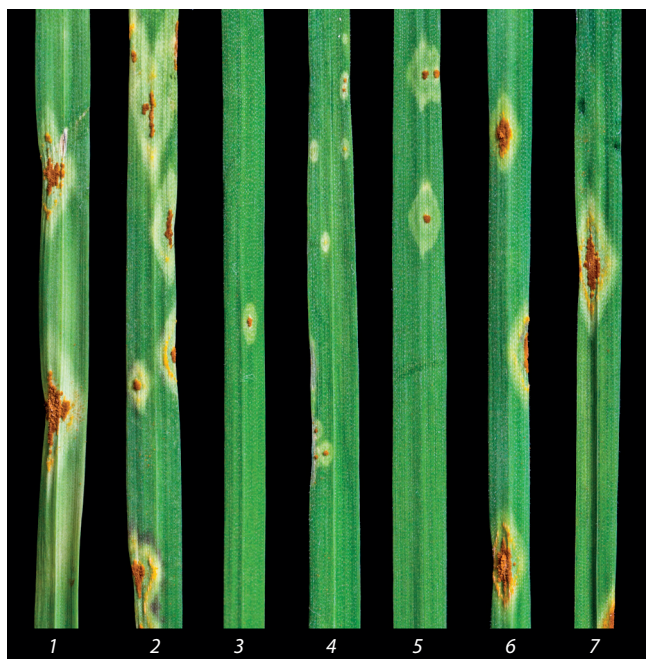


Рис. 1. Инфекционные типы *P. graminis* f. sp. *tritici* из различных географических выборок на тестерных генотипах с *Sr38*.

Заражение изолятами гриба: 1–3 – из Новосибирской области (1 – тип реакции «3+», 2 – тип реакции «3–», 3 – тип реакции «1»); 4 – из Алтайского края (тип реакции «1»); 5 – из Красноярского края (тип реакции «2»); 6, 7 – из Омской области (6 – тип реакции «3», 7 – тип реакции «3+»).

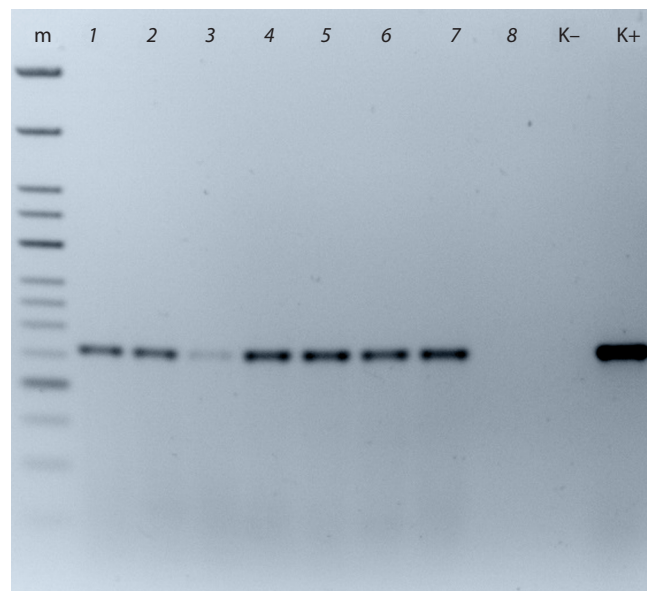


Рис. 2. Электрофореграмма продуктов амплификации молекулярных маркеров к гену *Sr38* на ДНК матрицах мягкой пшеницы из западносибирской коллекции селекционных линий ОмГАУ.

m – ДНК-маркер Step 50 plus (Биолабмикс); 1 – Лютесценс 12-18; 2 – Лютесценс 34-16; 3 – Лютесценс 81-17; 4 – Лютесценс 66-16; 5 – Эритроспермум 79/07; 6 – линия 9-31; 7 – линия 8-26; 8 – генотип 2 из коллекции Омского ГАУ; «K–» и «K+» – отрицательный (сорт Хакасская) и положительный (VPM1) контроль.

Таблица 2. Родословная некоторых линий мягкой пшеницы из западносибирской коллекции Омского ГАУ, устойчивых к стеблевой ржавчине в условиях естественного инфекционного фона Омской области, 2019 г.

Линия	Родословная	Полевая оценка
Лютесценс 12-18	MN6616M/3/NL456/VEE#5//DUCULA/4/KARAGANDINSKAYA 70	20MR
Лютесценс 34-16	OMSKAYA 36/BAVIS//TERTSIYA	10MR
Лютесценс 81-17	ERITROSPERMUM 55-94-01-20/5/PYN/BAU/3/MON/IMU//ALD/PVN/4/VEE#5/SARA//DUCULA/6/FITON 42	10MR
Лютесценс 66-16	27.90.98.3/3/KA/NAC//TRCH/4/ALTAYSKAYA 530	25MR
9-31	UKR-OD 1530.94/AE.SQUARROSA(1027)/Pamyati Azieva	20MR
8-26	AISBERG/AE.SQUARROSA(369)/Omgau 90	20MR

(Дружин и др., 2018). Кроме того, селекционная ценность транслокации 2NS/2AS состоит в том, что она несет гены устойчивости *Lr37* и *Yr17*, которые сохраняют эффективность к западносибирским образцам возбудителей бурой и желтой ржавчины (Skolotneva et al., 2018; Гулятьева, Шайдаюк, 2020).

Поиск источников гена *Sr38* среди отечественного селекционного материала был выполнен с помощью специфического молекулярного маркера на транслокацию 2NS/2AS. Исходя из перспективы использования в регионе, выбор проводили среди коллекции линий и сортов мягкой яровой пшеницы Омского ГАУ, адаптированных к условиям Западной Сибири. Присутствие гена постулировалось путем проведения процедуры генотипирования с помощью специфических праймеров (VENTRIUP-LN2) и фитопатологического тестирования авирулентными клонами гриба.

Положительный сигнал, соответствующий диагностическому фрагменту размером 259 п.н., был получен на ДНК-матрицах семи селекционных линий пшеницы: Лютесценс 12-18, Лютесценс 34-16, Лютесценс 81-17, Лютесценс 66-16, Эритроспермум 79/07, 9-31, 8-26 (рис. 2). Родословная перечисленных сортов и гибридных линий приведена в табл. 2. Обращает на себя внимание сильное различие предполагаемых носителей гена *Sr38* по происхождению, что составляет ценность материала в качестве разнообразных доноров устойчивости.

Для фитопатологического тестирования западносибирской коллекции сортов и гибридных линий мягкой пшеницы из образцов инфекции Красноярского края выбраны изоляты *P. graminis* f. sp. *tritici* гриба, показывающие стабильно воспроизводимые реакции устойчивости на тестерных генотипах пшеницы с *Sr38*. Инфекционные типы «0» и «1» были описаны на зараженных растениях

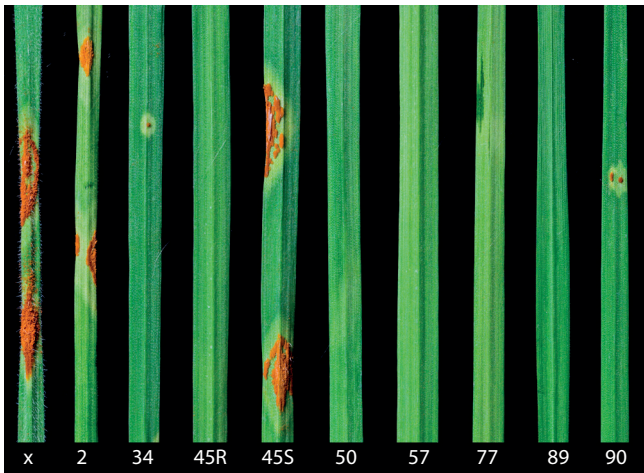


Рис. 3. Реакция селекционных линий мягкой пшеницы из западно-сибирской коллекции ОмГАУ на заражение изолятами *P. graminis* f. sp. *tritici*, авирулентными к *Sr38*.

Растения на стадии проростков: х – сорт Хакасская (тип реакции «4»); 2 – генотип 2 из коллекции ОмГАУ (тип реакции «3»); 34 – Лютесценс 12-18 (тип реакции «1»); 45R и 45S – Лютесценс 34-16 (тип реакции «0» и «4» соответственно); 50 – Лютесценс 81-17 (тип реакции «0»); 57 – Лютесценс 66-16 (тип реакции «0»); 77 – Эритроспермум 79/07 (тип реакции «0»); 89 – линия 9-31 (тип реакции «0»); 90 – линия 8-26 (тип реакции «1»).

Лютесценс 12-18, Лютесценс 34-16, Лютесценс 81-17, Лютесценс 66-16, Эритроспермум 79/07, 9-31, 8-26, что соответствует реакции устойчивости (рис. 3). Для сравнения, помимо контроля восприимчивости (сорт Хакасская), в анализ был включен генотип 2 без гена *Sr38*, по данным генотипирования с использованием молекулярных маркеров. На них наблюдали максимальное развитие симптомов стеблевой ржавчины с баллами 3 и 4. Часть протестированных растений Лютесценс 34-16 была восприимчива к изолятам гриба с авирулентностью к *Sr38* (см. рис. 3, 45R) и 45S). На их долю в проанализированной выборке пришлось около 30 %, что говорит о наличии в селекционном материале биотипов, различающихся по признаку устойчивости к стеблевой ржавчине. Используемый молекулярный маркер к гену является доминантным, поэтому не может исключать гетерозиготность признака, что выявилось в результате фитопатологического тестирования. Для остальных шести селекционных образцов западно-сибирской коллекции сортов и линий мягкой пшеницы (Лютесценс 12-18, Лютесценс 81-17, Лютесценс 66-16, Эритроспермум 79/07, 9-31, 8-26) подтверждено присутствие устойчивых аллелей гена *Sr38*, экспрессирующихся в ответ на заражение авирулентными клонами гриба по закону Флора «ген-на-ген» взаимодействия хозяина и патогена. Данные иммунологического скрининга этих линий, полученные во время полевых испытаний селекционного материала на естественном инфекционном фоне в Омской области в 2019 г., свидетельствуют о средней устойчивости к стеблевой ржавчине носителей гена *Sr38* (см. табл. 2). Это согласуется с результатами фитопатологического тестирования материала с помощью образцов Омской популяции *P. graminis* f. sp. *tritici* на уровне проростков.

Заключение

Полученные данные по составу образцов западносибирской популяции *P. graminis* f. sp. *tritici* позволяют рассмотреть ген *Sr38* в качестве кандидата для включения в селекцию пшеницы в Красноярском крае, а также в составе генных пирамид в Новосибирской области и Алтайском крае. Носителями доминантных аллелей гена *Sr38* являются следующие селекционные линии мягкой пшеницы Омского ГАУ: Лютесценс 12-18, Лютесценс 81-17, Лютесценс 66-16, Эритроспермум 79/07, линии 9-31 и 8-26. Этот селекционный материал адаптирован к условиям региона и может быть рекомендован для селекционных учреждений Западной Сибири в качестве доноров устойчивости к стеблевой ржавчине.

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., Iordanskaya 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.]
- Беспалова Л.А., Аблова И.Б., Худокормова Ж.Н., Пузырная О.Ю., Набоков Г.Д., Агаева Е.В., Тархов А.С. Генетические детерминанты резистентности сортов озимой пшеницы к *Puccinia* spp. В: Состояние и перспективы развития аграрной науки в условиях изменяющегося климата: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Краснодар, 5–6 сент. 2019 года. Краснодар: Изд-во «ЭДВИ», 2019а:11-18.
- [Bespalova L.A., Ablova I.B., Khudokormova Zh.N., Puzyrnaya O.Yu., Nabokov G.D., Agaeva E.V., Tarhov A.S. Genetic determinants of resistance of winter wheat varieties to *Puccinia* spp. In: Proceedings of the Int. Conf. "State and Prospects for the Development of Agricultural Science in a Changing Climate". Krasnodar: EDVI Publ., 2019a:11-18. (in Russian)]
- Беспалова Л.А., Аблова И.Б., Худокормова Ж.Н., Пузырная О.Ю., Набоков Г.Д., Агаева Е.В., Тархов А.С. Генетическая защищенность сортов озимой пшеницы от ржавчинных болезней. *Рисоводство*. 2019б;4(45):30-37.
- [Bespalova L.A., Ablova I.B., Khudokormova Zh.N., Puzyrnaya O.Yu., Nabokov G.D., Agaeva E.V., Tarhov A.S. Genetic protection of winter wheat varieties against rust diseases. *Risovodstvo = Rice Growing*. 2019b;4(45):30-37. (in Russian)]
- Гульятеева Е.И., Шайдаюк Е.Л. Вирулентность российских популяций возбудителя желтой ржавчины пшеницы. *Микология и фитопатология*. 2020;54(4):299-304. DOI 10.31857/S0026364820040042.
- [Gulyatayeva E.I., Shaydayuk Ye.L. Virulence of Russian populations of stripe rust causal agent. *Mikologiya i Fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*. 2020;54(4):299-304. DOI 10.31857/S0026364820040042. (in Russian)]
- Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Власовец Л.Т., Голубева Т.Д., Калинин Т.В. Изучение хозяйственно ценных и адаптивных признаков у нового сорта яровой мягкой пшеницы Александрит, созданного методом интрогрессивной селекции. *Успехи современной естествознания*. 2018;9:12-17. DOI 10.17513/use.36859.
- [Druzhin A.Ye., Sibikayev S.N., Vlasovets L.T., Golubeva T.D., Kalintseva T.V. The study of agronomic valuable and adaptive traits in a new cultivar of spring bread wheat Alexandrite produced by introgression breeding. *Uspekhi Sovremennogo Yestestvoznaniya = Ad-*

- vances in *Current Natural Sciences*. 2018;9:12-17. DOI 10.17513/use.36859. (in Russian)]
- Койшыбаев М. Болезни пшеницы. Анкара: Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО), 2018.
[Koysybayev M. Wheat Diseases. Ankara: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018. (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., Morgunov A.I., Boyko N.I., Shamanin V.P., Salina E.A. Races composition of the Novosibirsk population of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *Mikologiya i Fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*. 2020;54(1):49-58. DOI 10.31857/S0026364820010092. (in Russian)]
- Сочалова Л.П., Лихенко И.Е. Генетическое разнообразие яровой пшеницы по устойчивости к мигрирующим заболеваниям. Новосибирск, 2015.
[Sochalova L.P., Lichenko I.E. The Genetic Diversity of Spring Wheat in Resistance to Migratory Diseases. Novosibirsk, 2015. (in Russian)]
- Bariana H.S., McIntosh R.A. Cytogenetic studies in wheat. XV. Location of rust resistance genes in VPM1 and their genetic linkage with other disease resistance genes in chromosome 2A. *Genome*. 1993; 36(3):476-482. DOI 10.1139/g93-065.
- Dubcovsky J., Luo M.C., Zhong G.Y., Bransteitter R., Desai A., Kilian A., Kleinhofs A., Dvořák J. Genetic map of diploid wheat, *Triticum monococcum* L., and its comparison with maps of *Hordeum vulgare* L. *Genetics*. 1996;143(2):983-999. DOI 10.1093/genetics/143.2.983.
- Dyck P.L., Lukow O.M. The genetic analysis of two interspecific sources of leaf rust resistance and their effect on the quality of common wheat. *Can. J. Plant Sci.* 1988;68(3):633-639. DOI 10.4141/cjps88-076.
- Friebe B., Jiang J., Raupp W.J., McIntosh R.A., Gill B.S. Characterization of wheat-alien translocations conferring resistance to diseases and pests: current status. *Euphytica*. 1996;91(1):59-87. DOI 10.1007/BF00035277.
- Helguera M., Khan I.A., Kolmer J., Lijavetzky D., Zhong-qi L., Dubcovsky J. PCR assays for the *Lr37-Yr17-Sr38* cluster of rust resistance genes and their use to develop isogenic hard red spring wheat lines. *Crop Sci.* 2003;43(5):1839-1847. DOI 10.2135/cropsci2003.1839.
- Li T.Y., Ma Y.C., Wu X.X., Chen S., Xu X.F., Wang H., Cao Y.Y., Xuan Y.X. Race and virulence characterization of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* in China. *PLoS One*. 2018;13(5):e0197579. DOI 10.1371/journal.pone.0197579.
- Maia N. Obtention des bles tendres résistants au piétin-verse par croisements interspécifiques bles × *Aegilops*. *C.R. Séances Acad. Agric. Fr.* 1967;53:149-154.
- McIntosh R.A., Wellings C.R., Park R.F. Wheat Rusts an Atlas of Resistance Genes. Australia: CSIRO Publ., 1995. DOI 10.1007/BF03214019.
- Pretorius Z.A., Singh R.P., Wagoire W.W., Payne T.S. Detection of virulence to wheat stem rust resistance gene *Sr31* in *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* in Uganda. *Plant Dis.* 2000;84(2):203. DOI 10.1094/pdis.2000.84.2.203b.
- Robert O., Abelard C., Dedryver F. Identification of molecular markers for the detection of the yellow rust resistance gene *Yr17* in wheat. *Mol. Breed.* 1999;5(2):167-175. DOI 10.1023/A:1009672021411.
- Rogers S.O., Bendich A.J. Extraction of DNA from milligram amounts of fresh, herbarium and mummified plant tissues. *Plant Mol. Biol.* 1985;5(2):69-76. DOI 10.1007/BF00020088.
- Seah S., Spielmeier W., Jahier J., Sivasithamparam K., Lagudah E.S. Resistance gene analogs within an introgressed chromosomal segment derived from *Triticum ventricosum* that confers resistance to nematode and rust pathogens in wheat. *Mol. Plant Microbe Interact.* 2000;13(3):334-341. DOI 10.1094/MPMI.2000.13.3.334.
- Shamanin V.P., Pototskaya I.V., Shepelev S.S., Pozherukova V.E., Salina E.A., Skolotneva E.S., Hodson D., Hovmeller M., Morgunov A.I. Stem rust in Western Siberia – race composition and effective resistance genes. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(2):131-138. DOI 10.18699/VJ20.60823.
- Skolotneva E.S., Kosman E., Patpour M., Kelbin V.N., Morgunov A., Shamanin V.P., Salina E.A. Virulence phenotypes of Siberian wheat stem rust population in 2017–2018. *Front. Agron.* 2020;2:6. DOI 10.3389/fagro.2020.00006.
- Skolotneva E.S., Leonova I.N., Bukatich E.Y., Boiko N.I., Piskarev V.V., Salina E.A. Effectiveness of leaf rust resistance genes against *Puccinia triticina* populations in Western Siberia during 2008–2017. *J. Plant Dis. Prot.* 2018;125(6):549-555. DOI 10.1007/s41348-018-0191-3.
- Stakman E.C., Stewart D.M., Loegering W.Q. Identification of Physiologic Races of *Puccinia graminis* var. *tritici*. Washington: USDA, 1962.

ORCID ID

E.S. Skolotneva orcid.org/0000-0001-8047-5695
V.N. Kelbin orcid.org/0000-0002-3455-5704
V.P. Shamanin orcid.org/0000-0003-4767-9957
N.I. Boyko orcid.org/0000-0002-5026-4907
V.A. Aparina orcid.org/0000-0003-2714-7216
E.A. Salina orcid.org/0000-0001-8590-847X

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 19-316-90051) и бюджетного проекта ИЦиГ СО РАН № 0259-2019-0001.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.04.2021. После доработки 23.08.2021. Принята к публикации 23.08.2021.