

doi 10.18699/vjgb-26-87

Пребридинговые исследования линий яровой мягкой пшеницы, несущих транслокацию T1BS.1BL-1S#F7L-1BL с геном *Lr51*

С.Н. Сибикеев , А.Е. Дружин , З.Е. Фитилева , И.В. Борисов ^{1, 2}¹ Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Саратов, Россия² Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия sibikeev_sergey@mail.ru

Аннотация. Одним из эффективных генов устойчивости к возбудителю листовой ржавчины (*Puccinia triticina*) у мягкой пшеницы (*T. aestivum* L.) является ген *Lr51*, интродуцированный в геном мягкой пшеницы от *Aegilops speltoides* Tausch в составе транслокации T1BS.1BL-1S#F7L-1BL. Однако этот ген редко используют в практической селекции из-за опасения негативного влияния чужеродной транслокации на агрономические важные признаки. В данной работе представлены результаты пребридинговых исследований яровых линий мягкой пшеницы Л6 и Л7, несущих T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокацию, по сравнению с сортом-реципиентом Саратовская 68 и сортом-стандартом Саратовская 76 по комплексу селекционно значимых признаков. Наличие гена *Lr51* в генотипе линий Л6 и Л7 подтверждено ПЦР-анализом с использованием маркеров S30-13L и AGA7-759R. Фитопатологическая оценка линий Л6 и Л7 в условиях искусственного и естественного инфекционного фона к локальной популяции листовой ржавчины, распространенной в Саратовской области, показала их высокий уровень устойчивости в сравнении с сортом-реципиентом. По оценке цитологической стабильности линий, мейотический индекс составляет 98.2 и 99.7 у линий Л6 и Л7 соответственно. Наличие транслокации у Л6 и Л7 не влияло значимо на высоту растений и устойчивость к полеганию. У линий-аналогов продолжительность периода всходы–колошение оказалась на уровне сорта-реципиента и сорта-стандарта. По продуктивности зерна линии Л6 и Л7 также не отличались достоверно от сортов Саратовская 68 и Саратовская 76, по данным полевых испытаний за период 2023–2025 гг. Анализ структуры продуктивности главного колоса у линий Л6 и Л7 выявил отсутствие различий с сортом-реципиентом по всем показателям. По сравнению с сортом Саратовская 76 были достоверные различия в пользу линий-аналогов по плотности колоса, а у Л7 также по весу зерна с колоса и озерненности колоска. Наличие транслокации T1BS.1BL-1S#F7L-1BL у Л6 и Л7 незначимо повлияло на содержание белка, а также на качество муки и хлеба. Однако обе линии уступали сорту-реципиенту по таким признакам, как объем и пористость хлеба. Линии Л6 и Л7 уступали сорту Саратовская 76 по упругости, отношению упругости к растяжимости, объему хлеба, но превосходили по силе муки. В целом, с учетом цитологической стабильности и комплексу селекционно ценных показателей, влияние T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокации в генотипе сорта Саратовская 68 оценивается как нейтральное, а линии Л6 и Л7 имеют селекционную значимость по устойчивости к листовой ржавчине.

Ключевые слова: яровая мягкая пшеница; линии-аналоги сорта Саратовская 68; T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокация; устойчивость к листовой ржавчине; влияние на продуктивность и качество зерна

Для цитирования: Сибикеев С.Н., Дружин А.Е., Фитилева З.Е., Борисов И.В. Пребридинговые исследования линий яровой мягкой пшеницы, несущих транслокацию T1BS.1BL-1S#F7L-1BL с геном *Lr51*. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2026;30(6):854-862. doi 10.18699/vjgb-26-87

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWNF-2025-0003.

Prebreeding studies of spring bread wheat lines, carrying T1BS.1BL-1S#F7L-1BL translocation with *Lr51* gene

S.N. Sibikeev , A.E. Druzhin , Z.E. Fitileva , I.V. Borisov ^{1, 2}¹ Federal Agricultural Research Center for Southeast Regions, Saratov, Russia² Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – Subdivision of Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia sibikeev_sergey@mail.ru

Abstract. One of the sources of bread wheat resistance to the *Puccinia triticina* is the *Lr51* gene in the T1BS.1BL-1S#F7L-1BL translocation, from *Aegilops speltoides* Tausch. However, it is little used in the practical breeding of *Triticum aestivum* L. The main reason is the fear of the negative impact of translocation on important agronomic features. This paper presents the results of pre-breeding studies of lines-analogues of spring bread wheat

cultivar Saratovskaya 68 – L6 and L7, carrying T1BS.1BL-1S#F7L-1BL translocation, compared with the recipient – Saratovskaya 68 and the standard – Saratovskaya 76. The presence of the *Lr51* gene was confirmed by PCR analysis with markers S30-13L and AGA7-759R. Lines L6 and L7 are resistant to saratov populations of *P. tritici*. The lines-analogues are cytologically stable. The presence of translocation in L6 and L7 did not significantly influence for plant height and lodging resistance. In lines-analogues, the duration of the germination-earing period is at the level of recipient and standard cultivars. For grain productivity, lines L6 and L7 do not significantly differ from Saratovskaya 68. However, lines L6 and L7 surpassed Saratovskaya 76 in 2024, but there were no differences for 2023–2025 period. Analysis of the structure of the elements productivity of the main ear for average 2023–2025 period showed that at the lines L6 and L7 no differences with the cultivar-recipient for all traits. But comparisons with Saratovskaya 76, show significant differences in favor of lines with translocation in terms of ear density, while L7 also had significant differences for grain weight from the ear and number grains in spikelet. The presence of the T1BS.1BL-1S#F7L-1BL translocation in L6 and L7 did not significantly affect the protein content, as well as the indicators of flour and bread, except for the volume and porosity of bread. Lines L6 and L7 were inferior to Saratovskaya 76 in terms of elasticity, the ratio of elasticity to extensibility (P/L), and the volume of bread, but surpassed the strength of flour (W). In general, in terms of cytological stability and the entire range of breeding-valuable indicators, the effect of T1BS.1BL-1S#F7L-1BL translocation in the genotype of the Saratovskaya 68 is assessed as neutral, and lines L6 and L7 have breeding significance for leaf rust resistance.

Key words: spring bread wheat; lines-analogous of cultivar Saratovskaya 68; T1BS.1BL-1S#F7L-1BL; resistance to leaf rust; influence for grain productivity and bread making quality

For citation: Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Fitileva Z.E., Borisov I.V. Prebreeding studies of spring bread wheat lines, carrying T1BS.1BL-1S#F7L-1BL translocation with *Lr51* gene. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = *Vavilov J Genet Breed*. 2026;30(6):854-862. doi 10.18699/vjgb-26-87

Введение

Мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L. em. Thell) – одна из основных продовольственных культур. На долю пшеницы приходится свыше 27 % общего мирового производства зерна. Интенсивная селекция на повышение продуктивности этой культуры значительно обедняет ее генофонд по генам устойчивости к болезням и вредителям. Уязвимость (восприимчивость) сортов мягкой пшеницы к болезням приводит к огромным потерям урожая зерна и снижению его качества. Так, средние потери от листовой ржавчины в России и странах Зарубежья составляют 4–6 %, а в условиях эпифитотии этого патогена потери в урожае зерна могут достигать 50–70 % (Дымченко и др., 1990). В последние десятилетия для зоны Нижнего и Среднего Поволжья России отмечается повышение вредоносности спектра болезней мягкой пшеницы. В 2016 г. наблюдалась сильная эпифитотия стеблевой ржавчины, в 2017 г. сильная эпифитотия листовой ржавчины и септориоза листьев, в 2019 г. сильная эпифитотия желтой пятнистости листьев, в 2020 г. локальная, но сильная эпифитотия стеблевой ржавчины, в 2025 г. одновременные средние эпифитотии желтой и листовой ржавчины, мучнистой росы и желтой пятнистости. Таким образом, происходит постоянный прессинг на растения мягкой пшеницы грибных болезней, и значение повышения урожайности возделываемых растений за счет устойчивости к биотическим факторам, в число которых входит большая группа фитопатогенов, резко возрастает. Во избежание экономически значимых потерь от болезней мягкой пшеницы, в том числе и к видам ржавчин, необходима постоянная научно обоснованная селекция на устойчивость к патогенам. Эта работа должна быть основана на знании биологии патогена, его вирулентности, генетики устойчивости возделываемых сортов культурных растений и достаточном количестве и разнообразии генов устойчивости к патогенам, т.е. она должна быть опережающей (McIntosh, Brown, 1997). Наиболее трудно решаемой задачей является расширение

генетического разнообразия генов резистентности к патогенам. Так, в исследовании О.А. Барановой (2020) на наборе из 32 новых сортов мягкой пшеницы, занесенных в Государственный реестр селекционных достижений РФ за 2017–2018 гг., отмечено, что высокой эффективностью против возбудителя стеблевой ржавчины обладают лишь 11 сортов. Из них семь сортов защищены одним *Sr31* геном, три сорта комбинацией *Sr31*+*Sr57* и один сорт *Sr31*+*Sr28*. В работе Е.И. Гулятьевой и ее коллег (2025) на наборе 28 сортов озимой и 16 сортов яровой мягкой пшеницы, допущенных к использованию в 2024 г., установлено, что семь сортов озимой и пять сортов яровой мягкой пшеницы устойчивы к возбудителю листовой ржавчины, т.е. 25 и 37 % соответственно. Однако к возбудителю желтой ржавчины устойчив лишь один сорт озимой мягкой пшеницы.

В настоящее время эффективная устойчивость к патогенам у основной массы сортов пшеницы обусловлена не собственными генами резистентности, а наличием генов устойчивости интрогрессированных от диких и культурных сородичей мягкой пшеницы. Особо следует выделить вид *Aegilops speltoides* Tausch $2n = 14$, геном S (Schneider et al., 2008). Известно о 12 идентифицированных генах, перенесенных из данного вида, из них шесть генов устойчивости к листовой ржавчине (*Lr28*, *Lr35*, *Lr36*, *Lr47*, *Lr51*, *Lr66*), три к стеблевой ржавчине (*Sr32*, *Sr39*, *Sr47*) и три к мучнистой росе (*Pm12*, *Pm32*, *Pm53*) (grainsgenes.org/GG3/wgc, дата обращения 11 февраля 2026 г.). I.G. Adonina с коллегами (2012) идентифицировали транслокацию T5BS.5BL-5SL от *Ae. speltoides*, которая несет эффективный ген устойчивости к листовой ржавчине, обозначенный как *LrASP5*. Среди идентифицированных генов следует отметить ген *Lr51* (лабораторное обозначение *LrF7*), полученный от скрещивания сорта мягкой пшеницы Неерава с *Ae. speltoides* источник F, затем было проведено шесть беккроссов на сорт Неерава и получена высокоустойчивая к возбудителю листовой ржавчины линия F7 (Dvorak,

1977). У этой линии была локализована транслокация из хромосомы 1S *Ae. speltoides* в хромосому 1BL сорта Neerawa – T1BS.1BL-1S#F7L-1BL (Dvorak, Knott, 1980). В дальнейшем у одной производной линии от F7, F-7-3, была установлена интеркалярная транслокация от 1S в 1BL размером от 14 до 32 сМ, включающая локусы *XAg7* и *Xmwg710* (Helguera et al., 2005). Ген устойчивости к возбудителю листовой ржавчины *Lr51* полудоминантный и высокоэффективный как в России (Gulyaeva et al., 2024; Гульяева и др., 2025), так и за рубежом, в частности в США (Helguera et al., 2005). Несмотря на эффективность устойчивости, этот ген редко используют в коммерческих сортах мягкой пшеницы. Из доступных нам источников известно о десяти египетских сортах мягкой пшеницы, у которых идентифицирован ген *Lr51* (Abdelbacki et al., 2015). Среди российских сортов этот ген не идентифицирован (Gulyaeva et al., 2024). В Национальном центре зерна имени П.П. Лукьяненко (НЦЗ им. П.П. Лукьяненко) получен ряд линий с комбинациями *Lr51* с генами *Lr*: *Lr10*, *Lr26*, *Lr28*, *Lr34*, *Lr35*, *Lr50*. Количество генов *Lr* в комбинациях колебалось от двух до пяти (Давоян, 2022). Причины редкого использования транслокации с *Lr51* не ясны. Есть предположение, что эта транслокация может отрицательно влиять на агрономически ценные признаки и в целом снижать продуктивность (Helguera et al., 2005). Однако данных о пребридинговых исследованиях транслокации T1BS.1BL-1S#F7L-1BL нет, информация о влиянии этой транслокации на продуктивность зерна и качественные показатели муки и хлеба отсутствуют. Цель исследования – по результатам трехлетнего исследования линий-аналогов яровой мягкой пшеницы с T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокацией изучить влияние транслокации на цитологическую стабильность, агрономически важные признаки, продуктивность зерна и качество муки и хлеба.

Материал и методы

Используемый материал включал следующие образцы.

Сорт яровой мягкой пшеницы Саратовская 68, который относится к разновидности эритроспермум, ценный по качеству, устойчивый к засухе, восприимчивый к возбудителям листовой и стеблевой ржавчины, содержит неэффективный к возбудителю листовой ржавчины ген *Lr10* (Гульяева и др., 2020).

Сорт яровой мягкой пшеницы Саратовская 76 – стандарт, принятый Госкомиссией Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений по Саратовской области.

Л6 и Л7 – линии-аналоги яровой мягкой пшеницы сорта Саратовская 68. Родословная: Саратовская 68 / F-7-3 *3// Саратовская 68. Линии-аналоги получены после скрещивания с линией F-7-3 и тройного беккроссирования с сортом Саратовская 68, где родословная почти изогенной линии F-7-3 = Neerawa*6/*Triticum speltoides*, содержит транслокацию T1BS.1BL-1S#F7L-1BL с геном *Lr51*. Линия F-7-3 была любезно предоставлена доктором биологических наук Е.И. Гульяевой (ВИЗР, Санкт-Петербург, Пушкино). Данные линии относятся к разновидности

эритроспермум, высокоустойчивы к возбудителю листовой ржавчины.

Цитогенетические исследования. Цитологическую стабильность оценивали при изучении поведения хромосом в микроспорогенезе в мейозе. Стадии мейоза в микроспорогенезе изучали на временных давленных препаратах пыльников. Колосья линий Л6 и Л7 срезали до выхода из листовой оболочки и фиксировали в смеси 96 % этанола и ледяной уксусной кислоты (3 : 1). Через сутки после фиксации материал переносили в 70 % этиловый спирт, где он хранился до проведения анализа при $t = +2-4$ °С. В качестве красителя использовали реактив Шиффа. Для каждой линии проанализированы 100–200 микроспороцитов стадий мейоза (метафаза I и II, анафаза I и II, телофаза I и II, тетрады). Слайды проанализированы на микроскопе Axio Scope A 1 (Carl Zeiss) с объективами N-ACHROPLAN 40x/0,65 и N-ACHROPLAN 100x/1,25 0;1.

Фитопатологический анализ. В полевых условиях устойчивость к возбудителю листовой ржавчины оценивали по шкале Mains, Jackson (1926), где: 0 – отсутствие симптомов; 0; – некрозы без пустул; 1 – очень мелкие пустулы, окруженные некрозом; 2 – пустулы среднего размера, окруженные некрозом или хлорозом; 3 – пустулы среднего размера без некроза; 4 – крупные пустулы без некроза; X – пустулы на одном и том же листе разных типов, присутствуют хлорозы и некрозы. Растения, поражение которых составляло 0–2 балла, относили к устойчивым (R), а 3, 4 и X (S) – к восприимчивым. Степень поражения ржавчиной (%) оценена по шкале, предложенной в работе (Peterson et al., 1948).

Для лабораторной оценки использовали сборные саратовские популяции *Puccinia triticina* с искусственно увеличенным присутствием патотипа *pp19*, вирулентного к гену *Lr19*. Проростки (фаза трех листьев), выращенные в сосудах с почвой, опрыскивали водной суспензией спор популяции с добавлением детергента Твин 80. Концентрация суспензии составляла 1 мг инокулюма на 1 мл воды. После заражения растений создавали темновую стадию на 20 ч со 100 % относительной влажностью, затем выращивали проростки при температуре 20–22 °С, фотопериод 16 ч день/8 ч ночь. Тип реакции пшеницы на патоген определяли по шкале Mains, Jackson (1926).

Молекулярно-генетический анализ. Для ПЦР-анализа ДНК выделяли из пятидневных проростков пшеницы методом с использованием цетилтриметиламмонийбромида (CTAB) (Murray, Thompson, 1980). Для идентификации гена устойчивости *Lr51* применяли CAPS-маркер для гена AGA7, расположенного в транслокации *Ae. speltoides*, содержащей *Lr51*. Были использованы праймеры S30-13L 5'-GCATCAACAAGATATTCGTTATGACC-3' и AGA7-759R 5'-TGGCTGCTCAGAAAAGTGGACC-3', предложенные в работе (Helguera et al., 2005). Амплификацию проводили на амплификаторах T100 Thermal Cycler (BioRad). Рестрикция – с использованием эндонуклеазы PstI (SibEnzyme). Продукты амплификации разделяли в 2 % агарозном геле, окрашенном бромистым этидием. Положительным контролем служила почти изогенная линия F-7-3, а негативным контролем – сорт-реципиент

Таблица 1. Гидротермические коэффициенты по метеостанции г. Саратов (ФАНЦ Юго-Востока) за 2023–2025 гг.

Метеостанция (ФАНЦ Юго-Востока, Саратов)	2023 г.				2024 г.				2025 г.		
	V	VI	VII	VIII	IV	V	VI	VII	V	VI	VII
Гидротермический коэффициент	0.8	1.1	0.6	0.4	0.3	0.2	0.8	0.1	1.1	0.8	0.5

Примечание. IV – апрель, V – май, VI – июнь, VII – июль, VIII – август.

Саратовская 68. В качестве маркера молекулярного веса применяли GeneRuler™ 100bp DNA Ladder («Евроген»). ПЦР ставили в двух повторностях.

Продуктивность зерна, физические и хлебопекарные свойства теста и хлеба у линий Л6, Л7 и сорта-стандарта Саратовская 76 оценивали в 2023–2025 гг. Экспериментальный материал рандомизированно высевался на делянках площадью 7 м² в трехкратной повторности на экспериментальном поле «ФАНЦ Юго-Востока» (Саратов). Норма высева 400 зерен на 1 м². Кроме фенологических наблюдений и прямой оценки урожайности зерна, исследовали элементы продуктивности главного колоса: длину колоса, количество колосков и зерен, вес зерна с колоса, плотность колоса, озерненность колоска (как обобщенный показатель фертильности), которые определяли у 15 колосьев изучаемых линий и сорта-стандарта. Качество муки и хлеба оценивали по содержанию сырой клейковины, крепость которой определяли на измерителе деформации клейковины (ИДК-3М), а также по показателям альвеографа Шопена (Chopin Technologies) с выпечкой опытных образцов хлебцев. Содержание белка в зерне урожаев 2023–2025 гг. определяли на анализаторе зерна Foss Infratec TM 1241 (Foss Analytical A/S).

Метеорологическая характеристика лет выращивания по гидротермическому коэффициенту (ГТК) Селянинова (www.agrometeo.online/articles/gtk.htm, дата обращения 26 января 2026) по месяцам вегетационного периода приведена в табл. 1. Из трех лет исследований по метеоусловиям наиболее благоприятными были 2023 и 2025 гг. Во все три года исследований наблюдались эпифитотии листовой ржавчины, наибольшее развитие патогена отмечено в вегетационные сезоны 2023 и 2025 гг.

Полученные данные по линиям Л6 и Л7, сорту-реципиенту и сорту-стандарту Саратовская 76 подвергли одно-

факторному дисперсионному анализу со множественными сравнениями по Дункану с использованием пакета селекционно-генетических программ «Agros-2.10».

Результаты

Цитологическая стабильность линий Л6 и Л7

Для оценки стабильности мейоза используют интегральный показатель – мейотический индекс, который представляет собой отношение (в %) нормальных тетрад к общему числу изученных клеток. В ходе исследований установлено: у Л6 мейотический индекс равен 98,2 %, у Л7 – 99,0 %, в то время как у сорта-реципиента Саратовская 68 – 98,8 %, т. е. между линиями и реципиентом по этому показателю не было различий. При мейотическом индексе 90 % и выше растение считается цитологически стабильным, т. е. обе исследуемые линии стабильны. В более ранних стадиях мейоза у обеих линий выявлены две хромосомы, не включенные в ядра в телофазе 1 в количестве 0,07 %. Среди одноядерной пыльцы у Л6 и Л7 обнаружена микропыльца: у Л6 и Л7 – 0,02 %, у Саратовской 68 – 0,01 %.

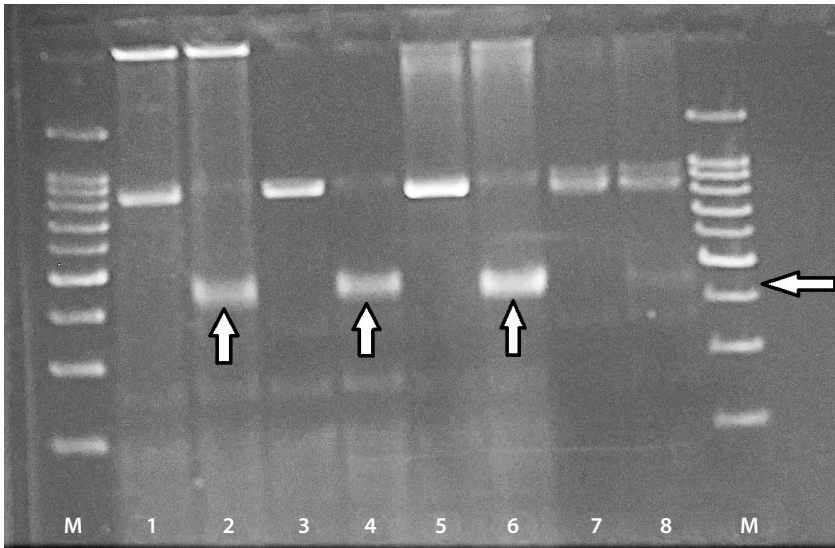
Фитопатологический анализ линий Л6 и Л7 на устойчивость к возбудителю листовой ржавчины. Идентификация гена устойчивости к возбудителю листовой ржавчины *Lr51* с использованием ДНК маркеров S30-13L и AGA7-759R

Линии Л6 и Л7 показали высокую устойчивость к *P. tritici* в 2023–2025 гг. как при искусственном заражении, так и при естественных эпифитотиях патогена (табл. 2). Учитывая, что при искусственном заражении *P. tritici* стадия растений была три листа, а при оценках в полевых условиях – молочная или молочно-восковая спелость, можно говорить о ювенильном характере действия гена устой-

Таблица 2. Характеристика линий яровой мягкой пшеницы Л6 и Л7, сорта-реципиента Саратовская 68 и сорта-стандарта Саратовская 76 по устойчивости к *P. tritici* в лаборатории (искусственное заражение) и поле (естественные эпифитотии)

Сорт, линия	Тип реакции на <i>P. tritici</i>					
	в лаборатории (искусственное заражение)			в поле (естественные эпифитотии)		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025
Саратовская 68	3	3	3	3/20	3/10	3/5
Л6	0;	0; 1	0; 1	0; 1	0;	0;
Л7	0;	0; 1	0; 1	0; 1	0;	0;
Саратовская 76	3	3	3	3/20	3/10	3/5

Примечание. Лабораторная оценка в стадии трех листьев. При естественных эпифитотиях *P. tritici* оценка проводилась на экспериментальном поле ФАНЦ Юго-Востока (Саратов).



Электрофореграмма продуктов амплификации и рестрикции с использованием праймеров S30-13L и AGA7-759R, диагностирующих ген *Lr51*.

М – маркер длин ДНК, 100 п.н. (Евроген). Продукт амплификации с маркером размером 819 п.н. определен у линии F-7-3 *Lr51* (1) и у линий-аналогов Л6 (3), Л7 (5). Дорожки 2, 4, 6 – продукты рестрикции PstI ампликонов соответственно F-7-3 *Lr51*, Л6 и Л7. Дорожка 7 – сорт-реципиент Саратовская 68. Дорожка 8 – продукт рестрикции PstI ампликона сорта-реципиента Саратовская 68. Стрелками указано положение диагностических фрагментов – продуктов рестрикции ампликонов маркера размером 422 + 397 п.н.

чивости у линий Л6 и Л7. Сорт-реципиент Саратовская 68 и сорт-стандарт Саратовская 76 были восприимчивы к возбудителю листовой ржавчины. Результаты идентификации гена *Lr51* / ПЦР анализом с использованием ДНК маркеров S30-13L и AGA7-759R в анализируемых линиях Л6 и Л7 показали его присутствие (см. рисунок).

Фенология и показатели продуктивности зерна, физических и хлебопекарных свойств теста и хлеба у линий Л6 и Л7, сорта-реципиента Саратовская 68 и сорта-стандарта Саратовская 76

В табл. 3 приведены показатели периода всходы–колошение, высоты растений, устойчивости к полеганию в вегетационные сезоны в 2023–2025 гг. у Л6, Л7 и сортов – реципиента и стандарта. За вегетационные сезоны 2023–2025 гг. период всходы–колошение у линий Л6 и Л7 и

сортос Саратовская 68 и Саратовская 76 практически одинаков и различия были не значимы. Таким образом, транслокация T1BS.1BL-1S#F7L-1BL почти не влияет на период всходы–колошение. По высоте растений в 2023 и 2025 гг. линии Л6 и Л7 незначимо различались с сортами Саратовская 68 и Саратовская 76, но в 2024 г. линия Л6 значимо превзошла оба сорта, а в 2025 г. различия были между линиями: Л7 превысила Л6. В среднем за период 2023–2025 гг. по высоте растений различий между сортами (Саратовская 68 – 86 см, Саратовская 76 – 85 см) и линиями (Л6 – 88 см, Л7 – 89 см), а также линиями между собой не было. Таким образом, транслокация T1BS.1BL-1S#F7L-1BL в сорте Саратовская 68 не привела к значимому изменению высоты растений. Высота растений влияет на устойчивость растений к полеганию. В наших исследованиях Л7 по этому признаку значимо уступила обоим

Таблица 3. Период всходы–колошение, высота растений, устойчивость к полеганию у Л6, Л7 и сортов Саратовская 68 и Саратовская 76 за вегетационные сезоны 2023–2025 гг.

Сорт, линия	Период всходы–колошение, дни			Высота растений, см			Устойчивость к полеганию, балл		
	2023	2024	2025	2023	2024	2025	2023	2024	2025
Саратовская 68 rec	47	41	45	89.7	68.3	100.0	3.7	4.1	4.1
Л6	47	41	44	89.0	75.5	99.0	3.6	4.1	4.2
Л7	47	41	45	91.2	73.0	104.0	3.0	4.0	4.2
НСР _{0.5} *	NS	NS	NS	NS	5.0	4.0	0.5	NS	NS
Саратовская 76 st	47	41	45	90.0	66.0	100.0	3.6	4.3	4.0
НСР _{0.5} **	NS	NS	NS	NS	5.2	4.0	0.5	0.2	NS

Примечание. Наименьшая существенная разница для 5 % уровня значимости между Л6, Л7 и: * Саратовской 68, ** Саратовской 76. NS здесь и в табл. 4–6 – различия отсутствуют.

Таблица 4. Урожайность и масса 1000 зерен у линий яровой мягкой пшеницы Л6, Л7 и сортов Саратовская 68, Саратовская 76 за вегетационные сезоны 2023–2025 гг.

Сорт, линия	Масса 1000 зерен, г				Урожайность зерна, т/га			
	2023	2024	2025	среднее	2023	2024	2025	среднее
Саратовская 68	36.1	32.7	35.5	34.8	3.142	2.238	3.551	2.977
Л6	37.0	36.3	34.6	36.0	2.990	2.713	3.250	2.984
Л7	37.8	33.6	32.1	34.5	3.244	2.596	3.427	3.022
НСР _{0.5} *	NS	3.1	3.0	NS	NS	NS	NS	NS
Саратовская 76	38.6	35.4	35.9	36.6	2.776	2.042	3.492	2.770
НСР _{0.5} **	NS	NS	3.0	NS	NS	0.501	NS	NS

Примечание. Наименьшая существенная разница для 5 % уровня значимости между Л6, Л7 и: * Саратовской 68, ** Саратовской 76.

Таблица 5. Показатели элементов продуктивности главного колоса у линий яровой мягкой пшеницы Л6, Л7, сорта-реципиента Саратовская 68 и сорта-стандарта Саратовская 76 в среднем за вегетационные сезоны 2023–2025 гг.

Сорт, линия	Длина колоса, мм	Количество, шт.		Плотность колоса	Вес зерна с колоса, г	Озерненность колоска, шт.
		колосков	зерен с колоса			
Л6						
Саратовская 68	85.97	16.97	42.70	1.87	1.63	2.52
Л6	81.53	16.43	40.40	1.90	1.50	2.46
НСР _{0.5} *	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Саратовская 76	91.37	16.60	40.30	1.70	1.42	2.40
НСР _{0.5} **	NS	NS	NS	0.176	NS	NS
Л7						
Саратовская 68	85.97	16.97	42.70	1.87	1.63	2.52
Л7	85.63	17.27	44.67	1.90	1.73	2.58
НСР _{0.5} *	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Саратовская 76	91.37	16.60	40.3	1.70	1.42	2.40
НСР _{0.5} **	NS	NS	NS	0.076	0.252	0.152
Л6 и Л7						
Л6	81.53	16.43	40.4	1.90	1.50	2.46
Л7	85.63	17.27	44.67	1.90	1.73	2.58
НСР _{0.5}	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Примечание. Наименьшая существенная разница для 5 % уровня значимости между линией и: * сортом-реципиентом Саратовская 68; ** сортом-стандартом Саратовская 76.

сортам и Л6 в вегетационном сезоне 2023 г. В 2024 г. Л7 уступила сорту Саратовская 76. В 2025 г. различий между линиями и сортами не было. В среднем за период 2023–2025 гг. по устойчивости к полеганию различий между сортами (Саратовская 68 – 4.0 и Саратовская 76 – 4.0) и линиями (Л6 – 4.0 и Л7 – 3.7) и линиями между собой не было. Тем не менее наблюдается снижение устойчивости к полеганию у Л7. Сравнение Л6 и Л7 по продуктивности зерна и ее элементов у главного колоса позволило выявить влияние транслокации T1BS.1BL-1S#F7L-1BL на эти признаки (табл. 4 и 5).

Установлено, что наличие транслокации T1BS.1BL-1S#F7L-1BL как у Л6, так и у Л7 в годы исследований незначимо влияло на урожайность зерна по сравнению с реципиентом Саратовская 68 (см. табл. 4). Однако на-

блюдались различия по сравнению с стандартом Саратовская 76 в вегетационный сезон 2024 г., сорт значимо уступил обеим линиям (см. табл. 4). По данным ГТК, в вегетационный сезон 2024 г. наблюдалась засуха от сильной до слабой степени (см. табл. 1). Таким образом, есть основания предположить, что Л6 и Л7 с T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокацией более засухоустойчивы, чем стандарт Саратовская 76, но одного уровня с сортом-реципиентом Саратовская 68. Одним из факторов, который влияет на продуктивность зерна, является масса 1000 зерен. В среднем за период 2023–2025 гг. не было значимых различий по этому признаку между линиями Л6, Л7 и сортами Саратовская 68 и Саратовская 76, но были различия по отдельным годам. Л6 превзошла по массе 1000 зерен сорт-реципиент Саратовская 68 в 2024 г., а Л7 уступила и Сара-

Таблица 6. Показатели качества муки и хлеба у линий яровой мягкой пшеницы Л6, Л7, сорта-реципиента Саратовская 68 и сорта-стандарта Саратовская 76 в среднем за вегетационные сезоны 2023–2025 гг.

Сорт, линия	Содержание в зерне			Показатели альвеографа		Показатели оценки хлеба			
	белка, %	клейковины %	ИДК 3, ед. п.	упругость теста Р, мм	отношение упругости теста к растяжимости P/L	сила муки W, ед. а.	объем хлеба V, мл	пористость, балл	цвет мякиша
Саратовская 68	16.1	30.23	69.4	71.0	0.81	301	712	4.8	Белый
Л6	16.6	31.07	63.9	84.9	1.00	333	597	3.8	
Л7	16.3	31.63	65.5	74.5	0.91	320	602	4.3	
НСР _{0.5} *	NS	NS	NS	9.1	NS	NS	94	0.5	–
Саратовская 76	16.3	31.1	73.9	98.0	1.57	270	707	4.5	Белый
НСР _{0.5} **	NS	NS	6.1	10.1	0.6	35	96	NS	–

Примечание. Наименьшая существенная разница для 5 % уровня значимости между Л6, Л7 и: * сортом-реципиентом Саратовская 68; ** сортом-стандартом Саратовская 76.

товской 68, и Саратовской 76 в 2025 г. (см. табл. 4). Анализ элементов продуктивности главного колоса выявил, что Л6 и Л7 с T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокацией по всем показателям значимо не отличались от сорта-реципиента Саратовская 68. Таким образом, есть основание оценить влияние T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокации на параметры продуктивности главного колоса как нейтральное. Однако выявлены значимые различия между сортом-стандартом Саратовская 76 по плотности колоса как у Л6, так и у Л7. Кроме того, Л7 значимо превысила сорт-стандарт по весу зерна с колоса и озерненности колоска. Между собой линии Л6 и Л7 по элементам продуктивности главного колоса значимо не различались (см. табл. 5).

По качеству муки и хлеба у изучаемых линий получены следующие результаты. По содержанию белка в зерне Л6 и Л7 значимо не отличались ни от сорта-реципиента, ни от сорта-стандарта. Так же не обнаружены значимые различия по содержанию и крепости клейковины по сравнению с сортом-реципиентом Саратовская 68. Однако клейковина у линий Л6 и Л7 по показателям прибора ИДК-3М была более крепкой по сравнению с сортом-стандартом Саратовской 76 (табл. 6).

По данным альвеографа, у Л6 значимо более высокая упругость теста (Р) по сравнению с сортом-реципиентом и линией Л7, но Л7 по этому показателю не отличалась от Саратовской 68. По отношению упругости к растяжимости (P/L) и силе муки (W) линии Л6 и Л7 значимо не отличались от сорта-реципиента, однако достоверно снизили объем хлеба, а Л6 и оценку пористости хлеба. Сравнение линий Л6, Л7 и сорта Саратовская 76 по данным альвеографа и показателям хлебопекарной оценки выявило больше различий. По упругости обе линии уступили сорту-стандарту, по отношению упругости к растяжимости Л6 не отличалась, но Л7 имела более низкие значения. По силе муки обе линии значимо превысили сорт Саратовская 76, но имели достоверно более низкий объем хлеба, и по пористости мякиша различий не было. Транслокация T1BS.1BL-1S#F7L-1BL у линий Л6 и Л7 не изменила цвет мякиша хлеба, обе линии, как и сорт-реципиент, и сорт-стандарт, имели мякиш белого цвета (см. табл. 6).

Обсуждение

Дикие родственники мягкой пшеницы обладают многими генами, представляющими агрономический интерес, и могут быть ценными источниками устойчивости к болезням, насекомым и экстремальным факторам окружающей среды. В первую очередь это касается видов близко родственных мягкой пшенице, к которым относится *Ae. speltooides* Tausch $2n = 14$, геном S. Этот вид принадлежит к вторичному генпулу мягкой пшеницы (Shneider et al., 2008). В целом вид привлекает своим иммунитетом к ряду заболеваний и большей способностью к рекомбинагенозу с хромосомами мягкой пшеницы. Повышенная способность к рекомбинагенозу обусловлена как близостью S и V геномов, так и наличием в S геноме генов супрессоров системы генов парной конъюгации (*Ph*) и допускающих синапсис гомеологичных хромосом. Как уже отмечено выше, в Каталоге генных символов пшеницы зарегистрировано 12 генов, перенесенных из этого вида, из них шесть генов устойчивости к листовой ржавчине, три к стеблевой ржавчине и три к мучнистой росе (grainsgenes.org/GG3/wgc, дата обращения 11 февраля 2026 г.). В процесс рекомбинагеноза с хромосомами мягкой пшеницы были вовлечены 1S, 2S, 3S, 5S, 6S и 7S хромосомы *Ae. speltooides*. Большая часть перенесенных генов устойчивости к патогенам от этого вида включала участки 2S хромосомы (*Lr35*, *Sr32*, *Sr39*, *Sr47*). От остальных хромосом *Ae. speltooides* было один–два переноса с генами устойчивости. Из хромосомы 1S были перенесены транслокации в 1В хромосому: 1BL.1SS (*Pm32*) и 1BS.1BL-1S#F7L-1BL (*Lr51*). Таким образом, в обмены были вовлечены оба плеча хромосомы 1S (grainsgenes.org/GG3/wgc, дата обращения 11 февраля 2026 г.).

В наших исследованиях на основе линий-аналогов яровой мягкой пшеницы сорта Саратовская 68 с транслокацией 1BS.1BL-1S#F7L-1BL с геном *Lr51* изучалась цитологическая стабильность, определялись влияние на морфо-биологические и фенологические признаки, эффективность защиты против возбудителя листовой ржавчины, а также продуктивность зерна и показатели качества муки и хлеба. К сожалению, из доступных нам источников не

удалось найти сообщения о подобных исследованиях. В связи с этим сравнение результатов наших исследований с результатами других работ невозможны.

Одним из факторов, ограничивающим практическое применение интрогрессивных линий, является их нестабильность, ведущая к быстрой потере чужеродного генетического материала. В основе этой нестабильности лежат нарушения мейотического цикла гибридных растений, вызывающие формирование нефункциональных гамет (Орловская и др., 2015). Большой стабильностью отличаются линии с чужеродными транслокациями, полученные методом индуцированных гомеологичных обменов или спонтанных обменов между хромосомами чужого вида и хромосомами мягкой пшеницы (Sears, 1972; Friebe et al., 2000). Используемая нами транслокация T1BS.1BL-1S#F7L-1BL с геном *Lr51* в исходной линии F-7-3 получена в ходе скрещиваний (беккроссирования) сорта Neerawa с *Ae. speltoides* источник F, т. е. имеются основания предполагать гомеологичный обмен хромосомы эгилопса и мягкой пшеницы. Известно, что сам вид *Ae. speltoides* несет как гены/ген, подавляющие действие генов *Ph* (парной конъюгации), так и гаметоцидные гены, которые влияют на микроспорогенез и жизнеспособность пыльцы, но локализация этих генов не затрагивает 1S хромосому (grainsgenes.org/GG3/wgc, дата обращения 11 февраля 2026 г.). В связи с этим были основания ожидать у линий Л6 и Л7 незначительные нарушения цитологической стабильности по сравнению с сортом-реципиентом Саратовская 68. В результате нашего изучения цитологической стабильности у линий Л6 и Л7 определен мейотический индекс 98.2 и 99.0 % соответственно, а у сорта-реципиента Саратовская 68 – 98.8 %. Таким образом, линии Л6 и Л7 цитологически стабильны.

Ген *Lr51* был высокоэффективен против саратовских популяций *P. triticina* в вегетационные сезоны 2023–2025 гг., что совпадает с данными Е.И. Гульяевой о эффективности этого гена в РФ (Gulyaeva et al., 2024). Наличие транслокации T1BS.1BL-1S#F7L-1BL у Л6 и Л7 незначимо влияло на высоту растений и устойчивость к полеганию как по сравнению с сортом-реципиентом Саратовская 68, так и со стандартом Саратовская 76. Однако следует отметить снижение устойчивости к полеганию у Л7 в вегетационные сезоны 2023 и 2024 гг. У линий-аналогов Саратовской 68 продолжительность периода всходы–колошение была на уровне сорта-реципиента и сорта-стандарта. По продуктивности зерна у линий с транслокацией T1BS.1BL-1S#F7L-1BL не было значимых различий с сортом-реципиентом как по отдельным годам, так и в среднем за период 2023–2025 гг. Однако по сравнению с сортом-стандартом Саратовская 76 линии Л6 и Л7 значимо превосходили Саратовскую 76 в 2024 г., но не было различий в 2023 и 2025 г. и в среднем за период 2023–2025 гг. Подробный анализ структуры продуктивности главного колоса в среднем за 2023–2025 гг. у линий с транслокацией T1BS.1BL-1S#F7L-1BL выявил отсутствие различий с сортом-реципиентом Саратовская 68 по всем показателям. Тем не менее по сравнению с сортом-стандартом Саратовская 76 были значимые различия в пользу линий с транслокацией по

плотности колоса, а у Л7 также по весу зерна с колоса и озерненности колоска. Наличие транслокации T1BS.1BL-1S#F7L-1BL у Л6 и Л7 незначимо повлияло на содержание белка, а также показатели муки и хлеба, кроме объема и пористости хлеба. Обе линии уступили сорту-реципиенту. По сравнению с сортом-стандартом Саратовская 76, результаты были неоднозначные. Линии с транслокацией уступили Саратовской 76 по упругости, отношению упругости к растяжимости (P/L), объему хлеба, но превосходили по силе муки (W). Исходя из вышеизложенных результатов предположение М. Helguera с коллегами (2005) о негативном влиянии транслокации с *Lr51* геном, связанные с ее большими размерами, не подтверждается. Тем не менее возможно взаимодействие T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокации с генотипами-реципиентами, что изменит влияние на хозяйственно ценные признаки. Различные эффекты наблюдались у почти изогенных линий яровой мягкой пшеницы с 7DL-7Ae#1L-7Ae#1S транслокацией с геном *Lr29* на сортах Саратовская 68 и Саратовская 70 (Sibikeev et al., 2022).

Заключение

В целом по цитологической стабильности и всему комплексу селекционно ценных показателей влияние T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокации в генотипе сорта Саратовская 68 оценивается как нейтральное. Более того, эта транслокация не снизила продуктивность зерна в засушливых условиях 2024 г., т. е. ее присутствие не понижает засухоустойчивость. Сравнение с сортом-стандартом Саратовская 76 выявило достаточную селекционную значимость Л6 и Л7 с T1BS.1BL-1S#F7L-1BL транслокацией в генотипе Саратовской 68.

Список литературы / References

- Баранова О.А. Молекулярная идентификация генов устойчивости к стеблевой ржавчине у новых допущенных к использованию сортов пшеницы. *Вестник защиты растений*. 2020;103(2):113-118. doi 10.31993/2308-6459-2020-103-2-4936
- [Baranova O.A. Molecular identification of stem rust resistance genes in new regional wheat varieties. *Plant Protection News*. 2020; 103(2):113-118. doi 10.31993/2308-6469-2020-103-2-4936 (in Russian)]
- Гульяева Е.И., Сибикеев С.Н., Дружин А.Е., Шайдаюк Е.Л. Расширение генетического разнообразия сортов яровой мягкой пшеницы по устойчивости к бурой ржавчине (*Puccinia triticina* Eriks.) в Нижнем Поволжье. *Сельскохозяйственная биология*. 2020; 55(1):27-44. doi 10.15389/agrobiology.2020.1.27rus
- [Gulyaeva E.I., Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Shaydayuk E.L. Enlargement of genetic diversity of spring bread wheat resistance to leaf rust (*Puccinia triticina* Eriks.) in Lower Volga region. *Agric Biol*. 2020;55(1):27-44. doi 10.15389/agrobiology.2020.1.27rus (in Russian)]
- Гульяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Зуев Е.В. Потенциал современных российских сортов озимой и яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) для генетической защиты от бурой и желтой ржавчины. *Сельскохозяйственная биология*. 2025;60(3):485-502. doi 10.15389/agrobiology.2025.3.485rus
- [Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Zuev E.V. The potential of modern Russian winter and spring wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties for genetic protection against leaf and yellow rust. *Agric Biol*. 2025;60(3):485-502. doi 10.15389/agrobiology.2025.3.485rus (in Russian)]

- Давоян Э.Р. Создание нового, генетически разнообразного исходного материала для селекции мягкой пшеницы на основе методов хромосомной инженерии и ДНК-маркирования: Диссертация ... д-ра биол. наук. Краснодар, 2022
[Davoyan E.R. Creation of a new, genetically diverse source material for breeding bread wheat based on methods of chromosomal engineering and DNA labeling: Dissertation for the degree of Doctor of Biological Sciences. Krasnodar, 2022 (in Russian)]
- Дымченко А.М., Назарова Л.Н., Жемчужина А.И. Перспективные и районированные сорта озимой пшеницы с разной устойчивостью к бурой ржавчине. *Селекция и семеноводство*. 1990;(5):16-18
[Dymchenko A.M., Nazarova L.N., Zhemchuzhina A.I. Promising and zoned varieties of winter wheat with different resistance to brown rust. *Seleksiya i Semenovodstvo*. 1990;(5):16-18 (in Russian)]
- Орловская О.А., Леонова И.Н., Адонина И.Г., Салина Е.А., Хотылева Л.В., Шумный В.К. Молекулярно-цитогенетический анализ линий тритикале и пшеницы с интрогрессиями генетического материала видов трибы Triticeae. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2015;19(5):552-560. doi 10.18699/VJ15.072
[Orlovskaya O.A., Leonova I.N., Adonina I.G., Salina E.A., Khotyleva L.V., Shumny V.K. Molecular-cytogenetic analysis of triticale and wheat lines with introgressions of the tribe Triticeae species genetic material. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii* = *Vavilov J Genet Breed*. 2015;19(5):552-560. doi 10.18699/VJ15.072 (in Russian)]
- Abdelbacki A.M.M., Omara R.I., Soliman N.E.K., Najeeb M.A. Molecular markers identification of leaf rust resistant genes Lr19, Lr21, Lr24, Lr47 and Lr51 in selected Egyptian wheat cultivars. *Int J Phytopathol*. 2015;04(02):55-62. doi 10.33687/phytopath.004.02.0873
- Adonina I.G., Petrash N.V., Timonova E.M., Khristov Yu.A., Salina E.A. Construction and study of leaf rust-resistant common wheat lines with translocations of *Aegilops speltoides* Tausch. Genetic material. *Russ J Genet*. 2012;48(4):404-409. doi 10.113/S1022795412020020
- Dvorak J. Transfer of leaf rust resistance from *Aegilops speltoides* to *Triticum aestivum*. *Can J Genet Cytol*. 1977;19:133-141
- Dvorak J., Knott D.R. Chromosome location of two leaf rust resistance genes transferred from *Triticum speltoides* to *T. aestivum*. *Can J Genet Cytol*. 1980;22:381-389
- Friebe B., Raupp W.J., Gill B.S. Wheat – alien translocation lines. *Annu Wheat Newsllett*. 2000;46. Available: <https://graingenes.org/ggpages/awn/46/>
- Gulyaeva E., Shaydayuk E., Shreyder E., Kushnirenko I., Shamanin V. Genetic diversity of promising spring wheat accessions from Russia and Kazakhstan for rust resistance. *Plants*. 2024;13(17):2469. doi 10.3390/plants13172469
- Helguera M., Vanzetti L., Soria M., Khan I.A., Kolmer J., Dubcovsky J. PCR markers for *Triticum speltoides* leaf rust resistance gene *Lr51* and their use to develop isogenic hard red spring wheat lines. *Crop Sci*. 2005;45:728-734. doi 10.2135/cropsci2005.0728
- Mains E.B., Jackson H.S. Physiological specialization in the leaf rust of wheat *Puccinia triticina* Erikss. *Phytopathology*. 1926;16:89-120
- McIntosh R.A., Brown G.N. Anticipatory breeding for resistance to rust diseases in wheat. *Ann Rev Phytopatol*. 1997;35:311-326. doi 10.1146/annurev.phyto.35.1.311
- Murray M.G., Thompson W.F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA. *Nucleic Acids Res*. 1980;8(19):4321-4325. doi 10.1093/nar/8.19.4321
- Peterson R.F., Campbell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Can J Res*. 1948;26(5):496-500. doi 10.1139/cjr48c-033
- Schneider A., Molnar I., Molnar-Lang M. Utilisation of *Aegilops* (goat-grass) species to widen the genetic diversity of cultivated wheat. *Euphytica*. 2008;163:1-19. doi 10.1007/s10681-007-9624-y
- Sears E.R. Chromosome engineering in wheat. In: Stadler Genetical Symposium. New York; London, 1972;4:23-38
- Sibikeev S.N., Gulyaeva E.I., Druzhin A.E., Andreeva L.V. The effect of the 7DL-7Ae#1L·7Ae#1S translocation on the productivity and quality of spring bread wheat grain. *Vavilov J Genet Breed*. 2022;26(6):537-543. doi 10.18699/VJGB-22-65

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.02.2026. После доработки 07.05.2026. Принята к публикации 08.05.2026.