

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНОВ УСТОЙЧИВОСТИ К БУРОЙ РЖАВЧИНЕ У ОБРАЗЦОВ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ РОССИЙСКОЙ И КАЗАХСТАНСКОЙ СЕЛЕКЦИИ

Е.И. Гульятеева<sup>1,\*</sup>, Е.Л. Шайдаюк<sup>1</sup>, А.С. Рсалиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности, Гвардейский, Кордайский район, Жамбылская область, Казахстан

\*ответственный за переписку, e-mail: eigulyaeva@gmail.com

Бурая ржавчина (возбудитель *Puccinia triticina* Erikss.) – вредоносное заболевание яровой мягкой пшеницы в России и Казахстане. Для повышения результативности селекционных программ создана Казахстанско-Сибирская сеть улучшения яровой пшеницы (КАСИБ), в которую вошли ведущие научные учреждения. В рамках программы КАСИБ проводятся комплексные экологические исследования перспективного селекционного материала, в том числе и по устойчивости к бурой ржавчине. Цель данной работы – идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине у перспективного селекционного материала яровой пшеницы с использованием фитопатологического теста и молекулярных маркеров. Материалом исследований служили 47 образцов яровой мягкой пшеницы, включенных в программу исследований КАСИБ в 2019–2020 гг. Для фитопатологического анализа в фазе проростков использовали тест-клоны *P. triticina*, маркированные вирулентностью к генам *Lr9*, *Lr19*, *Lr26*, и географически отдаленные популяции (краснодарскую, дагестанскую и челябинскую) гриба. С помощью молекулярных маркеров проведена идентификация 21 *Lr*-гена. В результате фитопатологической оценки выявлено 11 образцов пшеницы с высоким уровнем проростковой устойчивости. Молекулярный анализ позволил определить идентифицируемые *Lr*-гены у 82% изученных образцов. У высокоустойчивых образцов пшеницы идентифицирован ген *Lr24*, который встречался по отдельности или в сочетании с частично эффективными генами *Lr26* и *Lr9*, а также гены *LrSp* и *Lr6Agi1*, неидентичные известным эффективным, и эффективные сочетания генов: *Lr19+Lr26*; *Lr9+Lr26* и *Lr19+Lr26+Lr41*. Гены устойчивости взрослых растений *Lr34* и *Lr37* выявлены у 8% изученных линий. У восприимчивых в фазе проростков образцов отмечена высокая представленность малоэффективных генов *Lr1*, *Lr3*, *Lr10*. Проведенный скрининг продемонстрировал высокое разнообразие изученной коллекции яровой пшеницы по *Lr*-генам, что указывает на существенный прогресс в селекции пшеницы на устойчивость к бурой ржавчине в России и Казахстане.

**Ключевые слова:** *Triticum aestivum*, *Puccinia triticina*, устойчивость, *Lr*-гены, молекулярные маркеры

Поступила в редакцию: 27.06.2019

Принята к печати: 13.09.2019

### Введение

Бурая ржавчина (возбудитель гриба *Puccinia triticina* Erikss.) – распространенное и значимое заболевание яровой мягкой пшеницы в России и Казахстане (Койшибаев и др., 2017). Использование устойчивых сортов – экологически безопасный способ защиты пшеницы от болезни. В последнее десятилетие наблюдается очевидный прогресс в селекции и создании новых сортов мягкой пшеницы, устойчивых к бурой ржавчине (Тюнин, Шрейдер, 2010; Беспалова и др., 2017). Для эффективной генетической защиты пшеницы важную роль играет разнообразие выращиваемых сортов по типам устойчивости и *Lr*-генам. Проведенный нами анализ показал существенное возрастание в районировании в России числа яровых сортов, устойчивых к бурой ржавчине в 2010–2017 гг., по сравнению с предыдущим периодом (Гульятеева, 2018). Показано, что в Государственном реестре селекционных достижений РФ доля яровых сортов с ювенильной устойчивостью, обусловленной высоко или частично эффективными олигогенами, составляет свыше 20%. Среди известных *Lr*-генов широкое распространение имеют гены *Lr19* и *Lr9*. Большинство сортов с геном *Lr19* сконцентрированы в регионах Поволжья, а с геном *Lr9* на Урале и в Западной Сибири. Наряду с известными генами у российских сортов встречаются гены, не идентичные известным

эффективным, включенным в Каталог генных символов (*Lr6Agi1*, *Lr6Agi2*, *LrSp*) (Сибикеев и др., 2017).

В целях повышения результативности селекционных программ в России и Казахстане в 1999 г. СИММИТом создана Казахстанско-Сибирская сеть улучшения яровой пшеницы (КАСИБ), координируемая Международным центром улучшения кукурузы и пшеницы СИММУТ (Мексика). В нее вошли ведущие научные учреждения России и Казахстана. Программа направлена на решение двух основных задач: 1) мультилокационные испытания сортов и линий яровой пшеницы и отбор лучших образцов для включения в гибридизацию; 2) челночная селекция яровой пшеницы между участниками сети КАСИБ и СИММУТ для выделения адаптивного материала в конкретных почвенно-климатических условиях. Каждое учреждение предоставляет по 2–3 перспективных сорта или линии, которые изучают в различных экологических пунктах в течение двух лет (Потоцкая и др., 2018). Предварительная информация о генетическом контроле образцов яровой пшеницы КАСИБ к бурой ржавчине и представленности *Lr*-генов позволяет уточнить их разнообразие, предсказать устойчивость в полевых условиях и оценить возможное влияние на изменение популяции патогена.

В современный период для идентификации *Lr*-генов используют фитопатологические и молекулярно-генетические методы. Фитопатологический тест с использованием клонов, маркированных определенной вирулентностью, позволяет исключить у исследуемого материала *Lr*-гены, эффективные лишь против части популяции *P. triticina*, а в случае редкой встречаемости клонов, вирулентных или авирулентных к исследуемым образцам, – постулировать наличие генов устойчивости (Радченко, Одинцова, 2008). С середины 90-х годов XX в. традиционные методы идентификации *Lr*-генов были дополнены молекулярными. Молекулярные маркеры значительно облегчают проведение первичного скрининга материала и позволяют

провести идентификацию *Lr*-генов как по отдельности, так и в различных сочетаниях. К настоящему времени с использованием молекулярных маркеров возможно провести идентификацию свыше 20 *Lr*-генов. Большинство из этих генов широко используются в селекции на устойчивость к бурой ржавчине. Комплексное использование фитопатологических и молекулярных подходов позволяет с высокой достоверностью охарактеризовать генетическую детерминацию устойчивости изучаемого материала.

Цель данных исследований – идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине у нового материала яровой пшеницы КАСИБ с использованием фитопатологического теста и молекулярных маркеров.

### Материалы и методы

Материалом исследований служили 47 сортов и линий яровой мягкой пшеницы, включенных в программу

исследований КАСИБ в 2019–2020 гг. Характеристика данного материала представлена в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика сортов и линий яровой мягкой пшеницы, изучаемых по программе КАСИБ

№	Сорт/Линия	Родословная	Оригинатор
<b>КАЗАХСТАН</b>			
1	Линия Р-1415	(Сарат. 70 / Саратовская 29)*Актюбе 39	Актюбинская сельскохозяйственная опытная станция
2	Линия Р-1417	(Саратовская 55 / Альб. 28)* Степная 50	
3	Степная 150	(Frinia × Druzina; Мех.) × Степная 2	
4	ГВК 2097/14	Омская 20 / Казахстанская 17	
5	ГВК 2140/6	НИИО × И 4236/ Велютинум // Целинная 26	
6	Лютесценс 762	–	
7	Лютесценс 799	–	
8	Таймас	Дуэт × 101/94-1	
9	Линия 67/98-13	Л 194 × Скала БР	
10	Лютесценс 111/09	Лютесценс 32 × Росинка 3	
11	Степнодар 90	Молодежная × Мироновская 808	
12	Эритроспермум 79/07	Эритроспермум 760 × Челябин 2	
13	Лютесценс 1991	Ергис 97 / BW725/MN	
14	Лютесценс 2055	Карагандская 22 / Лютесценс 251-93-4	
15	Лютесценс 2174	Акмола 2 / Лютесценс 251-93-4	
16	Линия 11/09-13-3	11/90к-32 × Павлодарская 93	
17	Линия 37/07-12-2	(Павлодарская 27 × Казахстанская 15 2В) × Памяти Азиева	
<b>РОССИЯ</b>			
18	Лидер 80	Индивид. отбор ШТРУ Р-29 (Германия)	Алтайский НИИ сельского хозяйства
19	Лидер 1143	Лютесценс 748 / Алтайская 50	
20	Лютесценс ТР-64	Чебаркульская / Дуэт	Курганский НИИ сельского хозяйства
21	Лютесценс ШТ-335	И.о. СПЧС 12№44	
22	KS 115/09-1	Фитон 25 / Омская 38	НПА «Кургансемена»
23	KS 161/08-2р	Салават Юлаев / Омская 38	
24	KS 111/09-2	Радуга / Салават Юлаев	
25	Линия 1616ае14	Тулайковская 110 / Безенчукская 380	Самарский НИИ сельского хозяйства
26	Линия 1617ае9	Тулайковская 110 / Тулайковская 108	
27	Линия 1643ае3	Тулайковская 110 / Безенчукская 790	
28	Линия 2026	Новосибирская 15 × Лубнинка	Сибирский НИИ растениеводства и селекции филиал ИЦиГ СО РАН
29	Линия 2149	Новосибирская 44 × Новосибирская 15	
30	Лютесценс 123-13	Barrie // JNRB.5 / Pifed/3 / Fora	Омский Государственный аграрный университет
31	Силантй	Lut30-94*2/3/ T.dicocconPI94625 / Ae.squarrosa (372) //3*Pastor	
32	Лютесценс 128-15	Lut 210.99.10 /3/ SRN / Ae.squarrosa (358)// Milan /SHA7 /4/ Челябин юбилейная	
33	Лютесценс 13-15	Lut307-97-23/3 /EMB16 / CBRD // /CBRD /4/ Алтайская 530	
34	Л417/10-5	Lut. 109/04-100 / Lut. .98/03-2	Омский аграрный научный центр
35	Л70/06-4	Lut. 639 / Lut. 529/00-10С	
36	Л14/10-14	Уралосибирская / Lut. 242/97-2-45	
37	ГАУ 21-2018	(Лют. 950, Алт.530 × Лют. 296) × Омская 24	
38	ГАУ 6-2018	Lut 196.94.6*2 /4/ T.dicoccon PI225332 / Ae.squarrosa (895) // WBLLI3/*WBLLI	

Продолжение таблицы 1

№	Сорт/Линия	Родословная	Оригинатор
39	ЛЗ96+Л400/Л2032	Л2033 / Белянка	НИИ сельского хозяйства Юго-Востока
40	Лютесценс 423-17	Л505 /3 / Срос/ Ae.squar.(205) Weaver /4/ Л505/ 5/ Л505	
41	Эритроспермум 25787	11СПЧС № 73	Челябинский НИИ сельского хозяйства
42	Челяба 80	(Кукушка № 210 × Россиянка) × Новосибирская 15	
43	Ильменская 2	Челяба 75 × (Челяба 2 × Фори 7)	
44	Силач	Лют. 210/99-10 × Эр. 23090	
45	Оренбургская 22	F10[F11 (Саратовская 29 × Альбидум 18)	Оренбургский НИИ сельского хозяйства
46	Оренбургская 23	F2м (Л-1155 × Прохоровка)	
47	Оренбургская юбил.	F7 (Альбидум 188 × Лютесценс 13)	

Размножение изолятов *P. triticina* для проведения фитопатологического теста выполнено по методике лабораторного культивирования патогена (Михайлова и др., 1998). В фитопатологическом тесте использовали три тест-клона *P. triticina*, маркированные вирулентностью к

генам *Lr9*, *Lr19*, *Lr26* и три географически отдаленные популяции (краснодарскую, дагестанскую и челябинскую). Характеристика используемого инфекционного материала по вирулентности представлена в таблице 2.

Таблица 2. Характеристика вирулентности клонов и популяций *Puccinia triticina*

Популяции и изоляты	Происхождение	Вирулентность	
		к линиям Thatcher с генами <i>Lr</i>	
Тест-клон1 (К1)	Челябинская обл., 2017	1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 9, 10, 11, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 20, 30	19, 23, 24, 26, 28, 29, 44
Тест-клон2 (К2)	Тамбовская обл., 2016	1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 14a, 14b, 15, 17, 18, 19, 20, 30, 44	9, 11, 16, 23, 24, 26, 28, 29
Тест-клон3 (К3)	Краснодарский край, 2017	1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 11, 14a, 14b, 15, 17, 18, 20, 23, 26, 30, 44	9, 16, 19, 24, 28, 29
П_Кр	Краснодарский край, 2018	1, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 11, 14a, 14b, 16, 17, 18, 23, 26, 30, 44	9, 2a, 15, 19, 20, 24, 28, 29
П_Чел	Челябинская обл., 2018	1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 9, 10, 11, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 20, 30	19, 23, 24, 26, 28, 29, 44
П_Даг	Дагестан	1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 11, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 20, 23, 26, 30, 44	9, 19, 24, 28, 29

Устойчивость образцов пшеницы к бурой ржавчине оценивали с использованием 10–14 дневных проростков (фаза первого листа), выращенных в сосудах с почвой. Тип реакции образцов пшеницы определяли по шкале E. V. Mains, H. S. Jackson (McIntosh et al., 1995), 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, а 3, 4 и X – к восприимчивым. Все лабораторные эксперименты выполнены с использованием климатической камеры Versatile Environmental Test Chamber MLR-352H («SANYO Electric Co., Ltd.», Япония).

Молекулярные маркеры использовали для идентификации 21 *Lr*-гена: *Lr1* (маркер WR003) (Qiu et al., 2007), *Lr3* (Herrera-Foessel et al., 2007), *Lr9* (SCS5) (Gupta, et al.,

2005), *Lr10* (Fi.2245/Lr10-6/r2) (Chelkowski et al., 2003), *Lr19* (SCS265) (Gupta et al., 2006), *Lr20* (STS638) (Neu et al., 2002), *Lr21* (*Lr21L/R*) (<https://maswheat.ucdavis.edu/protocols/Lr21/index.htm>), *Lr22a* (<https://maswheat.ucdavis.edu/protocols/Lr22a/index.htm>), *Lr24* (Sr24#12, Sr24#50) (Mago et al., 2005), *Lr25* (Lr25F20/R19) (<https://maswheat.ucdavis.edu/protocols/Lr25/index.htm>), *Lr26* (SCM9) (Weng et al., 2007), *Lr28* (SCS421) (Cherukuri et al., 2005), *Lr29* (Lr29F24) (Procunier et al., 1995), *Lr34* (csLV34) (Lagudah et al., 2006), *Lr35* (Sr39=22) (<https://maswheat.ucdavis.edu/protocols/Lr35/index.htm>), *Lr37* (Ventriup/LN2) (Helguera et al., 2003), *Lr38* (Yan et al., 2008), *Lr41* (GDM35) (Pestsova et al., 2000), *Lr47* (Helguera et al., 2000), *Lr66* (Marais et al., 2010), *Lr6Agil* (Сибикеев и др., 2017). Выделение ДНК выполнено из листьев 10-дневных проростков по методике Дорохова и Клоке (1996). Амплификацию ДНК проводили в реакционной смеси по предложенным в литературе протоколам и при необходимости модифицировали.

### Результаты

В результате фитопатологической оценки 23% изученных образцов пшеницы показали высокий уровень устойчивости в фазе проростков (тип реакции 0, 1, 2). К ним относились сорта Таймас, Силантий, Лидер 80, Челябинка 80, Ильменская 2, Силач и линии Лютесценс 111/09, Лютесценс TP-64, Лютесценс ШТ-335, Линия

1616ae14, Лютесценс 128-15, Лютесценс 13-15, Л14/10-14, ЛЗ96+Л400/Л2032, Лютесценс 423-17, Эритроспермум 25787 (табл. 3). Количество устойчивых к бурой ржавчине образцов пшеницы было существенно выше в российском материале, чем в казахстанском.

Таблица 3. Характеристика образцов яровой пшеницы КАСИБ по устойчивости к бурой ржавчине и идентифицированные у них *Lr*-гены

№	Сорт/Линия	Тип реакции при инокуляции клонами и популяциями <i>P. triticina</i> (балл)*						<i>Lr</i> -гены, идентифицированные в фитопатологическом тесте	<i>Lr</i> -гены, идентифицированные с использованием молекулярных маркеров
		К1	К2	К3	П_Чел	П_Кр	П_Даг		
1	Линия Р-1415	3	3	3	3-4	3	3		<i>Lr3</i>
2	Линия Р-1417	3	3	3	3-4	3	3		
3	Степная 150	0-1;	0;	3	3-4	3	3		
4	ГВК 2097/14	3	3	3	3-4	3	3		<i>Lr3</i>
5	ГВК 2140/6	0	0	3	3-4	3	3	<i>Lr26</i>	<i>Lr1, Lr3, Lr26</i>
6	Лютесценс 762	2-3-X	3	3	3	3	3		
7	Лютесценс 799	3	3	3	3-4	3	3		<i>Lr3</i>
8	Таймас	3-	0	0	0	0	0	<i>Lr9</i>	<i>Lr3, Lr9</i>
9	Линия 67/98-13	3	3	3	3-4	3	3		<i>Lr3, Lr10</i>
10	Лютесценс 111/09	0;	0	0;	0;	0;	0;		<i>Lr24</i>
11	Степнодар 90	3	3-4	3	3-4	3	3		<i>Lr3, Lr34</i>
12	Эритроспермум 79/07	3	3-4	3	3-4	3	3		<i>Lr37</i>
13	Лютесценс 1991	3	3-4	3	3-4	3	3		<i>Lr3</i>
14	Лютесценс 2055	3	3-4	3	3-4	3	3		<i>Lr10</i>
15	Лютесценс 2174	3	3-4	3	3-4	3	3		<i>Lr3</i>
16	Линия 11/09-13-3	3	3	3	3-4	3	3		
17	Линия 37/07-12-2	3	3	0;	3-4	3	3		<i>Lr3, Lr10</i>
18	Лидер 80	0;	0;	0	0;	0;	0		<i>Lr24</i>
19	Лидер 1143	3	3-4	3	3-4	3-4	3		<i>Lr1</i>
20	Лютесценс ТР-64**	0;-1	0	0-2/3	0	3/0	0		<i>Lr9***</i>
21	Лютесценс ШТ-335	0;	0-1;	0	0;	0;	0		<i>Lr24, Lr26</i>
22	KS 115/09-1	0	0	3	3	3	рп	<i>Lr26</i>	<i>Lr1, Lr3, Lr10, Lr26</i>
23	KS 161/08-2р	0	0	3	3	3	рп	<i>Lr26</i>	<i>Lr3, Lr26, Lr34</i>
24	KS 111/09-2	0	0	3	рп	3	3	<i>Lr26</i>	<i>Lr1, Lr3, Lr26</i>
25	Линия 1616ae14	0	0	0	0	0	0		<i>Lr19, Lr26</i>
26	Линия 1617ae9**	0	3/0	0	0	0	0		<i>Lr19***</i>
27	Линия 1643ae3**	3-4	3/0	0	3	рп	0		<i>Lr3 Lr19***</i>
28	Линия 2026	3-4	0	0	3	0	0	<i>Lr9</i>	<i>Lr1, Lr3, Lr9, Lr10</i>
29	Линия 2149	3	3	3	3	3	рп		<i>Lr3, Lr10</i>
30	Лютесценс 123-13	3	3	3	3	3	рп		<i>Lr1</i>
31	Силантій	0	0	0	0-1;	0-1;	0		<i>Lr21</i>
32	Лютесценс 128-15	0	0	0	0	0	0		<i>Lr20</i>
33	Лютесценс 13-15	0;	0	0	0;	0;	0		<i>Lr9, Lr24, 1AL.1RS</i>
34	Л417/10-5	0	0	3	3-4	3-4	рп	<i>Lr26</i>	<i>Lr3, Lr26</i>
35	Л170/06-4	0	0	3	3-4	3-4	Рп	<i>Lr26</i>	<i>Lr1, Lr3, Lr10, Lr26</i>
36	Л14/10-14	0	0	0	0	0	0		<i>Lr3, Lr19, Lr26</i>
37	ГАУ 21-2018	3,0	0	3	3	3	рп	<i>Lr26</i>	<i>Lr10, Lr26, Lr34</i>
38	ГАУ 6-2018	3-4	3	3	3-4	3	3		<i>Lr1, Lr3</i>
39	Л396+Л400/Л2032	0;	0	0	0	0	0		<i>Lr3, Lr6Agi</i>
40	Лютесценс 423-17	0	0	0	0	0	0		<i>Lr3, Lr19, Lr26, Lr41</i>
41	Эритроспермум 25787	0	0	0	0	0	0		<i>Lr19, Lr26, Lr34**</i>
42	Челяба 80	0	0	0	0	0	0		<i>Lr1, Lr3, Lr10, LrSp</i>
43	Ильменская 2	0	0	0	0	0	0		<i>Lr1, Lr3, Lr10, LrSp</i>
44	Оренбургская 22	1-2	1-2;X	3	1-2	3	2-3X		
45	Оренбургская 23**	0;/3	3	0/3	0	3	рп		<i>Lr1, Lr3</i>
46	Оренбургская юбил.	0-1;	1-2;	3	2+	2,X	рп		<i>Lr3</i>
47	Силач	0	0	0	0	0	0		<i>Lr10, Lr9, Lr26</i>

\* – расшифровка обозначений клонов и популяций представлена в таблице 2.

\*\* – расщепление образца пшеницы по устойчивости к *P. triticina* в фитопатологическом тесте (0/3 – растения с типом реакции 0 и с типом реакции 3).

\*\*\* – гетерогенность образца в молекулярном анализе.

рп – редкие пустулы.

С использованием молекулярных маркеров у устойчивых к бурой ржавчине линий Лютесценс 111/09, Лидер 80, Лютесценс ШТ-335, Лютесценс 13-15 идентифицирован ген *Lr24*. У линии Лютесценс ШТ-335 наряду с геном *Lr24* выявлен *Lr26*, а у линии Лютесценс 13-15 – ген *Lr9* и пшенично-ржаная транслокация 1AL/1RS. У сортов Челябин 80 и Ильменская 2 определено наличие гена *LrSp*, переданного от *Aegilops speltoides* Tausch. и неидентичного известным эффективным *Lr*-генам, а у линии ЛЗ96+Л400/Л2032 – ген *Lr6Agi* от *Agropyron intermedium* Host. (табл. 3). У линий 1616ae14, Л14/10-14, Эритроспермум 25787 идентифицирована эффективная комбинация частично эффективных генов *Lr19+Lr26*, у сорта Силач – *Lr9+Lr26*, а у линии Лютесценс 423-17 – *Lr19+Lr26+Lr41*. У высокоустойчивого к бурой ржавчине сорта Силантий определен один частично эффективный ген *Lr21*, а у линии Лютесценс 128-15 – малоэффективный ген *Lr20*. Однако высокий уровень проростковой устойчивости этих линий указывает на наличие у них дополнительных *Lr*-генов.

Линии ГВК 2140/6, KS 115/09-1, KS 161/08-2р, KS 111/09-2, Л417/10-5, Л70/06-4, ГАУ 21-2018 были устойчивы к тест-клонам К1 и К2, которые характеризуются авирулентностью к *Lr26*, и восприимчивы к клону К3, челябинской, краснодарской и дербентской популяциям, вирулентным к *Lr26*. Согласно фитопатологическому тесту у них можно предположить наличие этих генов. С использованием молекулярных маркеров подтверждено это предположение. Наряду с геном *Lr26* у многих из этих образцов пшеницы определены малоэффективные гены *Lr1*, *Lr3*, *Lr10* и *Lr34* (табл. 2). Линия 2026 и сорт Таймас были восприимчивы к клону К1 и челябинской популяции, характеризующимися вирулентностью к образцам с геном *Lr9*, и устойчивы к другим используемым клонам и популяциям. Молекулярный анализ подтвердил наличие *Lr9* у

обоих этих образцов и трех малоэффективных генов (*Lr1*, *Lr3*, *Lr10*) у линии 2026.

Ген устойчивости взрослых растений *Lr37* (adult plant resistance gene) выявлен у линии Эритроспермум 79/07, а ген *Lr34* – у линий KS 161/08-2р, ГАУ 21-2018 и Степнодар 90. Все эти образцы характеризовались восприимчивостью в фазе проростков. У других восприимчивых образцов пшеницы определена широкая представленность малоэффективных генов, которые выявлены по отдельности или в разных сочетаниях: *Lr1* – Лидер 1143, Лютесценс 123-13; *Lr3* – Линия Р-1415, ГВК 2097/14, Лютесценс 799, Лютесценс 1991, Лютесценс 2174, Оренбургская юбилейная; *Lr1+Lr3* – ГАУ 6-2018; Линия 37/07-12-2, Линия 2149, *Lr3+Lr34* – Степнодар 90. У линий 1643ae3, Лютесценс ТР-64 и сорта Оренбургская 23 в фитопатологическом тесте и молекулярном анализе отмечена высокая гетерогенность (расщепление).

У 13% изученных образцов пшеницы маркеры тестируемых *Lr*-генов (Р-1417, Лютесценс 762, л11/09-13-3, Лютесценс ТП64, Оренбургская 22, Степная 150) не выявлены. Все эти образцы пшеницы были восприимчивы к используемым клонам и популяциям *P. triticina* в фитопатологическом анализе, что указывает на отсутствие у них эффективных *Lr*-генов.

В результате молекулярного анализа маркеры идентифицируемых *Lr*-генов по отдельности и в разных сочетаниях выявлены у 82% изученных образцов пшеницы (рис. 1). Эффективные *Lr*-гены и комбинации частично эффективных генов идентифицированы у 30% образцов пшеницы. Гены возрастной устойчивости определены у 8% образцов. Малоэффективные гены по отдельности или в разных сочетаниях отмечены у 41% изученных образцов.

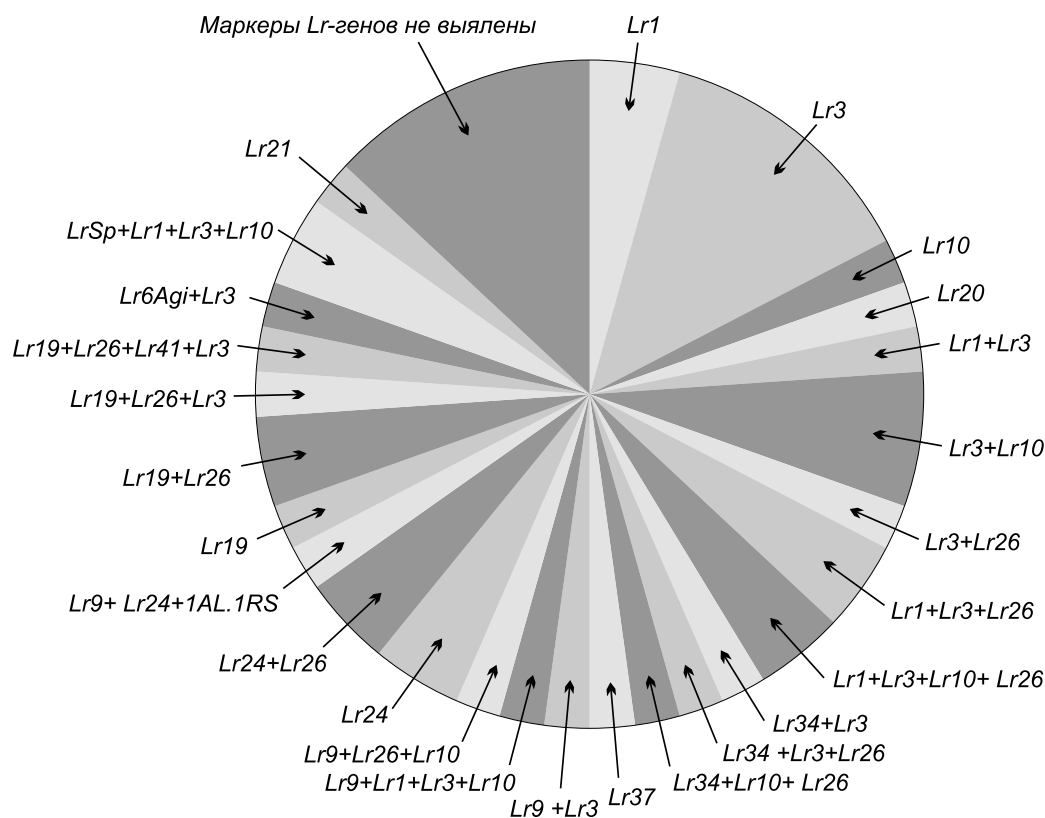


Рисунок 1. Разнообразие изученной коллекции яровой пшеницы по *Lr*-генам (% образцов)

## Обсуждение

В результате проведенных исследований охарактеризована проростковая устойчивость к бурой ржавчине у перспективных образцов яровой мягкой пшеницы и разнообразие их по *Lr*-генам. Выделены высокоустойчивые образцы, защищенные эффективными *Lr*-генами (*Lr24*, *LrSp*, *Lr6Agi1*) и сочетаниями частично эффективных *Lr*-генов (*Lr9+Lr26*; *Lr19+Lr26*; *Lr19+Lr26+Lr41*).

Ген *Lr24* передан мягкой пшеницы от *Agropyron elongatum* (Host). Beauv. и широко распространен в североамериканских и австралийских сортах пшеницы (McIntosh et al., 1995). В Государственный реестр селекционных достижений РФ включено два зарубежных сорта с этим геном: Канюк (Франция) и КВС Аквилон (Германия) (Гульятеева, 2018). В Казахстане для производственного выращивания рекомендован сорт Айна с геном *Lr24*, оригинатором которого является Карабалыкская сельскохозяйственная опытная станция.

Мировой опыт возделывания сортов с геном *Lr24* демонстрирует разную длительность сохранения устойчивости. Быстрое преодоление гена *Lr24* отмечено в США: вирулентные изоляты появились через 5 лет после выращивания сортов с этим геном. В Австралии ген *Lr24* оставался эффективным в течение 20 лет (с 1980 по 2000 гг.) (Park et al., 2002). В большинстве регионов России и Казахстана ген *Lr24* сохраняет свою эффективность (Гульятеева, 2018). Г. В. Волкова с соавторами (2011) сообщают о появлении вирулентных к *Lr24* изолятов на Северном Кавказе, а Л.В. Мешкова с соавторами (2018) – в Западной Сибири, что указывает на возможное поражение сортов, защищенным только одним геном *Lr24*, в этих регионах.

Для продления «полезной жизни» сортов рекомендуется пирамидирование гена *Lr24* с другими эффективными и частично эффективными *Lr*-генами. В данной работе такие «пирамиды» генов идентифицированы у линий Лютеценс ШТ-335 (*Lr24+Lr26*) и Лютеценс 13-15 (*Lr24+Lr9+* транслокация 1AL.1RS от *Secale cereale* L.). Транслокация 1AL.1RS, выявленная у линии Лютеценс 13-15, несет комплекс неидентифицированных генов устойчивости к бурой и стеблевой ржавчине (Weng et al., 2007). Она широко представлена в североамериканских сортах пшеницы по отдельности и в сочетании с геном *Lr24* (McIntosh et al., 1995; Weng et al. 2007). В Государственном реестре селекционных достижений РФ есть три озимых сорта с этой транслокацией: Богданка (+*Lr34*), Княгиня Ольга (+*Lr1*, *Lr34*) и Кохана (+*Lr1*, *Lr34*) и один яровой: Канюк (+*Lr24*, *Lr20*) (Гульятеева, 2018); все они характеризуются высоким уровнем устойчивости к бурой ржавчине в полевых условиях.

Гены *Lr9* и *Lr19*, идентифицированные у 16% изучаемых сортов, относятся к группе широко распространенных в российских сортах (Гульятеева, 2018). Ген *Lr9* передан мягкой пшенице от *Aegilops umbellulata* Zhuk., а ген *Lr19* – от *Ag elongatum* (McIntosh et al., 1995). По отдельности эти гены утратили свою эффективность в регионах, где массово выращиваются сорта их носители (*Lr9* – Западная Сибирь, Урал; *Lr19* – Поволжье, Урал, ЦЧР) (Сибикеев, Крупнов, 2007; Мешкова и др., 2008). Для продления «срока полезной жизни» генов *Lr9* и *Lr19* эффективно пирамидирование их с эффективными и частично эффективными *Lr*-генами (Тюнин и др., 2017). Это обусловлено

отсутствием изолятов с определенными сочетаниями аллелей вирулентности/авирулентности, т.е. так называемыми «запретными комбинациями». Таким примером является сочетание генов *Lr19* (или *Lr9*) с малоэффективным геном *Lr26* или геном устойчивости взрослых растений *Lr37* (Сибикеев, Крупнов, 2007; Тюнин и др., 2017). В ежегодном анализе вирулентности, проводимом ВИЗР, клоны, одновременно вирулентные к *Lr9* и *Lr26*, или *Lr19* и *Lr26*, не выявлены. При этом такой эффект не отмечен при сочетании генов *Lr9* и *Lr19* с малоэффективными генами *Lr1*, *Lr3* и *Lr10*, широко представленными у изученных линий пшеницы. Большинство российских и казахстанских изолятов *P. triticina*, вирулентных к линиям с генами *Lr9* или *Lr19*, также вирулентны к *Lr1*, *Lr3* и *Lr10* (Тюнин и др., 2017; Гульятеева 2018).

Ген *Lr6Agi1*, переданный от *Ag. intermedium*, и ген *LrSp* от *Ae. speltoides*, идентифицированные у изучаемых линий пшеницы, относятся к группе высокоэффективных в России и Казахстане. Они отличаются от известных эффективных, переданных мягкой пшеницы от этих видов и включенных в Каталог генных символов (McIntosh et al., 1995). Носителями гена *Lr6Agi1* являются сорта Белянка, Фаворит, Воевода, Лебедушка. Они созданы в НИИСХ Юго-Востока и рекомендованы для выращивания в Нижнем Поволжье (Сибикеев и др., 2017). Линия Л396+Л400/Л2032 у которой выявлен маркер гена *Lr6Agi1*, создана на основе сорта Фаворит, что подтверждает наличие у нее этого гена. Носителем гена *LrSp* является сорт Челябин 75, созданный в Челябинском НИИСХ. Он рекомендуется для выращивания в Уральском регионе (<https://reestr.gossort.com>). Донором гена *LrSp* является линия «кукушка», созданная с участием *Ae. speltoides*, и несущая гены устойчивости к бурой и стеблевой ржавчине, сцепленные с гаметоцидным геном. Сорта Челябин 80 и Ильменская 2, у которых в данных исследованиях выявлен ген *LrSp*, созданы с участием сорта Челябин 75, что подтверждает результаты молекулярного тестирования.

Гены *Lr41* (= *Lr39*) и *Lr21*, выявленные у линии Лютеценс 423-17 и сорта Силантий, переданы мягкой пшеницы от *Aegilops tauschii*. Эти гены – новые для российских и казахстанских сортов пшеницы. Источником их у изученных линий являются синтетические амфидиплоиды (табл. 1), полученные в СИММИТ и широко вовлекаемые в селекционные программы учреждениями КАСИБ (Shamanin et al., 2019). В России и Казахстане ген *Lr41* относится к группе высокоэффективных, а *Lr21* – к частично эффективному (Гульятеева, 2018).

Гены *Lr37* и *Lr34*, выявленные у восприимчивых в фазе проростков линий яровой пшеницы, относятся к группе генов устойчивости взрослых растений. Их действие проявляется на более поздних этапах онтогенеза пшеницы. Ген *Lr37* передан в мягкую пшеницу от *Aegilops ventricosum*. До недавнего времени ген *Lr37* относился к группе высокоэффективных во многих странах (McIntosh et al., 1995). Однако широкое возделывание сортов с геном *Lr37* в Западной Европе привело к утрате его эффективности (Serfling et al., 2011). В России эффективность гена *Lr37* варьирует по регионам от высокой до умеренной (Гульятеева, 2018; Сочалова, Лихенко, 2016). Ген *Lr34* относится к группе генов, обеспечивающих устойчивость

как качественного, так и количественного проявления (т.е. частичную устойчивость или, иначе, устойчивость по типу медленного развития – slow rusting) (McIntosh et al., 1995). Данный тип устойчивости характеризуется более длительным латентным периодом, уменьшением числа пустул на единицу поверхности листа, их размера и количества спор в пустуле. К этой немногочисленной группе относятся также гены *Lr46* и *Lr67*. Устойчивость гена *Lr34* в России утеряна. В селекционных программах СИММИТ и других стран ген *Lr34* используется в комбинации с 3–4 генами возрастной и ювенильной устойчивости, аддитивный эффект которых обеспечивает основу длительной

устойчивости сортов (Park, McIntosh, 1994; Schnurbusch et al., 2004).

В целом выявлено высокое генетическое разнообразие изученного материала по устойчивости к бурой ржавчине. Наряду с широко используемыми в селекционных программах России и Казахстана донорами стали привлекать источники новых *Lr*-генов. Полученные результаты имеют большое значение для разработки перспективных программ использования высокоустойчивых к бурой ржавчине линий пшеницы, выделенных в данных исследованиях, в качестве доноров.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования на 2018–2020 гг. (ИРН BR0649329) и проекта РФФИ №19-016-00052а.

### Библиографический список (References)

- Беспалова ЛА, Романенко АА, Колесников ФА, Кудряшов ИН и др (2017) Сорты пшеницы и тритикале. Краснодар: КНИИСХ. 168 с.
- Волкова ГВ, Анпилогова ЛК, Полушин ПА, Ваганова ОФ и др (2011) Характеристика популяции возбудителя бурой ржавчины пшеницы по вирулентности в пяти агроклиматических зонах Северного Кавказа. *Доклады Российской Академии Сельскохозяйственных Наук* 4:31–33
- Гультяева ЕИ (2018) Генетическая структура популяций *Puccinia triticina* в России и её изменчивость под влиянием растения-хозяина. Дисс. ... д.б.н. СПб: 312 с
- Дорохов ДБ, Клоке Э (1997) Быстрая и экономичная технология RAPD анализа растительных геномов. *Генетика* 33(4):443–450
- Койшыбаев М, Канафин БК, Федоренко ЕН, Гоц АЮ и др (2017) Источники устойчивости яровой мягкой пшеницы к видам ржавчины и септориоза в Северном Казахстане. *Международный научно-исследовательский журнал* 12(66):117–122. <http://www.doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.098>
- Мешкова ЛВ, Россеева ЛП, Шрейдер ЕР, Сидоров АВ (2008) Вирулентность патотипов возбудителя бурой ржавчины пшеницы к ТН LR 9 в регионах Сибири и Урала. Вторая Всероссийская конференция «Современные проблемы иммунитета растений к вредным организмам». 70–73
- Мешкова ЛВ, Россеева ЛП, Зверовская ТС, Сабаева ОБ и др (2018) Вирулентность природной популяции возбудителя бурой ржавчины пшеницы в Омской области. *Успехи современного естествознания* 11(2):279–283
- Михайлова ЛА, Гультяева ЕИ, Мироненко НВ (1998) Методы исследований структуры популяции возбудителя бурой ржавчины пшеницы. Сборник методических рекомендаций по защите растений. СПб: ВИЗР. 105–126
- Потоцкая ИВ, Шаманин ВП, Моргунов АИ (2018) Оценка урожайности сортов яровой мягкой пшеницы сети КА-СИБ в различных экологических пунктах России и Казахстана. *Успехи современного естествознания* 4:86–91
- Радченко ЕЕ, Одинцова ИГ (2008) Идентификация генов устойчивости зерновых культур к вредным организмам. В метод. пособии: Радченко ЕЕ и др (ред) Изучение генетических ресурсов зерновых культур по устойчивости к вредным организмам. Российская академия сельскохозяйственных наук, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н. И. Вавилова. М.: 306–331
- Сибикеев СН, Крупнов ВА (2007) Эволюция листовой ржавчины и защита от нее в Поволжье. *Вестник Саратовского государственного университета им. Вавилова* Спецвыпуск. 92–94
- Сибикеев СН, Бадаева ЕД, Гультяева ЕИ, Дружин АЕ и др (2017) Сравнительный анализ 6Agi1 и 6Agi2 хромосом *Agropyron intermedium* (Host) Beauv у сортов и линий мягкой пшеницы с пшенично – пырейными замещениями. *Генетика* 53(3):298–309. <http://www.doi.org/10.7868/S0016675817030110>
- Сочалова ЛП, Лихенко ИЕ (2016) Оценка устойчивости к бурой ржавчине изогенных по генам Lr-линий и сортов пшеницы в условиях Новосибирской области. *Достижения науки и техники АПК* 30(3):46–50
- Тюнин ВА, Шрейдер ЕР (2010) Особенности технологии селекции мягкой пшеницы на устойчивость к углеводно-белковому истощению семян и другим стрессам в условиях Южного Урала. Челябинск. 120 с.
- Тюнин ВА, Шрейдер ЕР, Гультяева ЕИ, Шайдаюк ЕЛ (2017) Характеристика вирулентности популяций *Puccinia triticina* и перспективы использования генов *Lr24*, *Lr25*, *LrSp* в селекции яровой мягкой пшеницы на Южном Урале. *Вавиловский журнал генетики и селекции* 21(5):523–529. <http://www.doi.org/10.18699/VJ17.269>
- Chelkowski J, Golka L, Stepien L (2003) Application of STS markers for leaf rust resistance genes in near-isogenic lines of spring wheat cv. Thatcher. *J Appl Genet* 44:323–338
- Cherukuri DP, Gupta SK, Charpe A, Koul S, Prabhu KV, Singh RB, Haq Q (2005) Molecular mapping of *Aegilops speltoides* derived leaf rust resistance gene *Lr28* in wheat. *Euphytica* 143(1-2):19–26. <http://www.doi.org/10.1007/s10681-005-1680-6>
- Gupta SK, Charpe A, Koul S, Prabhu KV et al (2005) Development and validation of molecular markers linked to an *Aegilops umbellulata*-derived leaf rust resistance gene, *Lr9*, for marker-assisted selection in bread wheat. *Genome* 48(5):823–830. <http://www.doi.org/10.1139/G05-051>
- Gupta SK, Charpe A, Prabhu KW, Haque OMR (2006) Identification and validation of molecular markers linked to the leaf rust resistance gene *Lr19* in wheat. *Theor Appl Genet* 113(6):1027–1036. <http://www.doi.org/10.1007/s00122-006-0362-7>

- Helguera M, Khan IA, Dubcovsky J (2000) Development of PCR markers for wheat leaf rust resistance gene *Lr47*. *Theor Appl Genet* 101(7):625–631. <http://www.doi.org/10.1007/s001220051397>
- Helguera M, Khan IA, Kolmer J, Lijavetzky D et al (2003) 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* 43(5):1839–1847. <http://www.doi.org/10.2135/cropsci2003.1839>
- Herrera-Foessel SA, Singh RP, Huerta-Espino J, Williams M et al (2007) Identification and mapping of *Lr3* and a linked leaf rust resistance gene in durum wheat. *Crop Sci* 47(4):1459–1466. <http://www.doi.org/10.2135/cropsci2006.10.0663>
- Lagudah ES, McFadden H, Singh RP, Huerta-Espino J et al (2006) Molecular genetic characterization of the *Lr34/Yr18* slow rusting resistance gene region in wheat. *Theor Appl Genet* 114(1):21–30. <http://www.doi.org/10.1007/s00122-006-0406-z>
- Mago R, Bariana HS, Dundas IS (2005) Development of PCR markers for the selection of wheat stem rust resistance genes *Sr24* and *Sr26* in diverse wheat germplasm. *Theor Appl Genet* 111(3):496–504. <http://www.doi.org/10.1007/s00122-005-2039-z>
- McIntosh RA, Wellings CR, Park RF (1995) Wheat rusts. An atlas of resistance genes. CSIRO Australia, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, the Netherlands.
- Marais GF, Bekker TA, Eksteen B, McCallum T et al (2010) Attempts to remove gametocidal genes co-transferred to common wheat with rust resistance from *Aegilops speltoides*. *Euphytica* 171(1):71–85. <http://www.doi.org/10.1007/s10681-009-9996-2>
- Neu C, Stein N, Keller B (2002) Genetic mapping of the *Lr20-Pm1* resistance locus reveals suppressed recombination on chromosome arm 7AL in hexaploid wheat. *Genome* 45(4):737–744. <http://www.doi.org/10.1139/g02-040>
- Park RF, McIntosh RA (1994) Adult plant resistances to *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* in wheat. *N Z J Crop Hort Sci* 22(2):151–158. <http://www.doi.org/10.1080/01140671.1994.9513819>
- Park RF, Bariana HS, Wellings CR, Wallwork H (2002) Detection and occurrence of a new pathotype of *Puccinia triticina* with virulence for *Lr24* in Australia. *Aust J Agric Res* 53(9):1069–1076. <http://www.doi.org/10.1071/AR02018>
- Pestsova E, Ganal MW, Röder MS (2000) Isolation and mapping of microsatellite markers specific for the D genome of bread wheat. *Genome* 43(4):689–697. <http://www.doi.org/10.1139/g00-042>
- Procunier JD, Townley-Smith TF, Fox S, Prashar S et al (1995) PCR-based RAPD/DGGE markers linked to leaf rust resistance genes *Lr29* and *Lr25* in wheat (*Triticum aestivum* L.). *J Genet* 49:87–92
- Qiu JW, Schürch AC, Yahiaoui N, Dong LL et al (2007) Physical mapping and identification of a candidate for the leaf rust resistance gene *Lr1* of wheat. *Theor Appl Genet* 115(2):159–168. <http://www.doi.org/10.1007/s00122-007-0551-z>
- Samborski DJ, Dyck PL (1982) Enhancement of resistance to *Puccinia recondita* by interactions of resistance genes in wheat. *Can J Plant Pathol* 4(2):152–156. <http://www.doi.org/10.1080/07060668209501317>
- Schnurbusch T, Bossolini E, Messmer B, Keller B (2004) Tagging and validation of a major quantitative trait locus for leaf rust resistance and leaf tip necrosis in winter wheat cultivar Forno. *Phytopathology* 94(10):1036–1041. <http://www.doi.org/10.1094/PHTO.2004.94.10.1036>
- Serfling A, Kramer I, Lind V, Schliephake E et al (2011) Diagnostic value of molecular markers for *Lr* genes and characterization of leaf rust resistance of German winter wheat cultivars with regard to the stability of vertical resistance. *Eur J Plant Pathol* 130(4):559–575. <http://www.doi.org/10.1007/s10658-011-9778-2>
- Shamanin V, Shepelev S, Pozherukova V, Gulyaeva E et al (2019) Primary hexaploid synthetics: Novel sources of wheat disease resistance. *Crop Protection* 121:7–10. <http://www.doi.org/10.1016/j.cropro.2019.03.003>
- Yan HF, Yang WX, Chu D, Liu DQ (2008) A new marker tagged to the leaf rust resistance gene *Lr38*. *Sci Agric Sinica* 40(11):3604–3609
- Weng Y, Azhaguvel P, Devkota RN, Rudd JC (2007) PCR based markers for detection of different sources of 1AL.1RS and 1BL.1RS wheat-rye translocations in wheat background. *Plant Breed* 126(5):482–486. <http://www.doi.org/10.1111/j.1439-0523.2007.01331.x>

#### Translation of Russian References

- Bespalova LA, Romanenko AA, Kolesnikov FA et al (2017) [Varieties of wheat and triticale] Krasnodar: KNIISKH. 168 p. (In Russian)
- Gulyaeva EI (2018) Geneticheskaya struktura populyatsiy *Puccinia triticina* v Rossii i ee izmenchivost pod vliyaniem rasteniya-hozyaina [Genetic structure of *Puccinia triticina* populations in Russia and its variability, influenced by the host plant]. *Diss. Dr. Biol.* St. Petersburg. 312 p. (In Russian)
- Dorokhov DB, Kloke E (1997) [Rapid and economical technology of RAPD analysis of plant genomes]. *Mol Genet* 3(4):443–450 (In Russian)
- Koishybaev M, Kanafin BK, Fedorenko EN, Gots AYU et al (2017) [Stability sources of spring soft wheat to types of rust and Septoria in North Kazakhstan]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* 12(66):117–122 (In Russian)
- Meshkova LV, Roseeva LP, Shreider ER, Sidorov AV (2008) [Virulence of pathotypes of wheat brown rust pathogen to TH LR 9 in the regions of Siberia and the Urals]. Vtoraya Vserossiyskaya konferenciya «Sovremennyye problemy immuniteta rasteniy k vrednym organizmam». 70–73 (In Russian)
- Meshkova LV, Roseeva LP, Zverovskaya TS, Sabaeva OV et al (2018) [Virulence of natural population of pathogen brown rust wheat in the Omsk region]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* 11(2):279–283 (In Russian)
- Mikhailova LA, Gulyaeva EI, Mironenko NV (1998) [Methods for studying the structure of populations of the leaf rust causative agent] Sbornik metodicheskikh rekomendatsiy po zashchite rasteniy [Collection of guidelines for plant protection]. St. Petersburg: VIZR. 105–126 (In Russian)
- Pototskaya IV, Shamanin VP, Morgunov AI (2018) [Yield evaluation of spring bread wheat varieties of network KASIB in different environmental locations of Russia and Kazakhstan]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* 4:86–91 (In Russian)



- Radchenko EE, Odintsova IG (2008) Identification of genes of resistance to harmful organisms in crops [Methodical guides]. In: Radchenko EE et al (eds) *Izuchenie geneticheskikh resursov zernovykh kultur po ustoychivosti k vrednym organizmam* [Study of the genetic resources of grain crops for pest resistance]. Moscow: Rossiyskaya akademiya selskokhozyaystvennykh nauk, Gosudarstvennyy nauchnyy centr Rossiyskoy Federacii Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut rasteniyevodstva im. N. I. Vavilova. 306–331 (In Russian)
- Sibikeev SN, Krupnov VA (2007) [Evolution of leaf rust and protection from it in the Volga region] *Vestnik Saratovskogo gosuniversiteta im. Vavilova* Special edition. 92–94 (In Russian)
- Sibikeev SN, Badaeva ED, Gulyaeva EI, Druzhin AE (2017) [Comparative analysis of Agropyron intermedium (Host) Beauv 6Agi and 6Agi2 chromosomes in bread wheat cultivars and lines with wheat–wheatgrass substitutions] *Genetika* 53(3):314–324 (In Russian)
- Sochalova LP, Lihenko IE (2016) [Evaluation of resistance to brown rust of Lr-lines and varieties of wheat, isogenic in Plant Protection News, 2019, 3(101), p. 41–49
- genes, under conditions of Novosibirsk region]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* 30(3):46–50 (In Russian)
- Tyunin VA, Shreider ER (2010) Osobennosti tekhnologii selektsii myagkoy pshenitsy na ustoychivost k uglevodno–belkovomu istoshcheniyu semyan i drugim stressam v usloviyakh Yuzhnogo Urala [Features of the technology of soft wheat selection for resistance to carbohydrate-protein depletion of seeds and other stresses in the conditions of the Southern Urals]. Chelyabinsk. 120 p. (In Russian)
- Tyunin VA, Shreider ER, Gulyaeva EI, Shaydayuk EL (2017) [Characteristics of virulence of Puccinia triticina populations and the potential of the Lr24, Lr25, LrSp genes for spring common wheat breeding in the Southern Ural] *Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii* 21(5):523–529 (In Russian)
- Volkova GV, Anpilogova LK, Polushin PA, Vaganova OF et al (2011) [Characteristics of leaf rust pathogen in wheat population by virulence in five agroclimatic zones of North Caucasus]. *Doklady Rossiyskoy Akademii Selskokhozyaystvennykh Nauk* 4:31–33 (In Russian)

OECD+WoS: 4.01+AM (Agronomy)

[http://doi.org/10.31993/2308-6459-2019-3\(101\)-41-49](http://doi.org/10.31993/2308-6459-2019-3(101)-41-49)

Full-text article

## IDENTIFICATION OF LEAF RUST RESISTANCE GENES IN SPRING SOFT WHEAT SAMPLES DEVELOPED IN RUSSIA AND KAZAKHSTAN

E.I. Gulyaeva<sup>1\*</sup>, E.L. Shaydayuk<sup>1</sup>, A.S. Rsaliyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Institute of Plant Protection, Saint Petersburg, Pushkin, Russia

<sup>2</sup>The Research Institute for Biological Safety Problems, Gvardeiskiy, Kordaiskiy Rayon, Zhambylskaya Oblast, Kazakhstan

\*corresponding author; e-mail: [eigulyaeva@gmail.com](mailto:eigulyaeva@gmail.com)

Leaf rust caused by *Puccinia triticina* Erikss. is a harmful disease of spring soft wheat in Russia and Kazakhstan. For higher effectiveness of selection programs, Kazakhstan–Siberian Network for Wheat Improvement (KASIB) including the leading institutions of Kazakhstan and Siberia was established. Integrated ecological studies of selection material including those on leaf rust resistance are conducted under the KASIB programs. The work goal is to identify leaf rust resistance genes using the plant pathology and molecular approaches. Forty seven samples of spring soft wheat are included in KASIB program for 2019–2020. Virulence-labeled clones and geographically distant populations of *P. triticina* were used for plant pathology testing in seedling phase, and 11 wheat samples with high level of rust resistance at seedling phase were found. Identification of target 21 *Lr*-genes has been performed using molecular markers with positive result in 82% of the studied samples. Wheat samples highly resistant in the seedling phase demonstrated *Lr24*-gene alone or in combination with partially effective genes *Lr26* and *Lr9*, as well as genes *LrSp* and *Lr6Agi1*, not identical to the known effective genes; as well as effective combinations of genes: *Lr19+Lr26*; *Lr9+Lr26* and *Lr19+Lr26+Lr41*. The resistance genes *Lr34* and *Lr37* of adult plants have been detected in 8% of the lines. In samples susceptible at seedling phase, low efficacy genes *Lr1*, *Lr3*, *Lr10* are frequent. The screening has demonstrated high *Lr*-genes diversity of the spring wheat collection and considerable progress in wheat selection for the leaf rust resistance in Russia and Kazakhstan.

**Key words:** *Triticum aestivum*, *Puccinia triticina*, resistance, *Lr*-genes, molecular markers

Received: 27.06.2019

Accepted: 13.09.2019