

ОЦЕНКА ГЕНОФОНДА ОЗИМОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ КОЛЛЕКЦИИ СИММУТ НА ПРИСУТСТВИЕ ГЕНА *LR 34*

Н.Н. Вожжова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории клеточной селекции, nvozhzh@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2046-4000;

О.С. Жогалева, младший научный сотрудник лаборатории маркерной селекции, ORCID ID: 0000-0003-1477-3285;

А.Ю. Дубина, техник-исследователь лаборатории маркерной селекции, ORCID ID: 0000-0002-1432-7616;

Н.Т. Купрейшвили, техник-исследователь лаборатории маркерной селекции, ORCID ID: 0000-0002-1726-4390;

Т.Г. Дерова, ведущий научный сотрудник лаборатории иммунитета и защиты растений, ORCID ID: 0000-0001-7969-054X;

С.В. Подгорный, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории селекции и семеноводства озимой мягкой пшеницы интенсивного типа, ORCID ID: 0000-0002-8438-1327

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»,

347740, Ростовская обл., г. Зерноград, Научный городок, 3; e-mail: vniizk30@mail.ru

В настоящее время в России и в мире все более актуальной является проблематика улучшения продовольственной безопасности. Одной из основных выращиваемых во всем мире сельскохозяйственных культур является озимая мягкая пшеница. Устойчивые к основным листовым болезням сорта могут давать высокий урожай зерна. Таким образом, поиск и идентификация генов устойчивости является актуальной задачей. Целью данной работы являлась оценка генофонда озимой мягкой пшеницы коллекции СИММУТ (Мексика) по наличию гена возрастной устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34*. В изучении коллекционных образцов применяли следующие методы: выделение ДНК при помощи СТАВ, постановки ПЦР, проведения электрофореза на агарозных гелях. В результате проведенных исследований установлено наличие функционального аллеля гена *Lr 34* у 146 образцов озимой мягкой пшеницы из 411 изученных (наборы 20th IWWYT-SA, 21th IWWYT-IRR, 25th FAWWON-IRR, 25th FAWWON-SA). Идентифицировано 3 образца с гетерозиготным аллельным состоянием гена *Lr 34*. Определено 232 образца с не функциональным аллелем гена *Lr 34*. У 30 образцов озимой мягкой пшеницы амплификация фрагментов ДНК молекулярным маркером *csLV34* отсутствовала, что может свидетельствовать о значительной вариативности микросателлитной последовательности, на которую был разработан молекулярный маркер, в их генотипе. Устойчивостью в полевых условиях и на инфекционном поле обладал 121 образец озимой мягкой пшеницы из 146 несущих функциональный ген устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34*. Остальные 25 образцов с геном *Lr 34* относились к группе среднеустойчивых на инфекционном фоне. Идентифицированный 121 образец озимой мягкой пшеницы коллекции СИММУТ, имеющий ген *Lr 34*, с устойчивым типом реакции на поражение патогеном (например, 9919, 9921, 9928, 9809, 9811, 9812, 23, 24, 30, 262, 265, 266 и др.) предлагается использовать для пирамидирования в будущих селекционных программах на устойчивость к бурой ржавчине.

Ключевые слова: пшеница, бурая ржавчина, *Lr 34*, ген, идентификация, устойчивость.

Для цитирования: Вожжова Н.Н., Жогалева О.С., Дубина А.Ю., Купрейшвили Н.Т., Дерова Т.Г., Подгорный С.В. Оценка генофонда озимой мягкой пшеницы коллекции СИММУТ на присутствие гена *Lr 34* // Зерновое хозяйство России. 2021. № 6(78). С. 15–20. DOI: 10.31367/2079-8725-2021-78-6-15-20.



ESTIMATION OF THE GENE POOL OF THE CIMMYT COLLECTION WINTER BREAD WHEAT ON PRESENCE OF THE *LR 34* GENE

N.N. Vozhzhova, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher of the laboratory for cell breeding, nvozhzh@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2046-4000;

O.S. Zhogaleva, junior researcher of the laboratory for marker breeding, ORCID ID: 0000-0003-1477-3285;

A.Yu. Dubina, research technician of the laboratory for marker breeding, ORCID ID: 0000-0002-1432-7616;

N.T. Kupreyshvili, research technician of the laboratory for marker breeding, ORCID ID: 0000-0002-1726-4390;

T.G. Derova, leading researcher of the laboratory of plant immunity and protection, ORCID ID: 0000-0001-7969-054X;

S.V. Podgorny, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher of the laboratory for the breeding and seed production of winter bread wheat of intensive type, ORCID ID: 0000-0002-8438-1327

Agricultural Research Center "Donskoy",

347740, Rostov region, Zernograd, Nauchny Gorodok, 3; e-mail: vniizk30@mail.ru

Nowadays in Russia and in the world, the problem of improving food security is becoming more and more urgent. One of the main crops grown worldwide is winter bread wheat. Varieties resistant to main leaf diseases can produce large grain yields. Thus, the study and identification of resistance genes are of great importance. The purpose of the current work was to estimate the gene pool of winter bread wheat from the CIMMYT collection (Mexico) according to the age brown rust *Lr 34* resistance gene. In the study of collection samples, there have been used such methods as DNA extraction using CTAB, PCR, electrophoresis on agarose gels. As a result of the study, there has been identified a presence of a functional allele of the *Lr 34* gene in 146 winter bread wheat samples out of 411 studied ones (sets 20th IWWYT-SA, 21th IWWYT-IRR, 25th FAWWON-IRR, 25th FAWWON-SA). There have been identified three samples with a heterozygous allelic state of the *Lr 34* gene. There have been identified 232 samples with the non-functional *Lr 34* gene allele. 30 winter bread wheat samples had no amplification of DNA fragments with the molecular marker csLV34, which means a significant microsatellite sequence variability for which the molecular marker was developed in their genotype. 121 out of 146 winter bread wheat samples with the functional brown rust *Lr 34* resistance gene showed resistance in field conditions and in the infectious plots. The rest 25 samples with the *Lr 34* gene belonged to the group of moderately resistant ones in the infectious plots. The identified 121 CIMMYT collection winter bread wheat varieties, with the *Lr 34* gene possessing a resistant type of pathogen damage response (for example, 9919, 9921, 9928, 9809, 9811, 9812, 23, 24, 30, 262, 265, 266, etc.) have been recommended for use in leaf rust resistance pyramiding in future breeding programs.

Keywords: wheat, brown rust, *Lr 34*, gene, identification, resistance.

Введение. В настоящее время в России и в мире все более актуальной является проблематика улучшения продовольственной безопасности. Появление пандемии болезни COVID-19 оказало влияние на снижение темпов мирового экономического роста. При этом потребность в пище с каждым годом по мере увеличения численности населения планеты, возрастает. По данным ФАО, в 2020 году от голода страдали более 700 миллионов человек, проживающих в Африке, Азии и странах Латинской Америки и Карибского бассейна (FAO, 2021).

Озимая мягкая пшеница является одной из основных выращиваемых сельскохозяйственных культур во всем мире. Урожайные и устойчивые к основным листовым болезням сорта необходимы для обеспечения Российской продовольственной безопасности.

Бурая ржавчина относится к наиболее широко распространенным болезням озимой мягкой пшеницы и может приводить к значительным потерям урожая (Figueroa et al., 2018).

Гены возрастной устойчивости к бурой ржавчине, к которым относится ген *Lr 34*, позволяют растениям медленнее накапливать инфекцию при поражении, а в сочетании с другими генами устойчивости – оказывать эффективное сопротивление патогену (Khan et al., 2017).

Известно, что локус *Lr34/Yr18/Sr57/Pm38/Ltn1* локализован на коротком плече хромосомы 7D (Dyck, 1987) и используется в сортах озимой пшеницы, созданных за рубежом, совместно с еще 3-4 генами возрастной и ювенильной устойчивости (Ellis et al., 2014). Следовательно, для обеспечения устойчивости новых сортов требуется пирамидирование гена *Lr 34* с другими генами устойчивости, что обуславливает необходимость изучения имеющихся у селекционеров генотипов озимой мягкой пшеницы.

Таким образом, оценка генофонда коллекционного материала, полученного от CIMMYT, по наличию гена *Lr 34*, является актуальной задачей и целью настоящего исследования.

Материалы и методы исследований.

В качестве объекта исследования использовали 411 образцов озимой мягкой пшеницы из коллекции CIMMYT (наборы 20th IWWYT-SA, 21th IWWYT-IR, 25th FAWWON-IR, 25th FAWWON-SA) происхождением из таких стран, как США, Венгрия, Румыния, Россия, Турция, Франция, Казахстан, Украина и Канада. Все образцы выращивались в 2018–2019 гг. в полевых условиях питомника лаборатории селекции и семеноводства озимой мягкой пшеницы интенсивного типа (площадь делянки – 3 м², повторность 2-кратная) и на инфекционном фоне лаборатории иммунитета и защиты растений ФГБНУ «АНЦ «Донской» в соответствии с Методикой государственного сортоиспытания (2019) и Методикой полевого опыта (2014). В полевых условиях в качестве стандарта использовали сорт Ермак. В условиях инфекционного фона в качестве восприимчивого сорта использовали сорт Тарасовская 29.

Оценку пораженности растений бурой ржавчиной проводили по модифицированной шкале Кобба (Peterson et al., 1948; Roelfs et al., 1992), а образцы разделяли на группы устойчивости (R – высокоустойчивые и устойчивые (нет поражения, или нет пустул, но имеются некротические или хлоротические пятнышки различных размеров, или когда в месте пустул образуются четко выраженные хлорозные пятна, а пораженность листьев достигает 5–10%); MR – среднеустойчивые (пустулы очень мелкие, окружены хлоротичной зоной, пораженность листьев не более 10–30%); MS – слабовосприимчивые и средневосприимчивые (пустулы мелкие, пораженность листьев до 40–50%); S – восприимчивые и высоковосприимчивые (пустулы крупные, пораженность листьев до 75–100%)) согласно системе мониторинга болезней, вредителей и сорняков зерновых культур ФАО (Koyshybaev and Muminjanov, 2016).

Наблюдение метеорологических условий развития растений и патогена осуществляли по данным зерноградской метеорологической станции (рис. 1).

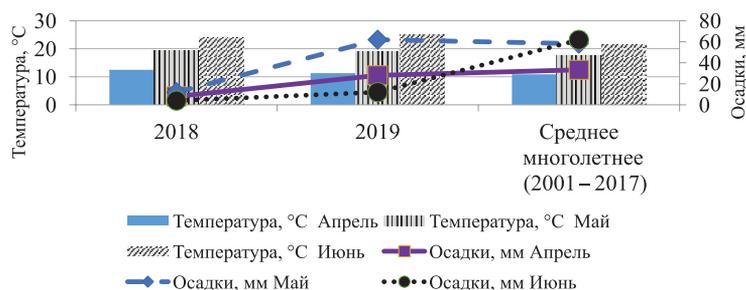


Рис. 1. Метеорологические условия апреля-июня 2018–2019 гг. по данным Зерноградской метеостанции
Fig. 1. Weather conditions in April-June of 2018–2019, according to the Zernograd meteorological station

При благоприятной температуре (до 25 °С) в апреле-июне 2018 г. выпало гораздо меньше осадков (8, 12 и 4 мм) по сравнению со средним многолетним (с 2001 по 2017 гг.) значением (33, 58 и 62 мм соответственно). Осадки мая 2019 г. вместе с комфортной для патогена температурой (19 °С) благоприятствовали росту и развитию бурой ржавчины, что позволило дифференцировать коллекцию на группы устойчивости.

Анализ наличия целевого гена выполняли в лаборатории маркерной селекции ФГБНУ «АНЦ «Донской». В качестве контроля использовали линию сорта Thatcher с геном *Lr 34*. Выделение ДНК из образцов проводили методом Murray M. G. (Murray and Thompson, 1980) при помощи коммерческого набора «ДНК-Экстран-3» (Синтол, Россия). Ген возрастной устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34* определяли кодоминантным STS-маркером *csLV34* согласно разработанному Lagudah E. S. et al. протоколу (Lagudah et al., 2006).

Продукты реакции визуализировали в 2% агарозном геле, окрашивали 0,1% раствором

EtBr в 0,5x TBE-буфере, и фотографировали в ультрафиолете в приборе Bio-Rad GelDoc XR+. Размер ампликонов на агарозном геле определяли маркером молекулярного веса Thermo Scientific GeneRuler 50+ bp (50-1000 bp). Оценку электрофореграмм проводили в программе Bio-Rad ImageLab 6.0.1. Анализ полученных данных выполняли в программах Microsoft Excel и Rstudio (RStudio Team, 2016) на языке R (R Core Team, 2018).

Результаты и их обсуждение. Все изучаемые образцы хорошо перезимовывали и созревали в полевых условиях Ростовской области. В годы исследования наблюдались засушливые условия, препятствующие значительному развитию бурой ржавчины.

Все образцы озимой мягкой пшеницы из коллекции CIMMYT в 2018 г. показывали высокую полевую устойчивость к бурой ржавчине, а в 2019 г. метеорологические условия позволили дифференцировать коллекцию на группы устойчивости (см. таблицу).

Распределение коллекционных образцов озимой мягкой пшеницы по группам устойчивости к бурой ржавчине Distribution of the collection winter bread wheat samples according to brown rust resistance groups

Код группы устойчивости	Группа устойчивости	Количество образцов	Оценка пораженности растений бурой ржавчиной	
			2018 г.	2019 г.
R	Высокоустойчивые	350	сл.	сл., 0–5
	Устойчивые		0–5	10–15
MR	Среднеустойчивые	26	0–5	15–20
MS	Слабовосприимчивые	13	0–5	20–30
	Средневосприимчивые			30–40
S	Восприимчивые	22	0–5	40–50
	Высоковосприимчивые			50–60, >60
–	Восприимчивый сорт Тарасовская 29	–	20–30	50–60

Большинство образцов относилось к группе устойчивых R (85,16%), в группе среднеустойчивых MR находилось 6,33%, в группе средневосприимчивых MS – 3,16%, а в группе восприимчивых S – 5,35%.

Вместе с тем, образцы озимой мягкой пшеницы анализировали в лаборатории маркерной селекции на наличие гена возрастной устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34*.

По литературным данным, молекулярные размеры ампликонов маркера *csLV34* состав-

ляют 150 пар нуклеотидов (п.н.) для функционального аллеля и 229 п.н. для не функционального аллеля (Lagudah et al., 2006).

В результате проведенного исследования 411 коллекционных образцов озимой мягкой пшеницы (CIMMYT, Мексика) нами был получен ряд электрофореграмм скрининга наличия гена возрастной устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34*. Одна из этих электрофореграмм представлена на рисунке 2.

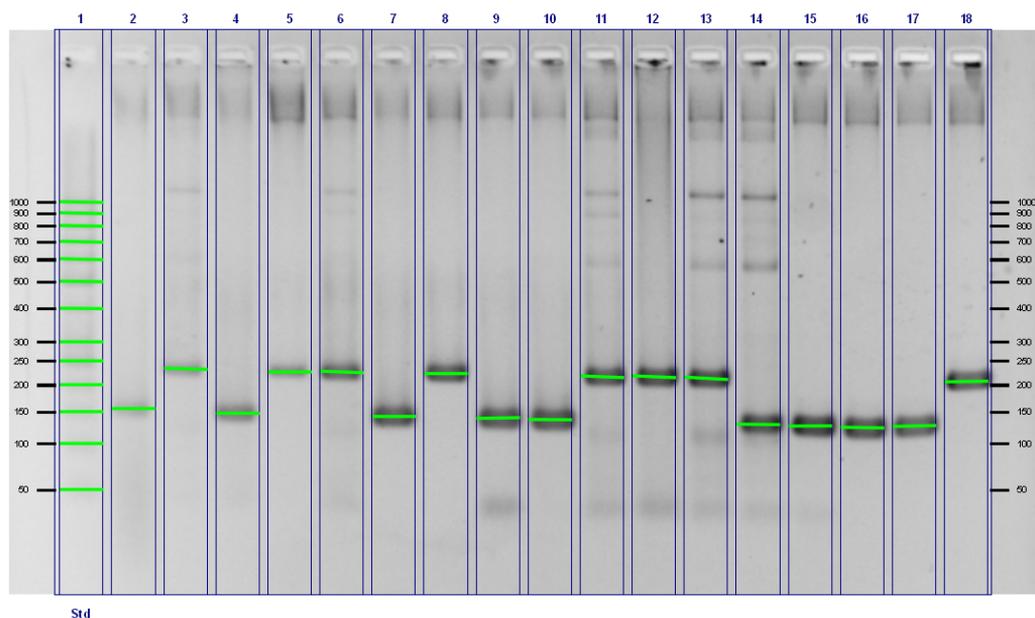


Рис. 2. Электрофореграмма скрининга наличия гена возрастной устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34* у образцов озимой мягкой пшеницы: 1 – Маркер молекулярного веса Thermo Scientific GeneRuler 50+ bp (100–1000 п.н.), 2 – TchrLr34 (положительный контроль), 3 – 9901, 4 – **9902**, 5 – 9903, 6 – 9904, 7 – **9905**, 8 – 9907, 9 – **9908**, 10 – **9909**, 11 – 9910, 12 – 9911, 13 – 9912, 14 – **9913**, 15 – **9914**, 16 – **9915**, 17 – **9916**, 18 – 9917.

Fig. 2. Electropherogram of screening for the presence of the age brown rust *Lr 34* resistance gene in the winter bread wheat samples: 1 – Molecular weight marker Thermo Scientific GeneRuler 50+ bp (100–1000 bp), 2 – TchrLr34 (positive control), 3 – 9901, 4 – **9902**, 5 – 9903, 6 – 9904, 7 – **9905**, 8 – 9907, 9 – **9908**, 10 – **9909**, 11 – **9910**, 12 – 9911, 13 – 9912, 14 – **9913**, 15 – **9914**, 16 – **9915**, 17 – **9916**, 18 – 9917.

Целевой фрагмент ДНК, размером 150 п.н., свидетельствующий о наличии функционального аллеля гена устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34*, был идентифицирован у образцов 9902, 9905, 9908, 9909, 9913, 9914, 9915 и 9916.

У образцов 9901, 9903, 9904, 9907, 9910, 9911, 9912 и 9917 был выявлен ампликон размером 229 п.н., соответствующий не функциональному аллелю гена *Lr 34*.

При изучении коллекции из 411 образцов озимой мягкой пшеницы, поступивших из CIMMYT, было идентифицировано наличие функционального аллеля гена устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34* у 146 образцов (35,52%), таких как: 9919, 9921, 9928, 9935, 9941, 9942 и др. из набора 20th IWWYT-SA; 9809, 9811, 9812, 9815, 9816 и др. из набора 21th IWWYT-IR; 23, 24, 30, 32, 35, 65 и др. из набора 25th FAWWON-IR; 260, 261, 262, 265, 266, 268 и др. из набора 25th FAWWON-SA (рис. 3).

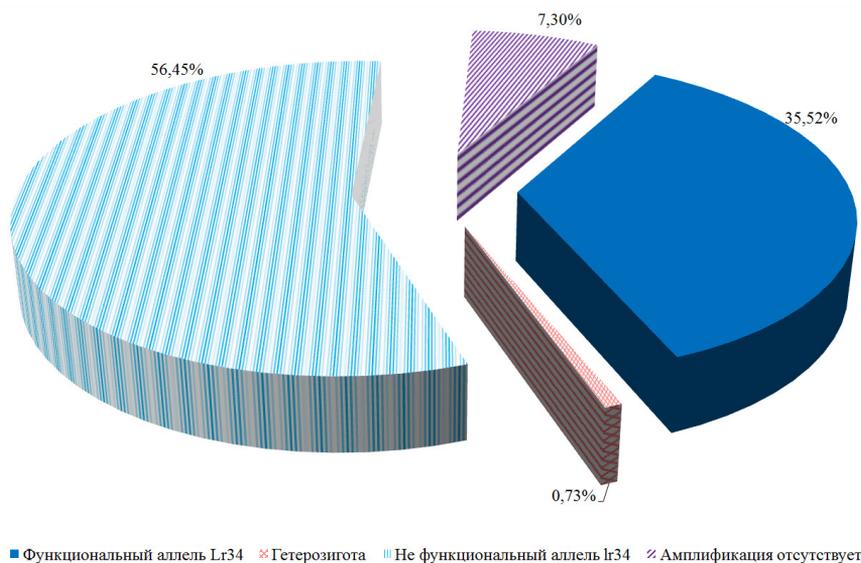


Рис. 3. Распределение аллелей гена возрастной устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34* у образцов озимой мягкой пшеницы из коллекции CIMMYT (Мексика)

Fig. 3. Distribution of leaf rust resistance gene *Lr 34* alleles in winter bread wheat samples from the CIMMYT collection (Mexico).

Гетерозиготное аллельное состояние гена *Lr 34* было идентифицировано у 0,73% образцов (всего – 3 шт.).

Не функциональный аллель гена *Lr 34* выявлен у 232 образцов (56,45%).

У 30 образцов амплификация фрагментов ДНК отсутствовала (7,3%), и ген *Lr 34* не был выявлен. Отсутствие амплификации у этих образцов озимой мягкой пшеницы из коллекции СИММУТ может свидетельствовать о значительной вариативности микросателлитной последовательности, на которую был разработан молекулярный маркер, в их генотипе.

Анализ группы устойчивых в полевых условиях и условиях инфекционного фона коллекционных образцов показал, что ген возрастной устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34* имеется лишь у 121 образца (что составляет 34,57% от всех образцов группы). Один образец – 9817 – был гетерозиготным. У 211 образцов (60,29%) наблюдалось наличие не функционального аллеля гена *Lr 34*, а у 17 образцов амплификация отсутствовала. Двадцать пять образцов из 146, у которых был идентифицирован функциональный аллель гена *Lr 34* относились к группе среднеустойчивых на инфекционном фоне, что может быть связано с отсутствием

в их генотипе других генов устойчивости к бурой ржавчине, которые при взаимодействии с геном *Lr 34* улучшают общую устойчивость растения к патогену.

Следовательно, образцы озимой мягкой пшеницы коллекции СИММУТ, не несущие функциональный ген возрастной устойчивости к бурой ржавчине *Lr 34*, но входящие в группу устойчивых образцов, несут в своем генотипе другие функциональные гены устойчивости, что требует дальнейших исследований.

Выводы. По результатам проведенных исследований рекомендуем использовать в селекционных программах, направленных на повышение устойчивости сортов озимой пшеницы к бурой ржавчине, идентифицированные образцы с функциональным аллелем гена *Lr 34*, одновременно входящие в группу «Устойчивые» по итогам оценки на инфекционном фоне – 121 образец из коллекции СИММУТ (9919, 9921, 9928, 9935, 9941, 9942, 9809, 9811, 9812, 9815, 9816, 23, 24, 30, 32, 35, 65, 260, 261, 262, 265, 266, 268 и др.). Они могут служить в качестве источника резистентности и основы для пирамидирования других генов в селекционных программах на устойчивость к болезням.

Библиографические ссылки

1. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М. 2019, 329 с.
2. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2014. 352 с.
3. Dyck P.L. The association of a gene for leaf rust resistance with the chromosome 7D suppressor of stem rust resistance in common wheat // *Genome*. 1987. V. 29(3). pp. 467-469. <https://doi.org/10.1139/g87-081>
4. Ellis J.G., Lagudah E.S., Spielmeier W., Dodds P.N. The past, present and future of breeding rust resistant wheat // *Front. Plant Sci*. 2014. V. 5. p. 641. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00641>.
5. Figueroa M., Hammond-Kosack K.E., Solomon P.S. A review of wheat diseases – a field perspective // *Mol Plant Pathol*. 2018. 19(6). pp. 1523-1536. <https://doi.org/10.1111/mp.12618>.
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/ru/>
7. Khan H., Bhardwaj S.C., Gangwar O.P., Prasad P., Kashyap P.L., Savadi S., Kumarand S., Rathore R. Identifying some Additional Rust Resistance Genes in Indian Wheat Varieties Using Robust Markers // *Cereal Research Communications*. 2017. V. 45(4). pp. 633–646. <https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.041>
8. Koyshybaev M., Muminjanov H. Guidelines for monitoring diseases, pests and weeds in cereal crops // Food and Agriculture Organization of the United Nations: Ankara. 2016. pp. 42.
9. Lagudah E.S., McFadden H., Singh R.P., Huerta-Espino J., Bariana H. S., Spielmeier W. Molecular genetic characterization of the *Lr34/Yr18* slow rusting resistance gene region in wheat // *Theor. Appl. Genet*. 2006. V. 114. P. 21-30. <https://doi.org/10.1007/s00122-006-0406-z>.
10. Murray M.G., Thompson W. F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA // *Nucleic Acids Res*. 1980. V. 8. pp. 4321-4325. <https://doi.org/10.1093/nar/8.19.4321>.
11. Peterson R.F., Campbell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals // *Canadian Journal of Research*. 1948. V. 26c. № 5. pp. 496-500. DOI: 10.1139/cjr48c-033.
12. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing // R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria. 2018.
13. Roelfs A.P., Singh R.P., Saari E.E. Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management // Mexico, D.F.: CIMMYT. 1992. 81 pages. URL: <https://rusttracker.cimmyt.org/wp-content/uploads/2011/11/rustdiseases.pdf>.
14. RStudio Team. RStudio: Integrated Development Environment for R // RStudio Inc.: Boston. MA. 2016.

References

1. Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Methodology of the State Variety Testing of agricultural crops]. M. 2019, 329 s.
2. Dospikhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) [Methodology of a field trial (with the basics of statistical processing of the study results)]. M.: Al'yans, 2014. 352 s.

3. Dyck P.L. The association of a gene for leaf rust resistance with the chromosome 7D suppressor of stem rust resistance in common wheat // *Genome*. 1987. V.29(3). pp. 467-469. <https://doi.org/10.1139/g87-081>.
4. Ellis J.G., Lagudah E.S., Spielmeier W., Dodds P.N. The past, present and future of breeding rust resistant wheat // *Front. Plant Sci.* 2014. V. 5. p. 641. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00641>.
5. Figueroa M., Hammond-Kosack K.E., Solomon P.S. A review of wheat diseases – a field perspective // *Mol Plant Pathol.* 2018. 19(6). pp. 1523-1536. <https://doi.org/10.1111/mpp.12618>.
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/ru/>.
7. Khan H., Bhardwaj S.C., Gangwar O.P., Prasad P., Kashyap P.L., Savadi S., Kumarand S., Rathore R. Identifying some Additional Rust Resistance Genes in Indian Wheat Varieties Using Robust Markers // *Cereal Research Communications*. 2017. V. 45(4). pp. 633–646. <https://doi.org/10.1556/0806.45.2017.041>.
8. Koyschybaev M., Muminjanov H. Guidelines for monitoring diseases, pests and weeds in cereal crops // Food and Agriculture Organization of the United Nations: Ankara. 2016. pp. 42.
9. Lagudah E.S., McFadden H., Singh R.P., Huerta-Espino J., Bariana H.S., Spielmeier W. Molecular genetic characterization of the *Lr34/Yr18* slow rusting resistance gene region in wheat // *Theor. Appl. Genet.* 2006. V. 114. P. 21-30. <https://doi.org/10.1007/s00122-006-0406-z>.
10. Murray M.G., Thompson W.F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA // *Nucleic Acids Res.* 1980. V. 8. pp. 4321-4325. <https://doi.org/10.1093/nar/8.19.4321>.
11. Peterson R.F., Campbell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals // *Canadian Journal of Research*. 1948. V. 26c. №5. pp. 496-500. DOI: 10.1139/cjr48c-033.
12. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing // R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria. 2018.
13. Roelfs A.P., Singh R.P., Saari E.E. Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management // Mexico, D.F.: CIMMYT. 1992. 81 pages. URL: <https://rusttracker.cimmyt.org/wp-content/uploads/2011/11/rustdiseases.pdf>.
14. RStudio Team. RStudio: Integrated Development Environment for R // RStudio Inc.: Boston. MA. 2016.

Поступила: 8.10.21; принята к публикации: 15.11.21.

Критерии авторства. Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторский вклад. Вожжова Н.Н. – концептуализация исследования, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи; Жогалева О.С., Дубина А.Ю., Купрейшвили Н.Т. – проведение лабораторных опытов; Дерова Т.Г. – оценка образцов на инфекционном фоне и сбор данных; Подгорный С.В. – проведение полевых опытов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.