

Научная статья

УДК 633.11:632.938

DOI: 10.30901/2658-6266-2022-2-03



## Характеристика устойчивости районированных сортов мягкой пшеницы к возбудителю желтой пятнистости

Н. М. Коваленко, Е. Л. Шайдаюк, Е. И. Гультяева

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Пушкин, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Ивановна Гультяева, eigulyaeva@gmail.com

Желтая пятнистость (пиренофороз) листьев – широко распространенное и экономически значимое заболевание пшеницы во всем мире. Выращивание устойчивых сортов – экологически безопасный метод контроля болезни. Цель данной работы – оценка сортов мягкой пшеницы, рекомендуемых для возделывания в Российской Федерации, по устойчивости к возбудителю желтой пятнистости и идентификация доминантного аллеля *Tsn1* с использованием молекулярного маркера. Изучили 39 сортов озимой и 31 сорт яровой пшеницы, впервые включенных в Государственный реестр селекционных достижений в 2018-2020 годах. Устойчивость оценивали в контролируемых условиях при искусственном заражении ювенильных растений и сегментов листьев. Использовали два изолята *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs, продуцирующих токсины ToxA (I\_ToxA) и ToxB (ToxB). Идентификация доминантного аллеля *Tsn1* выполнена с помощью маркера Xfcr623. Высокий уровень устойчивости (R) к обоим изолятам (I\_ToxA и I\_ToxB) показали яровые сорта ‘Гренада’ и ‘Силач’; умеренно устойчивыми (MR) были озимые сорта ‘Фелиция’ и ‘Ахмат’, а также яровые – ‘Омская 42’, ‘Зауральская жемчужина’, ‘Радира’, ‘Тарская 12’, ‘Экстра’. Устойчивой реакцией (R, MR) к изоляту I\_ToxA характеризовались 26% озимых сортов и 45% яровых. Число сортов, устойчивых к изоляту I\_ToxB, было существенно выше, 59% и 52%, для озимых и яровых сортов соответственно. Общая доля сортов, устойчивых к изоляту I\_ToxA (реакция R, MR) в коллекции озимой пшеницы составила 26, яровой – 45%; к изоляту I\_ToxB – 59 и 52%, соответственно. При использовании маркера Xfcr623 диагностический продукт амплификации выявлен у озимых сортов: ‘Бодрый’, ‘Кавалерка’, ‘Тимирязевка 150’, ‘Шеф’, ‘Анастасия’, ‘Барыня’, ‘Донская степь’, ‘Еланская’ и яровых: ‘Одета’, ‘Столыпинская 2’, ‘Ирень 2’, ‘ОМГАУ 100’. Все эти сорта умеренно восприимчивы к изоляту I\_ToxA, за исключением ‘Одета’ и ‘Ирень 2’, что указывает на снижение уровня экспрессии гена *ToxA* в генотипах этих сортов.

**Ключевые слова:** *Triticum aestivum*, пиренофороз, *Pyrenophora tritici-repentis*, устойчивость, молекулярные маркеры

**Благодарности:** Семена образцов яровой и озимой мягкой пшеницы были любезно предоставлены региональными селекционными учреждениями Российской Федерации.

**Для цитирования:** Коваленко Н.М., Шайдаюк Е.Л., Гультяева Е.И. Характеристика устойчивости районированных сортов мягкой пшеницы к возбудителю желтой пятнистости. *Биотехнология и селекция растений*. 2022;5(2):15-24. DOI: 10.30901/2658-6266-2022-2-03

Прозрачность финансовой деятельности. Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Коваленко Н.М., Шайдаюк Е.Л., Гультяева Е.И., 2022

## Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2022-2-03

## Characterization of commercial common wheat cultivars for resistance to tan spot causative agent

Nadezhda M. Kovalenko, Ekaterina L. Shaydayuk, Elena I. Gulyaeva

All-Russian Institute of Plant Protection, Pushkin, St. Petersburg, Russia

**Corresponding author:** Elena I. Gulyaeva, eigulyaeva@gmail.com

Tan spot of wheat (pyrenophorosis) is a worldwide spread and economically significant disease of wheat. Growing resistant cultivars is an environmentally friendly method of disease control. The aim of the present work was to assess tan spot resistance in common wheat cultivars recommended for cultivation in the Russian Federation, and to identify the dominant *Tsn1* allele using a molecular marker. The assessment involved 39 winter and 31 spring wheat cultivars included in the State Register of Selection Achievement in 2018-2020. Evaluation of wheat resistance was carried out in laboratory conditions under artificial inoculation of seedlings and leaf segments. Two isolates of *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs, producing ToxA toxin (I\_ToxA) and ToxB toxin (ToxB) were used. The dominant allele of the *Tsn1* gene was identified using the Xfcp623 marker. A high level of resistance (R) to both isolates (I\_ToxA and I\_ToxB) was shown by spring cultivars 'Grenada' and 'Silach'; moderate resistance (MR) was demonstrated by winter cultivars 'Felicia' and 'Akhmat' and spring cultivars 'Omskaya 42', 'Zauralskaya Zhemchuzhina', 'Radmira', 'Tarskaya 12' and 'Extra'. A resistant reaction (R, MR) to the isolate I\_ToxA was typical for 26% of winter cultivars and 45% of spring ones. The number of cultivars resistant to the I\_ToxB isolate was significantly higher (59% and 52%, respectively). The total fraction of cultivars resistant to the isolate I\_ToxA (reaction R, MR) in the collection of winter wheat was 26% and 45% in the spring wheat collection; while the fractions of cultivars resistant to the I\_ToxB isolate in these collections were equal to 59% and 52%, respectively. By using the Xfcp623 marker, the diagnostic product was amplified in winter cultivars 'Bodry', 'Kavalerka', 'Timiryazevka 150', 'Shef', 'Anastasia', 'Barynya', 'Donskaya Step', 'Elanskaya' and spring cultivars 'Odeta', 'Stolypinskaya 2', 'Iren 2' and 'OMGAU 100'. All these cultivars were moderately susceptible to the isolate I\_ToxA, with the exception of 'Odeta' and 'Iren 2', which may indicate a decrease in the expression level of the *ToxA* gene in genotypes of these cultivars.

**Keywords:** *Triticum aestivum*, tan spot, *Pyrenophora tritici-repentis*, resistance, molecular markers**Acknowledgments:** The seeds of spring and winter common wheat samples were kindly provided by regional breeding institutions of the Russian Federation.**For citation:** Kovalenko N.M., Shaydayuk E.L., Gulyaeva E.I. Characterization of commercial common wheat cultivars for resistance to tan spot causative agent. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2022;5(2):15-24. DOI: 10.30901/2658-6266-2022-2-03

Financial transparency. The authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the author, and his or her employer.

© Kovalenko N.M., Shaydayuk E.L., Gulyaeva E.I., 2022

## Введение

Желтая пятнистость (пиренофороз) листьев – широко распространенное и экономически значимое заболевание пшеницы во всем мире. В эпифитотийные годы потери урожая могут достигать 60% (Hirrell et al., 1990; Rees, Platz, 1979). Возбудитель болезни – фитопатогенный гриб *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs (*Ptr*), паразитирующий на культурных, кормовых и дикорастущих злаках из родов *Triticum* L., *Agropyron* Bieb, *Aegilops* L., *Bromus* L., *Agrostis* L., *Alopecurus* L., *Avena* L., *Hordeum* Pers., *Lolium* L., *Festuca* L., *Stipa* L., *Androgon* L., *Setaria* L., *Beckmannia* L. и других (Khokhryakov, 1953; Luz, Hosford, 1980; Krupinsky, 1988; 1992).

В России желтая пятнистость впервые зарегистрирована в 1985 году на Северном Кавказе (Granin, 1989). В 1990-х годах заболевание стало прогрессировать, усилилась его вредоносность (Kremneva, Volkova, 2007; Zashchepkin et al., 2015; Kokhmetova et al., 2021). В 2000-х годах было отмечено существенное расширение ареала патогена. В современный период желтая пятнистость представляет собой угрозу для урожая во всех регионах возделывания пшеницы. Распространению болезни способствует шадящая обработка почвы. Большое количество растительных остатков на поверхности почвы является благоприятной средой для накопления первичного инокулюма в посевах пшеницы (Mikhailova et al., 2012).

Возбудитель желтой пятнистости *P. tritici-repentis* в своем жизненном цикле имеет половую (сумчатую) и бесполоую (конидиальную) стадии развития. Конидии образуются на вегетирующих листьях пшеницы. Перитеции (половая стадия) формируются на пораженных растительных остатках и служат для перезимовки патогена. Аскоспоры в перитециях созревают весной и являются первичным инокулюмом для заражения посевов пшеницы (Pfender, Wootke, 1987). Заболевание развивается с момента всходов до окончания вегетации листьев пшеницы. Проявляется оно в виде мелких желто-коричневых пятен, окруженных желтой зоной. По мере развития болезни пятна срастаются и распространяются от верхушки листа к его основанию (Wiese, 1977; Mikhailova et al., 2012). L. Lamari и соавторы (Lamari et al., 1991) выделили два симптома желтой пятнистости: некроз и хлороз. Изоляты *P. tritici-repentis* различаются по способности вызывать некрозы (nec) и (или) хлорозы (chl). Патотип nec+chl+ вызывает некроз и хлороз, патотип nec+chl- – только некроз, патотип nec-chl+ – только хлороз; а при патотипе nec--chl- отсутствуют оба симптома (Lamari, Bernier, 1989).

Гриб *P. tritici-repentis* образует селективные токсины. Токсин Ptr ToxA является главным фактором патогенности и обуславливает развитие некрозов у сортов пшеницы с геном восприимчивости *Tsn1* (Lamari, Bernier, 1989; Tuori et al., 1995; Ciuffetti et al., 1997). Активность ToxA

влияет на «фитность» изолятов, которая выражается в уровне споруляции (способности развивать конидии). Чем выше активность токсина, тем скорее проявляется некроз, тем в большей степени осуществляется споруляция изолята (Tan et al., 2012). Токсины Ptr ToxB и Ptr ToxC вызывают хлорозы. Транскрипт гена *ToxB* наблюдается на ранних стадиях инфекции в мицелии и конидиях, как у устойчивых, так и у чувствительных растений. Более высокие уровни транскриптов ToxB коррелируют с более быстрым развитием аппрессориев (Amaike et al., 2008). ToxA и ToxB различаются по структуре и, соответственно, способствуют гибели клетки хозяина посредством разных механизмов. Реакции хозяина, вызванные действием ToxA, более быстрые и приводят к некрозу, тогда как изменения, вызванные ToxB, протекают медленнее и приводят к хлорозу (Ciuffetti et al., 2010). Для идентификации доминантного аллеля *Tsn1* у сортов пшеницы разработан молекулярный маркер Xfcp623, который рекомендован для использования в маркер-опосредованной (англ. marker-assisted selection) селекции на устойчивость к желтой пятнистости (Faris et al., 2010; 2012).

Выращивание устойчивых сортов – экологически безопасный метод контроля болезни. Л.А. Михайлова и соавторы (Mikhailova et al., 2012) проанализировали свыше 1000 образцов озимой и яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР различного географического происхождения и определили, что частота устойчивых форм среди образцов озимой пшеницы выше, чем среди яровых. Высокую представленность устойчивые озимые формы имели среди образцов из США, Италии и Чехии (31%), а яровых – из Бразилии. Скрининг по устойчивости к желтой пятнистости 209 сортов озимой и 136 сортов яровой пшеницы, включенных в Государственный реестр селекционных достижений РФ до 2010 года показал, что около 40% сортов озимой пшеницы и 16% яровой характеризовались разными уровнями устойчивости к *P. tritici-repentis* (Mikhailova et al., 2012).

Цель данной работы – оценка устойчивости к возбудителю желтой пятнистости в фазе проростков сортов мягкой пшеницы, рекомендуемых для возделывания в РФ в 2018-2020 годах, и идентификация у них доминантного аллеля *Tsn1* с использованием молекулярного маркера.

## Материал и методы

Материал исследований был представлен сортами озимой (39) и яровой (31) мягкой пшеницы, впервые включенными в Государственный реестр селекционных достижений в 2018-2020 годах (табл. 1) (State Register for Selection Achievements, 2022). Семена данных образцов были любезно предоставлены региональными селекционными учреждениями Российской Федерации.

**Таблица 1. Характеристика допущенных к использованию в Российской Федерации сортов озимой и яровой пшеницы по устойчивости к возбудителю желтой пятнистости в фазе проростков**

**Table 1. Characterization of tan spot resistance at the seedling stage in commercial winter and spring wheat cultivars admitted for the use in the Russian Federation**

№/ N	Сорт/ Cultivar	Год допуска/ Year of admittance	Наличие маркера/ Presence of the Xfcp623 marker	Тип реакции на заражение изолятами/ Type of reaction to artificial inoculation with <i>P. tritici-repentis</i>	
				I <sub>тоxA</sub>	I <sub>тоxB</sub>
<b>Озимая пшеница/ Winter wheat</b>					
1	‘Базис’	2018	*	1-2/2	1/2-3
2	‘Ваня’	2018	*	3/3	1-3/1-3
3	‘Граф’	2018	*	3/3	2-3/2
4	‘Степь’	2018	*	2/2-3	2-3/2-3
5	‘Арсенал’	2019	-	3/3	1-2/1
6	‘Базальт 2’	2019	-	3/3	2/2
7	‘Бодрый’	2019	+	3/3	2-3/3
8	‘Видея’	2019	-	3/3	1-3/3
9	‘Герда’	2019	-	3/3	1-2/2-3
10	‘Донмира’	2019	-	2-3/3-4	1/1
11	‘Иридаc’	2019	-	1-2/1	1/1
12	‘Кавалерка’	2019	+	2/2-3	1/1
13	‘Корона’	2019	-	3/3	1/1
14	‘Маркиз’	2019	-	2-3/2-3	2/2-3
15	‘Собербаш’	2019	-	2/2	1-2/1-3
16	‘Стать’	2019	-	2-3/3	1/1
17	‘СТРГ 8060 15’	2019	-	1-3/1-3	1-2/1-2
18	‘Тимирязевка 150’	2019	+	3/3	2-3/2
19	‘Фелиция’	2019	-	1/2	1-2/2
20	‘Шеф’	2019	+	2-3/2-3	1/1
21	‘Этюд’	2019	+	2-3/2-3	1-2/2
22	‘Акапелла’	2020	-	3/3	1-3/1-3
23	‘Альтернатива’	2020	-	3/3	1-2/2-3
24	‘Анастасия’	2020	+	3/3	1/1
25	‘Армада’	2020	-	1-2/1	1-2/3
26	‘Ахмат’	2020	-	1-2/1-2	2/2,1/1
27	‘Барыня’	2020	+	3/3	1/1
28	‘Былина Дона’	2020	-	1-2/1-3	1-2/0
29	‘Вольница’	2020	-	2/2	3/3
30	‘Вольный Дон’	2020	-	1-2/1-2	2-3/2-3
31	‘Вьюга’	2020	-	1-2/1-2	1/1
32	‘Гомер’	2020	-	3/3	2/2
33	‘Донская степь’	2020	+	3/3	1/1
34	‘Еланская’	2020	+	3/3	1-2/1-2
35	‘Еланчик’	2020	-	1/1	2/2
36	‘Жаворонок’	2020	-	1-2/2	1/1

№/ N	Сорт/ Cultivar	Год допуска/ Year of admittance	Наличие маркера/ Presence of the Xfcp623 marker	Тип реакции на заражение изолятами/ Type of reaction to artificial inoculation with <i>P. tritici-repentis</i>	
				I_тоxA	I_тоxB
37	‘Паритет’	2020	-	3/3	1-2/2-3
38	‘Секлетия’	2020	-	2/2-3	1-2/1-2
39	‘Цефей’	2020	-	1-2/1-3	3/3
<b>Яровая пшеница/ Spring wheat</b>					
40	‘Бурлак’	2019	-	3/3	3/3
41	‘Гренада’	2019	-	1/1	1/1
42	‘КВ 240 3 13’	2019	-	1-2/2	1-2/3
43	‘Корнетто’	2019	-	1/1	1-2/1-2
44	‘Нерда’	2019	-	2/2-3	2/2-3
45	‘Одега’	2019	+	2/2	2/2-3
46	‘Омская 42’	2019	-	2/1-2	1-2/1
47	‘Омская юбилейная’	2019	-	2/2-3	3/3
48	‘Старт’	2019	-	2-3/3	1-2/2
49	‘Столыпинская 2’	2019	+	3/3	3/3
50	‘Экада 214’	2019	-	1-2/1-2	1-2/2-3
51	‘Александрит’	2020	-	1-2/1-2	3/3
52	‘Арсея’	2020	-	3/3	3/3
53	‘Гаренда’	2020	-	3/3	1/1
54	‘Зауральская волна’	2020	-	3/3	2-3/2
55	‘Зауральская жемчужина’	2020	-	1-2/2	1-2/1
56	‘Зауральский янтарь’	2020	-	3/3	1-2/0
57	‘Изера’	2020	-	2-3/2	1-2/2
58	‘Ирень 2’	2020	+	1-2/0	2/2-3
59	‘Калинка’	2020	-	1-3/3	1-2/1
60	‘Краснозёрка’	2020	-	3-4/3-4	2/2
61	‘Лидер 80’	2020	-	1/1	1/2
62	‘Лютеция’	2020	-	2-3/2-3	3/3
63	‘ОМГАУ 100’	2020	+	3/3	3/3
64	‘Оренбургская юбилейная’	2020	-	1-3/1	3/3
65	‘Радмира’	2020	-	1-2/1-2	1/2
66	‘Силач’	2020	-	1/0	1-2/0
67	‘Тарская 12’	2020	-	1-2/1-2	1-2/1-2
68	‘Токката’	2020	-	2-3/2-3	3/3
69	‘Флоренс’	2020	-	3/3	1/0
70	‘Экстра’	2020	-	1-2/2	1-2/1-2

Примечание: «+» – наличие диагностического фрагмента маркера Xfcp623, «-» – отсутствие диагностического фрагмента, \* – молекулярный анализ сорта не проводили.

Типы реакции: хлороз/некроз 1/0, 1/1,1/2,2/1 – устойчивость, 1-2/0, 2/2,2/3 – умеренная устойчивость, 3/2,3/3,3/4 – восприимчивость.

Note: “+” means the presence of the Xfcp623 marker diagnostic fragment, “-” means the absence of the diagnostic fragment, \* means that the molecular analysis of the cultivar was not performed.

Reaction types: chlorosis/necrosis 1/0,1/1,1/2,2/1 – resistance, 1-2/0, 2/2,2/3 – medium resistance, 3/2,3/3,3/4 – susceptibility.

Для инокуляции сортов использовали два изолята *P. tritici-repentis*. Изолят I\_ToxA был выделен из северо-западной популяции патогена (Ленинградская обл., Гатчинский сортоучасток), собранной с озимого сорта 'Инна', а I\_ToxB – из северо-казахстанской популяции, собранной с ярового сорта 'Айна'. Вирулентность изолятов к сортам-дифференциаторам была охарактеризована в предварительных исследованиях. Согласно анализу вирулентности, фенотип изолята I\_ToxA соответствовал расе 2, продуцирующей ToxA, а фенотип изолята I\_ToxB – расе 5, продуцирующей ToxB. Наличие токсинов у этих изолятов подтверждено нами с использованием молекулярных маркеров.

Для заражения сортов пшеницы изоляты выращивали на среде V6 в течение шести суток (Mikhailova et al., 2012). Инокуляцию растений пшеницы проводили водной суспензией спор в концентрации  $2-3 \times 10^3$  конидиоспор/мл.

Использовали сегменты листьев, сохраненные в 0,004% водном растворе бензимидазола и 8-10 дневные проростки пшеницы, выращенные в сосудах с почвой. Для инокуляции сегментов листьев была использована методика, описанная Михайловой и соавторами (Mikhailova et al., 2012). Сосуды с проростками пшеницы после инокуляции накрывали каркасом с натянутым полиэтиленом для создания влажной камеры и выдерживали в темноте в течение 12 ч при температуре 20°C. Затем каркасы снимали и растения инкубировали в условиях светустановки при температуре 20-22°C и освещенности 3000 люкс с фотопериодом 16 ч. день/8 ч. ночь.

Тип реакции сегментов определяли на 5-6 сутки; интактных растений – на 7-8 сутки. Использовали балловую шкалу, характеризующую степень развития некрозов и хлорозов (табл. 2) (Mikhailova et al., 2012).

**Таблица 2. Шкала оценки устойчивости пшеницы к *P. tritici-repentis***

**Table 2. Scale for evaluating resistance to *P. tritici-repentis* in wheat**

Симптомы поражения/ Lesion symptoms	Тип реакции/ Reaction type	Фенотип устойчивости*/ Resistance phenotype
Мелкие черные или темно-коричневые пятна размером до 0,5 мм, хлоротичные пятна отсутствуют или мало заметны	1/0, 1/1	R
Мелкие черные или темно-коричневые пятна 0,5-1,0 мм, хлоротичные пятна до 2 мм	1/2, 2/1, 2/2,	MR
Темно-коричневые пятна до 1,0 мм, хлоротичные пятна до 2-3 мм	2/3, 2/4	MS
Темно-коричневые пятна до 2 мм, хлоротичные пятна до 5 мм	3/2, 3/3, 3/4	S
Коричневые, сливающиеся пятна, мацерация ткани листа	4/3, 4/4, 4/5, 5/4, 5/5	HS

Примечание: над чертой – балл развития некроза, под чертой – балл развития хлороза.

\*R – устойчивость, MR – умеренная устойчивость, MS – умеренная восприимчивость,

S – восприимчивость, HS – высокая восприимчивость

Note: above the line – necrosis development score, below the line – chlorosis development score.

\*R – resistance, MR – moderate resistance, MS – moderate susceptibility, S – susceptibility,

HS – high susceptibility

Для идентификации доминантного аллеля *Tsn1* использовали маркер Xfcp623. Характеристика его и условия проведения ПЦР представлены в таблице 3. Наличие продукта амплификации маркера указывает на наличие доминантного аллеля гена *Tsn1* (восприимчивость к болезни), отсутствие – рецессивного аллеля *tsn1*. Продукты амплификации разделяли в 1,5% агарозном геле, с добавлением бромистого этидия. В качестве маркера молекулярного веса использовали 100 bp ДНК маркер фирмы «Диалат» (URL: <http://dialat.ru/f/m100rus.pdf>).

### Результаты и обсуждение

В работе произведена оценка ювенильной устойчиво-

сти 70 российских сортов озимой и яровой мягкой пшеницы. Высокий уровень устойчивости (R) к обоим изолятам (I\_ToxA и I\_ToxB) определен у яровых сортов 'Гренада' и 'Силач' (табл. 1, 4). Озимый сорт 'Еланчик' и яровые: 'Корнетто', 'Лидер 80', 'Силач' – имели высокий уровень устойчивости к изоляту I\_ToxA, а озимые сорта: 'Донмира', 'Ирида', 'Кавалерка', 'Корона', 'Стать', 'Фелиция', 'Анастасия', 'Барыня', 'Вьюга', 'Донская степь', 'Жаворонок' и яровой 'Флоренс' – к изоляту I\_ToxB. Число сортов, устойчивых к изоляту I\_ToxB, среди образцов озимой пшеницы было существенно выше, чем среди яровых форм.

Таблица 3. Характеристика маркера Xfcp623 и условия ПЦР  
Table 3. Characteristic of the Xfcp623 marker and PCR conditions

Праймер/ Primer	Последовательность/ Sequence	Размер ампликона/ Amplicon size	Условия ПЦР/ PCR reaction conditions	Источники/ References
Xfcp623 F Xfcp623 R	СТАТTCGТААТCGTGCCTTCCG CCTTCTCTCTCACCGSTATCTCATC	380 пн	94°C – 3 мин., 45 циклов (94°C – 30 сек., 60°C – 30 сек., 72°C – 1 мин), 72°C – 5 мин	Röder et al., 1998; Faris et al., 2010; Zhang et al., 2009

Таблица 4. Сорты мягкой пшеницы, устойчивые к *P. tritici-repentis*  
Table 4. Common wheat cultivars resistant to *P. tritici-repentis*

Тип реакции/ Reaction type	Устойчивые озимые сорта/ Resistant winter cultivars		Устойчивые яровые сорта/ Resistant spring cultivars		Устойчивые озимые и яровые сорта/ Resistant winter and spring cultivars, %	
	I_ToxA	I_ToxB	I_ToxA	I_ToxB	I_ToxA	I_ToxB
R	‘Еланчик’	‘Донмира’, ‘Иридаc’, ‘Кавалерка’, ‘Корона’, ‘Стать’, ‘Фелиция’, ‘Анастасия’, ‘Барыня’, ‘Вьюга’, ‘Донская степь’, ‘Жаворонок’	Гренада, Силач  ‘Корнетто’, ‘Лидер 80’	‘Гаренда’, ‘Флоренс’	7	21
MR	‘Фелиция’, ‘Ахмат’  ‘Базис’, ‘Иридаc’, ‘Собербаш’, ‘Армада’, ‘Вьюга’, ‘Вольный Дон’, ‘Жаворонок’	‘Арсенал’, ‘Базальт 2’, ‘Этюд’, ‘СТРГ 8060 15’, ‘Былина Дона’, ‘Гомер’, ‘Еланская’, ‘Еланчик’, ‘Секлетия’	‘Омская 42’, ‘Зауральская жемчужина’, ‘Радмира’, ‘Тарская 12’, ‘Экстра’  ‘КВ 240 313’, ‘Одета’, ‘Экада 214’, ‘Александрит’, ‘Ирень 2’	‘Корнетто’, ‘Старт’, ‘Зауральский янтарь’ ‘Изера’, ‘Калинка’, ‘Краснозёрка’, ‘Лидер 80’, ‘Лютеция’	27	34

Умеренно устойчивую реакцию (MR) к обоим изолятам показали 10% изученных сортов (озимые: ‘Фелиция’, ‘Ахмат’; яровые: ‘Омская 42’, ‘Зауральская жемчужина’, ‘Радмира’, ‘Тарская 12’, ‘Экстра’); к изоляту I\_ToxA – 17% сортов (7 озимых, 5 яровых); к изоляту I\_ToxB – 26% (10 озимых, 8 яровых) (см. табл. 4).

Общая доля сортов устойчивых к изоляту I\_ToxA (реакция R, MR) в коллекции озимой пшеницы составила 26%, яровой – 45%; к изоляту I\_ToxB – 59% и 52%, соответственно.

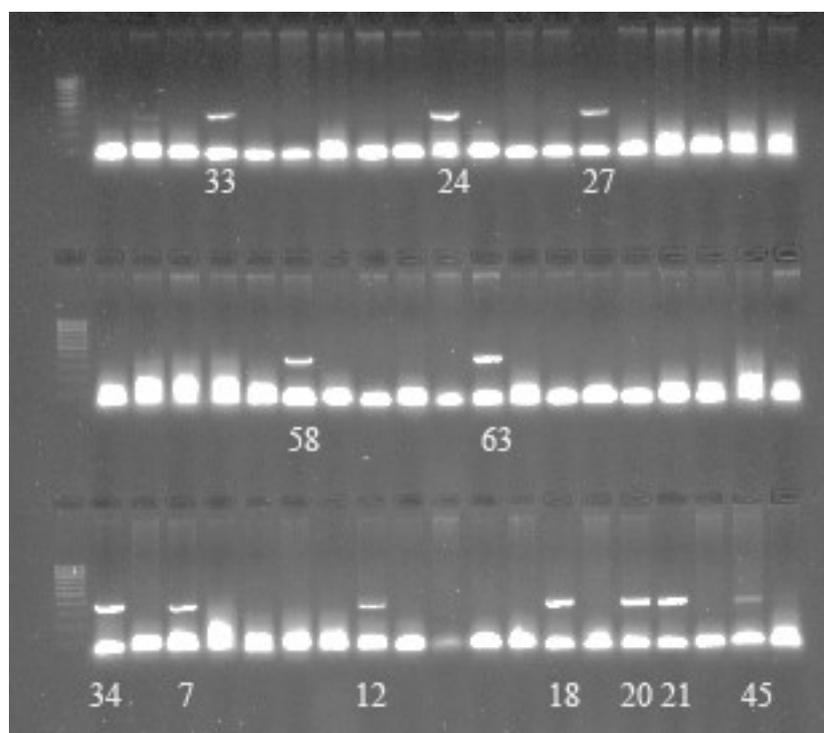
При использовании маркера Xfcp623, диагностический продукт, результат реакции амплификации, был выявлен у озимых сортов ‘Бодрый’, ‘Кавалерка’, ‘Тимирязевка 150’, ‘Шеф’, ‘Анастасия’, ‘Барыня’, ‘Донская степь’, ‘Еланская’ и у яровых: ‘Одета’, ‘Столыпина 2’, ‘Ирень 2’, ‘ОМГАУ 100’. Пример электрофореграммы представлен на рисунке. Перечисленные сорта умеренно

восприимчивы к изоляту I\_ToxA, за исключением ‘Одета’ и ‘Ирень 2’. Вероятно, у последних присутствуют иные эффекторы. Показано, что чувствительность генотипов пшеницы к Ptr ToxA не всегда коррелирует с восприимчивостью к расам, продуцирующим токсин ToxA (Mironenko, Kovalenko, 2018; Manning, Ciuffetti, 2015; Phan et al., 2016; See et al., 2018).

Токсин Ptr ToxA привнесен в геном *P. tritici-repentis* путем горизонтального переноса от *Parastagonospora nodorum* Quaedvlieg, Verkley & Crous. Это обусловило существенное расширение спектра вирулентности ранее малозначимого патогена пшеницы (Friesen et al., 2006). Н.В. Мироненко с соавторами (Mironenko et al., 2019) проанализировали коллекцию изолятов *P. tritici-repentis* из южных, северных и западносибирских регионов РФ, Финляндии и Казахстана, полученную в 2017-2018 годах, по расовому составу и наличию в них генов *ToxA* и *ToxB*.

Ген *ToxB* не был обнаружен в изученной коллекции. Отсутствие или редкая встречаемость изолятов, продуцирующих данный токсин, была показана и в других странах (Ali et al., 2010; Antoni et al., 2010; Moreno et al., 2015; See et al., 2018). Представленность гена *ToxA* варьировала у изученных образцов популяций *P. tritici-repentis*.

В российской северокавказской и юго-восточной казахстанской популяциях частота изолятов *ToxA*<sup>+</sup> составляла 100%, а в других варьировала от 5,5% (западносибирская омская популяция) до 66% (финская популяция) (Mironenko et al., 2019).



**Рисунок. Электрофореграммы продуктов амплификации маркера Xfcp623 у сортов пшеницы.**  
Номера указаны для образцов с положительным результатом амплификации маркера (соответствуют номерам образцов в таблице 1).

**Figure. Electrophoregram of marker Xfcp623 amplification products from wheat cultivars.**  
Numbers are indicated for the “positive” accessions only and correspond to the accession numbers in Table 1.

Высокая представленность в российских популяциях изолятов *ToxA* указывает на то, что наибольший практический интерес для селекции представляют сорта пшеницы, которые характеризуются устойчивостью к изоляту I *ToxA*, у которых при молекулярном скрининге отсутствовал продукт амплификации маркера Xfcp623.

### Заклучение

В результате скрининга 70 сортов мягкой пшеницы, впервые включенных в Государственный реестр селекционных достижений РФ в 2018-2020 годах, выявлено значительное число образцов, устойчивых к возбудителю желтой пятнистости. Доля сортов, устойчивых в фазе проростков к изолятам, продуцирующим токсины *ToxA* и *ToxB*, составила 13%; к изоляту *ToxA* – 21%; к изоляту *ToxB* – 43%. Образцы данных сортов могут быть рекомендованы для селекции в качестве доноров устойчиво-

сти пшеницы к возбудителю желтой пятнистости.

### Литература/References

- Ali S., Gurung S., Adhikari T.B. Identification and characterization of novel isolates of *Pyrenophora tritici-repentis* from Arkansas. *Plant Disease*. 2010;94(2):229-235. DOI: 10.1094/PDIS-94-2-0229
- Amaike S., Ozga J.A., Basu U., Strelkov S.E. Quantification of *ToxB* gene expression and formation of appressoria by isolates of *Pyrenophora tritici-repentis* differing in pathogenicity. *Plant Pathology*. 2008;57:623-633. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2007.01821.x
- Antoni E.A., Rybak K., Tucker M.P., Hane J.K., Solomon P., Drenth A., Shanka M., Oliver R. Ubiquity of *ToxA* and absence of *ToxB* in Australian populations of *Pyrenophora tritici-repentis*. *Australasian Plant Pathology*. 2010;39:63-68. DOI: 10.1071/AP09056
- Ciuffetti L.M., Manning V.A., Pandelova I., Betts M.F., Martinez P. Host-selective toxins, Ptr *ToxA* and Ptr *ToxB*, as necrotrophic effectors in the *Pyrenophora tritici-repentis* wheat interaction. *New Phytologist*. 2010;187:911-919. DOI: 10.1111/j.1469-

- Ciuffetti L.M., Tuori R.P., Gavena J.M. A single gene encodes a selective toxin causal to the development of tan spot of wheat. *Plant Cell*. 1997;9(2):135-144. DOI: 10.1105/tpc.9.2.135
- Faris J.D., Abeyssekara N.S., McClean P.E., Xu S.S., Friesen T.L. Tan spot susceptibility governed by the *Tsn1* locus and race-nonspecific resistance quantitative trait loci in a population derived from the wheat lines Salamouni and Katepwa. *Molecular Breeding*. 2012;30:1669-1678. DOI: 10.1007/s11032-012-9750-7
- Faris J.D., Zhang Z., Lu H.J., Lu S.W., Reddy L., Cloutier S., Fellers J.P., Meinhardt S.W., Rasmussen J.B., Xu S.S., Oliver R.P., Simons K.J., Friesen T.L. A unique wheat disease resistance-like gene governs effector-triggered susceptibility to necrotrophic pathogens. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2010;107:13544-13549. DOI: 10.1073/pnas.1004090107
- Friesen T.L., Faris J.D., Lai Z., Steffenson B.J. Identification and chromosomal location of major genes for resistance to *Pyrenophora teres* in a doubled-haploid barley population. *Genome*. 2006;49:855-859. DOI: 10.1139/g06-024
- Granin E.F., Monastyrskaya E.M., Kraeva G.A., Kochubey K. Yu. Pyrenophorosis of winter wheat in the North Caucasus. *Zashchita rasteniy = Plant protection*. 1989;12:21. [in Russian] (Гранин Е.Ф., Монастырская Э.М., Краева Г.А., Кочубей К.Ю. Пиренофороз озимой пшеницы на Северном Кавказе. *Защита растений*. 1989;12:21).
- Hirrell M.C., Spradley J.P., Mitchell J.K., Wilson E.W. First report of tan spot caused by *Drechslera tritici-repentis* on winter wheat in Arkansas. *Plant Disease*. 1990;74(3):252.
- Khokhryakov M.L. Morphological and biological substantiation of the taxonomy of fungi of the genus *Helminthosporium* (sensu lato) on cereals (Morfologo-biologicheskoye obosnovaniye sistematiки грибов рода *Helminthosporium* (sensu lato) na zlakakh) [dissertation]. Leningrad: VIZR; 1953. [in Russian] (Хохряков М.Л. Морфолого-биологическое обоснование систематики грибов рода *Helminthosporium* (sensu lato) на злаках: диссертация на соискание степени доктора биологических наук. Ленинград: ВИЗР; 1953).
- Kokhmetova A, Sehgal D, Ali S, Atishova M, Kumarbayeva M, Leonova I, Dreisigacker S. Genome-wide association study of tan spot resistance in a hexaploid wheat collection from Kazakhstan. *Frontiers in Genetics*. 2021;11:581214. DOI: 10.3389/fgene.2020.581214
- Kremneva O.Yu., Volkova G.V. Population structure of *Pyrenophora tritici-repentis* in the North Caucasus on virulence and morphological traits. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2007;41(4):356-361. [in Russian] (Кремнева О.Ю., Волкова Г.В. Структура популяции *Pyrenophora tritici-repentis* на Северном Кавказе по вирулентности и морфолого-культуральным признакам. *Микология и фитопатология*. 2007;41(4):356-361).
- Krupinsky J.M. Aggressiveness of *Pyrenophora tritici-repentis* from alternative hosts. *Phytopathology*. 1988;78(12):1526.
- Krupinsky J.M. Grass hosts of *Pyrenophora tritici-repentis*. *Plant Disease*. 1992;76(1):92-95.
- Lamari L., Bernier C.C. Evaluation of wheat lines and cultivars to tan spot based on lesion type. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 1989;11(1):49-56.
- Lamari L., Bernier C.C., Smith R.B. Wheat genotypes that develop both tan necrosis and extensive chlorosis in response to isolates of *Pyrenophora tritici-repentis*. *Plant Pathology*. 1991;75(2):121-122.
- Luz W.C., Hosford R.M. Twelve *Pyrenophora trichostoma* races for virulence of wheat in central plains of North America. *Phytopathology*. 1980;70(12):1193-1196.
- Manning V.A., Ciuffetti L.M. Necrotrophic effector epistasis in the *Pyrenophora tritici-repentis*-wheat interaction. *PLoS One*. 2015;10(4):e0123548. DOI: 10.1371/journal.pone.0123548
- Mikhailova L.A., Mironenko N.V., Kovalenko N.M. Yellow blotch of wheat (Zheltaya pyatnistost pshenitsy). Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu populyatsiy vzbuditelya zheltoy pyatnistosti *Pyrenophora tritici-repentis* i ustoychivosti sortov = Guidelines for the study of populations of the yellow spot pathogen *Pyrenophora tritici-repentis* and resistance of varieties. St. Petersburg 2012. [in Russian] (Михайлова Л.А., МIRONENKO Н.В., КОВАЛЕНКО Н.М. Желтая пятнистость пшеницы. Методические указания по изучению популяций возбудителя желтой пятнистости *Pyrenophora tritici-repentis* и устойчивости сортов Санкт-Петербург. 2012).
- Mironenko N.V., Kovalenko N.M. Peculiarities of interaction of *Tsn1* and *ToxA* genes in *Triticum aestivum* – *Pyrenophora tritici-repentis* pathosystem. *Plant Protection News*. 2018;2(96):12-16. [in Russian] (МIRONENKO Н.В., КОВАЛЕНКО Н.М. Особенности взаимодействия генов *Tsn1* и *ToxA* в патосистеме *Triticum aestivum* – *Pyrenophora tritici-repentis*. *Вестник защиты растений*. 2018;2(96):12-16).
- Mironenko N.V., Kovalenko N.M., Baranova O.A. Characteristics of the geographically distant populations of *Pyrenophora tritici-repentis* in terms of virulence and *ToxA* and *ToxB* toxin-forming genes. *Plant Protection News*. 2019;1(99):24-29. [in Russian] (МIRONENKO Н.В., КОВАЛЕНКО Н.М., БАРАНОВА О.А. Характеристика географически отдаленных популяций *Pyrenophora tritici-repentis* по вирулентности и генам токсинообразования *ToxA* и *ToxB*. *Вестник защиты растений*. 2019;1(99):24-29).
- Moreno M.V., Stenglein S., Perello A.E. Distribution of races and *Tox* genes in *Pyrenophora tritici-repentis* isolates from wheat in Argentina. *Tropical Plant Pathology*. 2015;40(2):141-146. DOI: 10.1007/s12256-015-0011-2
- Pfender W.F., Wootke S.L. Production of pseudothecia and ascospores by *P. tritici-repentis* in response to macronutrient concentration. *Phytopathology*. 1987;77(8):1213-1216.
- Phan H.T.T., Rybak K., Furuki E., Breen S., Solomon P.S., Oliver R.P., Tan K.C. Differential effector gene expression underpins epistasis in a plant fungal disease. *The Plant Journal*. 2016;87:343-354. DOI: 10.1111/tbj.13203
- Rees R.G., Platz G.J. The occurrence and control of yellow spot of wheat in north-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*. 1979;19(98):69-372.
- Röder M.S., Korzun V., Wendehake K., Plaschke J., Tixier M.H., Leroy Ph., Ganal M.W. A microsatellite map of wheat. *Genetics*. 1998;149:2007-2023. DOI: 10.1093/genetics/149.4.2007
- See P.T., Marathamuthu K.A., Igallo E.M., Oliver R.P., Moffat C.S. Evaluating the importance of the tan spot *ToxA-Tsn1* interaction in Australian wheat varieties. *Plant Pathology*. 2018;67:1066-1075. DOI: 10.1111/ppa.12835
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol.1. "Plant varieties" (official publication). Moscow: FGBNU «Rosinformagrotech»; 2022. 646 p. [In Russian]. (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т.1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: ФГБНУ «Росинформагротех»; 2022. 646 с.).
- Tan K.C., Ferguson-Hunt M., Rybak K., Waters O.D.C., Stanley W.A., Bond C.S., Stukenbrock E., Friesen T., Faris J., McDonald B., Oliver R. Quantitative variation in effector activity of *ToxA* isoforms from *Stagonospora nodorum* and *Pyrenophora tritici-repentis*. *Molecular Plant - Microbe Interactions*. 2012;25(4):515-522. DOI: 10.1094/MPMI-10-11-0273
- Tuori R.P., Wolpert T.J., Ciuffetti L.M. Purification and immunological characterization of toxic components from cultures of *Pyrenophora tritici-repentis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 1995;8(1):41-48. DOI: 10.1094/mpmi-8-0041
- Wiese M.V. Compendium of wheat diseases. American Phytopathological Society; 1977.
- Zashchepkin E.E., Shutko A.P., Tuturzhans L.V. Yellow spot as an integral part of the pathogenic complex of winter wheat in the Central Ciscaucasia (Zheltaya pyatnistost kak sostavnaya chast patogennogo kompleksa ozimoy pshenitsy v Tsentralnom Predkavkazye). *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2015;2:2. [in Russian] (Защепкин Е.Е., Шутко А.П., Тутуржанс Л.В. Современные проблемы науки и образования. 2015;2:2). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=22326> [дата обращения: 12.04.2022]
- Zhang Z., Friesen T.L., Simons K.J., Xu S.S., Faris J.D. Development, identification, and validation of markers for marker-assisted selection against the *Stagonospora nodorum* toxin sensitivity genes *Tsn1* and *Snn2* in wheat. *Molecular Breeding*. 2009;23:35-49. DOI: 10.1007/s11032-008-9211-5

---

### ***Информация об авторах***

**Надежда Михайловна Коваленко**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория иммунитета растений к болезням, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, г. Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, д. 3, nadyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9577-8816>

**Екатерина Львовна Шайдаюк**, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, лаборатория микологии и фитопатологии, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, г. Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, д. 3, eshaydayuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3266-6272>

**Елена Ивановна Гультаева**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория микологии и фитопатологии, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, г. Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, д. 3, eigulyaeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7948-0307>

### ***Information about the authors***

**Nadezhda M. Kovalenko**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Plant Immunity to Diseases, All-Russian Institute of Plant Protection, 3, Podbelskogo Highway, St. Petersburg, Pushkin, 196608 Russia, nadyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9577-8816>

**Ekaterina L. Shaydayuk**, Cand. Sci. (Biology), Junior Researcher, Laboratory of Mycology and Phytopathology, All-Russian Institute of Plant Protection, 3, Podbelskogo Highway, St. Petersburg, Pushkin, 196608 Russia, eshaydayuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3266-6272>

**Elena I. Gulyaeva**, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Mycology and Phytopathology, All-Russian Institute of Plant Protection, 3, Podbelskogo Highway, St. Petersburg, Pushkin, 196608 Russia, eigulyaeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7948-0307>

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests:** the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.04.2022; одобрена после рецензирования 26.05.2022; принята к публикации 16.06.2022  
The article was submitted 05.04.2022; approved after reviewing 26.05.2022; accepted for publication on 16.06.2022.