

ГРИБЫ – ВОЗБУДИТЕЛИ БОЛЕЗНЕЙ РАСТЕНИЙ

УДК 632.4.01/.08

ХАРАКТЕРИСТИКА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ПОПУЛЯЦИИ *PUCCINIA STRIIFORMIS* F. SP. *TRITICI* ПО ПРИЗНАКУ ВИРУЛЕНТНОСТИ И ПРЕДСТАВЛЕННОСТИ ИНВАЗИВНЫХ РАС *PstS1* И *PstS2*

© 2023 г. Е. Л. Шайдаюк^{1,*}, Е. И. Гультаева^{1,**}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: eshaydayuk@bk.ru

**e-mail: eigulytaeva@gmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 15.04.2023 г.

Принята к публикации 23.05.2023 г.

В последние годы отмечается расширение ареала вредоносности желтой ржавчины. До недавнего времени в условиях Северо-Запада заболевание проявлялось спорадически. Однако в последние годы наблюдается его сильное развитие на образцах пшеницы, изучаемых на коллекционных посевах НИИ и госсортоучастков, а также отдельных производственных полях в Ленинградской обл. Цель данной работы — изучить вирулентность и расовый состав возбудителя желтой ржавчины в условиях Северо-Запада и провести молекулярный анализ образцов популяции на наличие инвазивных рас *PstS1* и *PstS2*. Листья образцов мягкой пшеницы с урединопустулами *Puccinia striiformis* собирали на производственных посевах, государственных сортоучастках и экспериментальных полях НИИ в 2020–2022 гг. Почти изогенные линии сорта Avocet (Av NIL): *Yr1*, *Yr5*, *Yr6*, *Yr7*, *Yr8*, *Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr18*, *Yr24*, *Yr26*, *YrSp*, *Yr27* и сорта-дифференциаторы из международного [Chinese 166 (*Yr1*), Lee (*Yr7*, *Yr+*), Heines Kolben (*Yr6*, *Yr+*), Vilmorin 23 (*Yr3*), Moro (*Yr10*, *YrMor*), Strubes Dickkopf (*YrSD*, *Yr25*, *Yr+*), Suwon 92/Omar (*YrSu*, *Yr+*)] и европейского [Hybrid 46 (*Yr4*, *Yr+*), Reichersberg 42 (*Yr7*, *Yr+*), Heines Peko (*Yr2*, *Yr6*, *Yr25*, *Yr+*), Nord Desprez (*Yr3*, *YrND*, *Yr+*), Compair (*Yr8*, *Yr19*), Carstens V (*Yr32*, *Yr25*, *Yr+*), Spaldings Prolific (*YrSP*, *Yr+*), Heines VII (*Yr2*, *Yr25*, *Yr+*)] наборов использовали для характеристики вирулентности патогена. Набор SCAR-маркеров (SCP19M24a1, SCP19M24a2, SCP19M26a1, SCP19M26a2) использовали для поиска инвазивных рас. Всего изучено 92 изолята. Высокой эффективностью в фазе проростков характеризовались гены *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24*, *Yr26*. Изоляты, вирулентные к сортам-дифференциаторам Moro (*Yr10*, *YrMor*) и Nord Desprez (*Yr3*, *YrND*, *Yr+*), не выявлены. Вирулентность к образцам с геном *Yr17* встречалась редко. 24 фенотипа вирулентности выявлено при использовании 29 тестеров вирулентности. Число аллелей вирулентности варьировало от 7 до 21. При этом различия между фенотипами *P. striiformis* на изученных сортах мягкой пшеницы были несущественными. Большинство из них объединились в общую группу. Незначительно дифференцировались две группы изолятов. Первая включала изоляты, характеризующихся минимальным числом аллелей вирулентности, вторая — с максимальным числом аллелей вирулентности. Молекулярный анализ северо-западной популяции выявил изоляты, относящиеся к инвазивной группе *PstS2* в 2020 и 2022 гг. Вирулентность их существенно не отличалась от других северо-западных фенотипов. Высокий эволюционный потенциал предопределяет необходимость проведения ежегодного мониторинга популяций патогена по признаку вирулентности и представленности инвазивных рас.

Ключевые слова: инвазивные расы, молекулярные маркеры, популяции, *Puccinia striiformis*, *Triticum aestivum*, *Yr*-гены

DOI: 10.31857/S0026364823060090, **EDN:** IZCPGE

ВВЕДЕНИЕ

Ржавчина — это группа широко распространенных и вредоносных болезней пшеницы во всем мире, требующая проведения постоянного мониторинга популяций патогена и иммуногенетических исследований растения-хозяина. Обусловлено это высокой миграционной способностью возбудителей и высокой скоростью их развития при благоприятных условиях окружающей

среды. На пшенице встречается три вида возбудителей ржавчины: *Puccinia triticina* Erikss., *P. graminis* Pers. и *P. striiformis* West., которые имеют различные экологические особенности, распространенность и значимость. Наиболее пластичным является возбудитель бурой ржавчины (*P. triticina*). Этот патоген способен развиваться в широком диапазоне температур, в связи с чем бурая ржавчина до недавнего времени доминировала повсе-

местно. Возбудитель стеблевой ржавчины *P. graminis* — более теплолюбивый вид. Его вредоносность преимущественно отмечается в регионах с континентальным климатом (Singh et al., 2015). Биологические особенности *P. striiformis* отличаются от *P. tritici* и *P. graminis*. Гриб успешно развивается в диапазоне относительно низких температур от 2 до 15°C и высокой влажности воздуха, в связи с чем желтая ржавчина приурочена к регионам с умеренным климатом (Chen, 2005).

В последние годы отмечается расширение ареала вредоносности желтой ржавчины. Эпифитотийное развитие заболевания в 2000 годах стали отмечать во многих странах и регионах (Зап. Европа, Китай, Средняя, Центральная и Вост. Азия, Сев. и Ю. Африка, Австралия, Сев. и Ю. Америка) (Koyshibaev, 2002; Novmøller et al., 2002; Chen, 2005; Wellings, 2011; Sharma-Poudyal et al., 2013; Chen et al., 2014; Brar, Kutcher, 2016; Walter et al., 2016; Ali et al., 2017; Kokhmetova et al., 2018, 2021). Обусловлено это появлением новых высокоагрессивных инвазивных рас (*PstS1* и *PstS2*), способных развиваться при высоких температурах, мутациями патогена по генам вирулентности и появлением новых рас, преодолевающих устойчивость резистентных сортов.

В России желтая ржавчина традиционно приурочена к предгорным районам Сев. Кавказа. Однако в последние годы ее стали отмечать и в других российских регионах: Центрально-Черноземном, Зап. Сибири, Поволжье, на Северо-Западе (Gulyaeva et al., 2022; Zeleneva et al., 2022). Основное проявление желтой ржавчины наблюдается на листьях. При сильном развитии заболевание может поразить колосковые чешуи, ости и зерно. В отличие от других видов ржавчины, паразитирующих на злаках, *P. striiformis* обладает свойством распространяться диффузно в тканях растения-хозяина. Образующиеся пустулы характеризуются линейным расположением на обеих сторонах листа, в результате чего иногда эту болезнь называют “полосатая ржавчина” (Kuznetsova, 1956). Возбудитель обладает широкой специализацией и может поражать многие виды злаков (Kuznetsova, 1956; Bogoyavlenskaya, 1962; Popov, 1979; Krayeva, Matveyenko, 1974). Промежуточным растением-хозяином являются виды рода *Berberis*, однако их роль в распространении инфекции в России не изучалась. Возобновление инфекции в весенний период возможно за счет экзогенного инокулюма и эндогенного: сохранения мицелия в тканях растений пшеницы и злаковой растительности. Имеется информация, что латентная инфекция может выдерживать достаточно низкие температуры (ниже –20°C) (Hendrix et al., 1966). Весной при благоприятных погодных условиях патоген возобновляет споруляцию. J. Zadoks и J. Bouwman (1985) показали, что в Нидерландах при благоприятных условиях развитие из перезимовавшей

инфекции одной пустулы на гектар посевов пшеницы способно вызвать эпифитотию. Важным фактором является также освещенность, от интенсивности которой зависят скорость диффузного развития патогена, длина латентного периода, тип инфекции и степень устойчивости сортов (Georgievskaya, 1966; Kaidash et al., 1975; Sharp, 1965; Stubbs, 1967). При раннем проявлении и высокой интенсивности развития вредоносность болезни может быть значительной.

Желтая ржавчина пшеницы на Северо-Западе отмечается спорадически. Изучение заболевания интенсивно проводили во Всесоюзном НИИ защиты растений в 1950–1970 гг. (Kuznetsova, 1956; Bogoyavlenskaya, 1962). В связи с возрастанием региональной значимости болезни, они были продолжены в 2020 гг. Источником инфекции в условиях Северо-Запада может быть воздушный занос из соседних западноевропейских стран, где в последние годы заболевание отмечается регулярно, а также местный инокулюм, сохраняющийся на диких злаках. Осенью в 2020–2022 гг. мы неоднократно наблюдали симптомы инфекции на злаковых травах на газонах и в лесополосах.

Цели данной работы — 1) изучить вирулентность и расовый состав возбудителя желтой ржавчины на образцах пшеницы, выращиваемых в Ленинградской обл. на производственных посевах, экспериментальных посевах научно-исследовательских учреждений и государственных сортоучастках; 2) с использованием молекулярных маркеров провести анализ северо-западной популяции на наличие инвазивных рас *PstS1* и *PstS2*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Листья образцов мягкой пшеницы с урединиопустулами *P. striiformis* собирали на производственных посевах, государственных сортоучастках (ГСУ) и экспериментальных полях НИИ в 2020–2022 гг. (табл. 1). В лаборатории листья разрезали на отрезки, раскладывали в чашки Петри и с одной стороны прикрывали ватным валиком, смоченном в 0.004%-м р-ре бензимидазола (Mikhailova et al., 1998). Чашки помечали в холодильник (3–5°C). Это способствовало возобновлению спороношения патогена и его успешному проявлению при последующем культивировании. Отрезки листьев с отдельными урединиопустулами использовали для заражения 10–14-дневных растений универсально восприимчивого сорта пшеницы Michigan Amber. Их прикладывали к листьям пшеницы и закрепляли с помощью пищевой пленки (метод микрокамер). Сосуды с растениями переносили в темную камеру и инкубировали при температуре 10°C и влажности 100%. Спустя сутки микрокамеры снимали, и сосуды с растениями переносили в климатическую камеру Versatile Environmental Test Chamber MLR-352N

Таблица 1. Характеристика инфекционного материала *Puccinia striiformis*, собранного с мягкой пшеницы на Северо-Западе в 2020–2022 гг.

Год	Образец пшеницы	Место сбора	Изучено изолятов	Пораженность образца пшеницы в поле (%)
2020	Павловская	СПб., опытное поле Пушкинских и Павловских лабораторий ВИР	2	30
	Инна		2	30
	Московская 39		2	30
	Мироновская 808		2	30
	Л 61263 (к-61263)		2	30–50
	Селекционная линия Л1		2	10–20
	Селекционная линия Л2		2	20
	Сударыня		2	30–40
	ThatcherLr26 (= Yr9)		2	30
	ThatcherLr34 (= Yr18)		2	10
	Thatcher		6	30–40
	Линия Л-9		2	20
	Московская 39		2	20
	Метель	Ленинградская обл., Гатчинский р-н, Рождествено, ГСУ	4	10
	Скипетр		6	10–20
	Агата		2	5
	Ленинградская 6		2	5–10
2021	Скипетр	Ленинградская обл., Ломоносовский р-н, производственный посев	8	20–40
	Мироновская 808	СПб., опытное поле Пушкинских и Павловских лабораторий ВИР	2	10–20
	ThatcherLr26		2	30
	Thatcher Lr34		2	5–10
	Thatcher		2	30
	Michigan Amber		4	30
2022	Скипетр	Ленинградская обл., Гатчинский р-н, производственный посев	6	40–50
	Орловская 22	Ленинградская обл., Гатчинский р-н, Рождествено, ГСУ	2	10–15
	Галина	Ленинградская обл., Гатчинский р-н, Миньково, филиал АФИ	2	10
	Rawetta (к-67091)	Ленинградская обл., Гатчинский р-н, Белогорка	2	10–20
	Mandarin (к-67096)		2	10
	Экстра	Ленинградская обл., Гатчинский р-н, Волосово, ГСУ	2	50–80
	Архат		2	20
	Кулич		2	30–40
	Ленинградская 20		2	20–40
	Марфа		2	1–5
	Фаина		2	1–10
	Судьба		2	1–5

Примечание. *Пораженность образца пшеницы в полевых условиях.

(16 ч – день, освещение 15000–20000 люкс, температура 16°C; 8 ч – ночь, температура 10°C). Спороношение патогена отмечали через 12–14 сут после заражения. Сбор инфекционного материала (уре-

диниоспор) проводили на 17–20-е сут с помощью вакуумного насоса со специальной насадкой.

Всего было изучено 92 изолята гриба, в том числе 44 в 2020 г., 20 – в 2021 г., 28 – в 2022 г. (табл. 1).

Почти изогенные линии сорта Avocet (Av NIL) (*Yr1*, *Yr5*, *Yr6*, *Yr7*, *Yr8*, *Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr18*, *Yr24*, *Yr26*, *YrSp*, *Yr27*) и сорта-дифференциаторы из международного [Chinese 166 (*Yr1*), Lee (*Yr7*, *Yr+*), Heines Kolben (*Yr6*, *Yr+*), Vilmorin 23 (*Yr3*), Moro (*Yr10*, *YrMor*), Strubes Dickkopf (*YrSD*, *Yr25*, *Yr+*), Suwon 92/Omar (*YrSu*, *Yr+*)] и европейского [Hybrid 46 (*Yr4*, *Yr+*), Reichersberg 42 (*Yr7*, *Yr+*), Heines Peko (*Yr2*, *Yr6*, *Yr25*, *Yr+*), Nord Desprez (*Yr3*, *YrND*, *Yr+*), Compair (*Yr8*, *Yr19*), Carstens V (*Yr32*, *Yr25*, *Yr+*), Spaldings Prolific (*YrSP*, *Yr+*), Heines VII (*Yr2*, *Yr25*, *Yr+*)] наборов использовали для характеристики вирулентности патогена. Тип реакции определяли по шкале G. Gassner и W. Straib (1926). Растения с баллами 0–2 относили к устойчивым, а 3, 4 и X – к восприимчивым.

Для проведения анализа вирулентности споры суспензировали в малотоксичной для растений иммерсионной жидкости Noves 7100 (концентрация 10^6 спор/мл) и опрыскивали 10–12-дневные растения дифференциаторов с помощью аэрографа. Последующее инкубирование зараженных наборов проводили в условиях, аналогичных таковым при первичном размножении урединиообразов.

Вирулентность и фенотипы изолятов *P. striiformis* определяли на 29 выше представленных тестерах вирулентности (14 – Av NIL, 15 – сорта-дифференциаторы). Кроме того, для обозначения фенотипов применили международную номенклатуру обозначения рас на 15 сортах-дифференциаторах, где устойчивый тип реакции (R) обозначается как 0, восприимчивый (S) как 1 (первый дифференциатор 2^0 , второй 2^1 , третий 2^2 и т.д.). Суммарное значение обозначает номер расы. Например, если восприимчив только первый дифференциатор (2^0) – раса 1, если первый и второй ($2^0 + 2^1$), то раса 3, и т.д. При обозначении расы сначала был указан номер по международному набору, затем номер по европейскому набору с приставкой E (например, 1E3) (Gulyaeva, Shaydayuk, 2020). Статистическая обработка результатов анализа выполнена с использованием пакета программ GenAlEx.

Для поиска инвазивных рас использовали набор SCAR-маркеров [SCP19M24a1 (485 п.н.), SCP19M24a2 (385 п.н.), SCP19M26a1 (491 п.н.), SCP19M26a2 (262 п.н.)], подобранный S. Walter с соавторами (2016). У изолятов, относящихся к группе *PstS1*, выявляли ампликоны всех четырех маркеров, а у изолятов *PstS2* – трех маркеров (SCP19M24a1, SCP19M24a2 и SCP19M26a2). Экстракция ДНК из монопустульных изолятов выполнена по методике A.F. Justesen et al. (2002). Постановку ПЦР проводили по рекомендуемым разработчиками праймеров параметрам (Walter et al., 2016).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Тип реакции линий и сортов дифференциаторов при инокуляции изолятами *P. striiformis* с разных образцов пшеницы представлен в табл. 2. Высокой эффективностью в фазе проростков характеризовались гены *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24*, *Yr26*. Изоляты, вирулентные к сортам-дифференциаторам Moro (*Yr10*, *YrMor*) и Nord Desprez (*Yr3*, *YrND*, *Yr+*), не выявлены (табл. 2, 3). Большинство этих линий и сортов устойчивы к другим региональным российским популяциям *P. striiformis* (Gulyaeva et al., 2022). Соответственно, они могут быть рекомендованы для селекции пшеницы на устойчивость к желтой ржавчине в России.

Вирулентность к линии Av *Yr17* отмечена у изолятов, выделенных с сортов Сударыня, Метель и линии Л9 в 2020 г. Этот ген в регионах России характеризуется разной эффективностью по отношению к возбудителю желтой ржавчины, но полностью утратил эффективность в странах Западной Европы, что обусловлено широким возделыванием сортов с *Yr17*. Обнаружение в образцах северо-западной популяции изолятов, вирулентных к *Yr17*, указывает на их возможный занос с территории Западной Европы, поскольку сорта с этим геном в Северо-Западном регионе не возделываются. Однако они выращиваются в центрально-европейских регионах (Немчиновская 25, Токката, Одетта, Гаренда) и Сев. Кавказе (Морозко, Сварог, Маркиз, Гомер) (Gulyaeva et al., 2021).

Выявлено существенное варьирование изолятов по вирулентности к линиям с генами *Yr1*, *Yr7*, *YrSp*, *Yr27* и сортам Chinese 166 (*Yr1*), Strubes Dickkopf (*YrSD*, *Yr25*, *Yr+*), Hybrid 46 (*Yr4*, *Yr+*), Strubes Dickkopf (*YrSD*, *Yr25*, *Yr+*), Carstens V (*Yr32*, *Yr25*, *Yr+*), Spaldings Prolific (*YrSP*, *Yr+*). Частота вирулентных изолятов к большинству сортов-дифференциаторов была выше в 2020 г. и существенно снизилась в последующий период (табл. 3). Сходные значения частот вирулентных изолятов за три года наблюдений выявлены на линии Av *Yr1* и сорте Chinese 166, несущем этот ген, а также линии Av *YrSp* и сорте Spaldings Prolific.

Высокие частоты вирулентности (70–100%) отмечены на линиях с генами *Yr6*, *Yr8*, *Yr9*, *Yr18* и сортах-дифференциаторах Lee (*Yr7*, *Yr+*), Heines Kolben (*Yr6*, *Yr2*), Vilmorin 23 (*Yr3*, *Yr+*), Suwon 92/Omar (*YrSu*, *Yr+*), Reichersberg 42 (*Yr7*, *Yr+*), Heines Peko (*Yr2*, *Yr6*, *Yr25*, *Yr+*), Compair (*Yr8*, *Yr19*) и Heines VII (*Yr2*, *Yr25*, *Yr+*) (табл. 3). Таким образом, данные гены не эффективны по отношению к северо-западной популяции. Многие из этих генов утратили эффективность и в других странах мира (Sharma-Poudyal et al., 2013; Brar, Kutcher, 2016; Martínez-Moreno, Solís, 2019; Gangwar et al., 2021).

Северо-западная коллекция *P. striiformis* характеризовалась умеренным генетическим разнообразием.

Таблица 2. Окончание

Образец мягкой пшеницы – источник инфекционного материала <i>P. striiformis</i>	Тип реакции (балл) на линиях и сортах-дифференциаторах																															
	Avocet Yr1	Avocet Yr5	Avocet Yr6	Avocet Yr7	Avocet Yr8	Avocet Yr9	Avocet Yr10	Avocet Yr15	Avocet Yr17	Avocet Yr18	Avocet Yr24	Avocet Yr26	Avocet YrSP	Avocet Yr27	Chinese 166	Lee	Heines Kolben	Vilmorin	Moro	Strubes Dickkopf	Suwon 92/Omar	Hybrid 46	Reishesberg 42	Heines Peko	Nord Desprez	Compair	Carstens V	Spaldings Profitic	Heines VII			
Скипетр2 ⁴	0	0	3	2;	2–3;	3	0	0	0;	3	2;	2;	0	2–3;	0	3	3	2–3	0;	1–2;	3–4	2;	3	3	3	2;	3	3	2;	2	3	
Мироновская 808	0	0	3	2;	3	4	0	0	2;	3–4	2;	0	0	3	0	3	3	2–3;	0;	3	3	2;	3–4	3–4	0;	3–4	2;	0–1;	3–4	0	3	
ThatcherLr26	3	0	3	2–3;	3	3–4	0;	0	0;	3	0;	0;	0	3	3	3	3	2–3;	0;	1–2;	3	3	3	3	3	2;	3–4	0	0;	2–3;	3	
Thatcher 1 ³	0	0	3	0;	3	3	0	0	0	3	0;	0	0	3	0	3–4	3–4	2–3;	0;	3	3–4	3	3	3	2;	3–4	2–3;	0;	2–3	0	3	
Thatcher 2 ³	0	0	3	2;	3	3	0	0	0;	3	0;	0;	0	3	0	3–4	3–4	2–3;	0;	3	3–4	3	3–4	3	0;	3	2–3;	0;	3	0	3	
ThatcherLr34	0	0	3	2–3;	3	3	0	0	0;	3	0–1;	0–1;	0	2–3;	0	3–4	3–4	2–3;	0;	3	3–4	2;	3–4	3–4	2+	3–4	1–2;	0;	3	0	3	
Michigan Amber 1 ³	0	0	3	2;	3	3	0	0	0–1;	3	0	0–1;	0	2+	0	3–4	3	2–3;	0	3–4	3–4	3	3	3	0–2;	3	3	3	0;	3	0	3
Michigan Amber 2 ³	0	0	3	0–1;	3–4	3	0	0	0;	3	0–1;	0–1;	0	1–2;	0	3–4	3–4	2–3;	0;	3	3–4	3–4	3–4	3	0;	3	3	0–1;	3–4	0	3	
2022																																
Скипетр 1 ⁵	0	0	3	0–2;	3	3	0	0	0–1;	3	0;	0;	0–1	3	0	3	3	2–3	0	0	2–3	2;	2–3	2–3	0;	3	2–3;	0–1;	2–3;	0	3	
Скипетр 2 ⁵	0	0	3	0	2;–3	3	0	0	0	3	0;	0	0–1	2–3;	0	3	3	2–3	0;	0;	2–3	2;	2–3	2–3	0;	3	2–3;	0–2;	2–3;	0	3	
Орловская 22	3	0	3	3	3	3	0	0	0	3	0	0	3–4	3	3	3	3–4	0	2–3	3	3	3	3	3–4	0;	0;	3	2–3;	3	2–3	3	
Галина	0	0	3	0–2;	2;	3	0	0	0	3	0;	0	0	2;	0	3–4	2;–3	3	0;	3	3	2–3	3–4	2–3	0;	3	2;	2;	2–3	2	3	
Д. 213	0	0	3	0;	3	3	0	0	2;	3	0	0;	2;	2;	0	3	3	3	0;	3	3	2	3	2	0	3	2;	2;	2;	2;	2;	
Д. 217	0	0	3	0;	3	3	0	0	0;	3	0;	0–1;	0–1;	3	0	3	3	0	0	0	2;–3	2	2;	2;	0;	3	2;	0;	2;	2;	2;	
Экстра	0	0	3	0;	3	2–3	0	0	0;	3	0;	0;	0–2	1–2;	0	3	2;–3	0;	0;	0;	2–3;	0	0–2;	3	0;	0;	0–2	0–2	0–2	0–2;	0	3
Архат	0	0	3	0	3	3	0	0	0	3	0	0	0	0–1;	0	3	3	2;	0;	1–2;	2–3	2–3	2;	2;	0;	3	2;	0–2;	2–3;	0	3	
Кулич	0	0	3	1;	3	3	0	0	2;	3	0;	0;	0	0	0	3	3	3	0	2;	3	2;	2–3	2–3	0	0	2;	0;	2;	0;	2;	
Ленинградская 20	0	0	3–4	1–2;	3–4	0;	0	0	1–2	3	0–1;	0–1;	0–1;	0–2;	0	3	3–4	0;	0	0;	3–4	1–2;	2	2	0;	3–4	2;	0;	0–1;	0	3	
Марфа	0	0	3	1–2;	3	3	0	0	0–1;	3	0;	0	0	0–1;	0	3	3	2–3	0	2	3–4	2;	3–4	3–4	0–1;	2–3	2–3	1–2	3–4	3	3	
Фаина	3	0	3	3	3	3	0	0	0	3–4	0	0	3–4	3	3	3	3	3	0;	3	3	2–3	3	3	0;	0;	1–2	3	3	3	3	
Судьба	0	0	3	0–1	3	3	0	0	0;	3–4	0	0	0	1–2;	0	3	3	3	0;	3	2–3	3	3	3	3–4	0–1;	3–4	2;	2	3–4	2	3–4

Примечание. ¹Сорт с опытного поля Пушкинских лабораторий ВИР; ²сорт с опытного поля ВИЗР; ³инфекционный материал *P. striiformis* собран с одного сорта, высеянного в нескольких повторностях (рандомизированно расположенные делянки); ⁴инфекционный материал *P. striiformis* собран на производственных посевах одного сорта с разных полей; ⁵инфекционный материал *P. striiformis* собран на производственном посеве одного сорта с разницей в 10 дней. Балл 0 – отсутствие симптомов; 0; – гибернующие пятна; 1 – мелкие пустулы с некрозом; 2; – мелкие, средние пустулы, окруженные некрозом или хлорозом; 3 – среднего размера пустулы без хлороза; 4 – крупные пустулы без хлороза; – и + – промежуточные типы реакции.

Таблица 3. Динамика вирулентности северо-западной популяции *Puccinia striiformis* в 2020–2022 гг.

Yr-гены	Линия, сорт пшеницы	Частота вирулентных изолятов, %			
		2020	2021	2022	Всего за 3 года
<i>Yr1</i>	<i>Yr1/6*Avocet S</i>	36	8	13	22
<i>Yr5</i>	<i>Yr5/6*Avocet S</i>	0	0	0	0
<i>Yr6</i>	<i>Yr6/6*Avocet S</i>	100	100	100	100
<i>Yr7</i>	<i>Yr7/6*Avocet S</i>	50	17	13	31
<i>Yr8</i>	<i>Yr8/6*Avocet S</i>	100	100	100	100
<i>Yr9</i>	<i>Yr9/6*Avocet S</i>	100	100	93	98
<i>Yr10</i>	<i>Yr10/6*Avocet S</i>	0	0	0	0
<i>Yr15</i>	<i>Yr15/6*Avocet S</i>	0	0	0	0
<i>Yr17</i>	<i>Yr17/6*Avocet S</i>	18	0	0	8
<i>Yr18</i>	<i>Yr18/6*Avocet S</i>	86	100	100	94
<i>Yr24</i>	<i>Yr24/6*Avocet S</i>	0	0	0	0
<i>Yr26</i>	<i>Yr26/6*Avocet S</i>	0	0	0	0
<i>YrSp</i>	<i>YrSP/6*Avocet S</i>	23	0	13	14
<i>Yr27</i>	<i>Yr27/6*Avocet S</i>	86	75	47	71
<i>Yr1</i>	Chinese 166	36	8	13	22
<i>Yr7, Yr+</i>	Lee	100	100	100	100
<i>Yr6, Yr2</i>	Heines Kolben	100	100	100	100
<i>Yr3, Yr+</i>	Vilmorin 23	86	92	73	84
<i>Yr10, YrMor</i>	Moro	0	0	0	0
<i>YrSD, Yr25, Yr+</i>	Strubes Dickkopf	64	92	33	51
<i>YrSu, Yr+</i>	Suwon 92/Omar	100	100	100	100
<i>Yr4, Yr+</i>	Hybrid 46	54	42	33	45
<i>Yr7, Yr+</i>	Reichersberg 42	95	100	73	90
<i>Yr2, Yr6, Yr25, Yr+</i>	Heines Peko	100	100	80	94
<i>Yr3, YrND, Yr+</i>	Nord Desprez	0	0	0	0
<i>Yr8, Yr19</i>	Compair	82	100	73	84
<i>Yr32, Yr25, Yr+</i>	Carstens V	73	67	40	61
<i>YrSP, Yr+</i>	Spaldings Prolific	23	0	7	12
<i>Yr2, Yr25, Yr+</i>	Heines VII	100	100	67	90
Восприимчивый контроль	Jupateco S, Avocet S	100	100	100	100
Число изолятов патогена		44	20	28	92

разием. 24 фенотипа вирулентности выявлено среди 92 изолятов при использовании 29 тестеров вирулентности (табл. 4). Число аллелей вирулентности варьировало от 7 до 21. Одинаковые фенотипы в 2020 г. наблюдали на сортах Инна и Московская 39 и селекционных линиях Л1 и Л2; в 2021 г. на сортах Московская 39, Инна, Мироновская 808, линии TcLr34 (= *Yr18*) и сорте Скипетр, возделываемом на разных производственных посевах. В 2022 г. общий фенотип отмечен на сортах Судьба и Галина. Изоляты с сорта Скипетр, которые были представлены во все три года исследований, относились к одному фенотипу. Сходные результаты наблюдали на сортах Мироновская 808,

Thatcher, линиях TcLr34 (= *Yr18*) и TcLr26 (= *Yr9*), анализируемых в 2020 и 2021 гг.

При использовании меньшего числа тестеров вирулентности (международного и европейского набора сортов-дифференциаторов) число рас соответственно было меньше (18), из них девять отмечены на двух и более сортах (табл. 4).

Генетические различия между фенотипами *P. striiformis* на изученных сортах мягкой пшеницы показаны на рис. 1. Большинство фенотипов объединились в общую группу, что указывает на их высокое генетическое сходство по признаку вирулентности. Незначительно отличались от них две группы изолятов. Первая включала изоляты с сор-

Таблица 4. Характеристика фенотипического состава *Puccinia striiformis* на образцах мягкой пшеницы на Северо-Западе в 2020–2022 гг.

Сорт пшеницы	Год	Фенотип*	Число аллелей вирулентности	Раса**
Павловская	2020	F_1	21	111E247
Инна	2020	F_2	16	103E166
Московская 39	2020	F_2	16	103E166
Мироновская 808	2020	F_5	14	110E150
Л 61263 (к-61263)	2020	F_10	18	110E247
Селекционная линия Л1	2020	F_9	13	78E151
Селекционная линия Л2	2020	F_9	13	78E151
Сударыня	2020	F_3	16	111E228
ThatcherLr26 (= Yr9)	2020	F_8	17	111E151
ThatcherLr34 (= Yr18)	2020	F_7	15	110E150
Thatcher	2020	F_4	16	110E183
линия Л-9	2020	F_6	16	110E150
Метель	2020	F_11	19	79E183
Скипетр	2021	F_12	14	78E182
Агата	2021	F_13	18	110E247
Ленинградская 6	2021	F_13	18	110E247
Мироновская 808	2021	F_5	14	110E150
ThatcherLr26 (= Yr9)	2021	F_8	17	111E151
Thatcher Lr34(= Yr18)	2021	F_7	15	110E150
Thatcher	2021	F_4	16	110E183
Michigan Amber	2021	F_14	15	110E183
Скипетр	2022	F_12	14	78E182
Орловская 22	2022	F_18	19	111E167
Галина	2022	F_17	14	110E151
Rawetta (к-67091)	2022	F_19	11	110E18
Mandarin (к-67096)	2022	F_20	9	70E16
Экстра	2022	F_15	8	40E4
Архат	2022	F_16	11	70E149
Кулич	2022	F_21	10	78E6
Ленинградская 20	2022	F_22	7	70E16
Марфа	2022	F_23	13	78E182
Фаина	2022	F_24	19	111E199
Судьба	2022	F_17	14	110E151

Примечание. *Условные обозначения фенотипов вирулентности изолятов при их тестировании на 29 тестерах вирулентности (14 Yr-линий и 15 сортов-дифференциаторов); **раса, определенная по международной номенклатуре на 15 сортах-дифференциаторах.

тов Экстра и Ленинградская 20, характеризующиеся меньшим числом аллелей вирулентности (7–8). Вторую группу составили изоляты с сортов Фаина, Орловская и Павловская с максимальным числом аллелей вирулентности (19–21).

При анализе северо-западной популяции 19 из 29 использованных тестеров вирулентности показали низкую эффективность для характеристики внутрипопуляционного полиморфизма. Преиму-

щественно к ним относились линии и сорта с высокоэффективными и малоэффективными Yr-генами. Фенотипический состав изолятов *P. striiformis*, собранных с нескольких участков одного сорта на ГСУ, был идентичным. Эта же тенденция прослеживалась на разных производственных посевах одного сорта. Образцы *P. striiformis*, собранные с одного сорта в начальный период появления болезни и в период ее массового развития, также

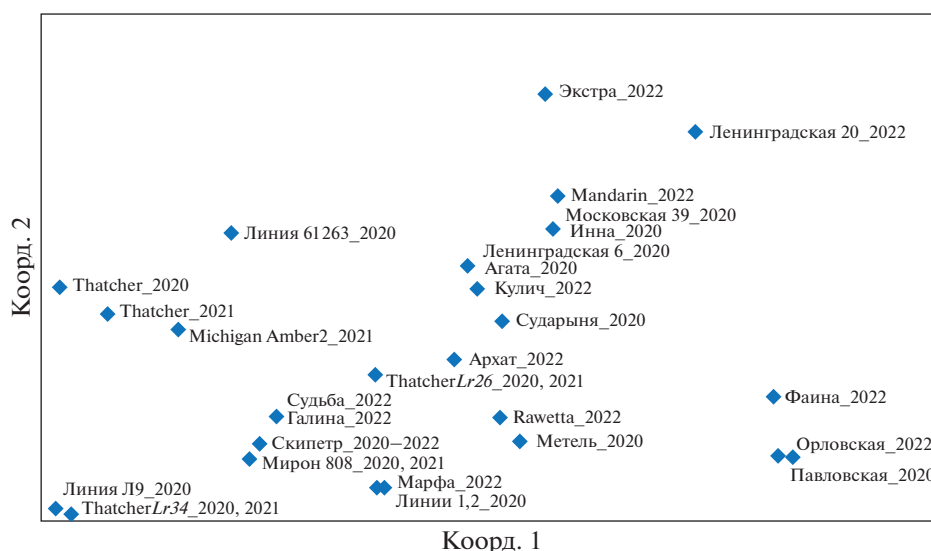


Рис. 1. Многомерная диаграмма генетических расстояний по признаку вирулентности северо-западных изолятов *Puccinia striiformis*, выделенных из разных генотипов пшеницы в 2020–2022 гг. (GenAlEx, Distance, Genetic).

имели сходный спектр вирулентности. При этом существенно различались по вирулентности изоляты, полученные с разных генетически защищенных от желтой ржавчины сортов пшеницы. Это указывает на то, что для характеристики внутривидового разнообразия патогена по признаку вирулентности следует включать в анализ образцы инфекции, собранные с максимально возможного числа сортов-хозяев. При этом достаточно провести анализ вирулентности сборного инфекционного образца (полученного с одного сорта), а для уточнения расы — проанализировать один-два монопустульных изолята. Анализ большего числа монопустульных изолятов необходим в случае изучения сборного инокулюма, собранного с разных сортов и полей.

Молекулярный анализ северо-западной популяции выявил изоляты, относящиеся к инвазивной в 2020 и 2022 гг. группе *PstS2*. Представители группы *PstS1* не обнаружены. В 2020 г. изоляты группы *PstS2* отмечены на озимом сорте Инна, выращиваемом на опытном поле Пушкинских и Павловских лабораторий ВИР (два изолята), и на яровых сортах Метель (два изолята) и Ленинградская 6 (один изолят), изучаемых на Гатчинском ГСУ в Рождествено и Волосово, соответственно. В 2022 г. к инвазивной группе относились два изолята с ярового сорта Марфа, изучаемого на Гатчинском ГСУ (Волосово). Вирулентность и фенотип этих изолятов показаны в табл. 2 и 4. Несмотря на принадлежность изолятов к инвазивной группе, они существенно не отличались по вирулентности от других фенотипов, обнаруженных на Северо-Западе. Фенотип инвазивного изолята на сорте Ленинградская 6 был идентичен собранно-

му на сорте Агата, а на сорта Инна — с Московской 39 (табл. 4).

Молекулярные генотипы других изолятов отличались от *PstS1* и *PstS2*. У них амплифицировались либо маркеры SCP19M24a2, SCP19M26a1, SCP19M26a2, либо SCP19M24a2 и SCP19M26a2. Первая группа изолятов доминировала.

Расовый состав *P. striiformis* в глобальном масштабе изучается в Global Rust Reference Center (GRRC) (Aarhus university, Denmark). В 2019–2021 гг. в этих исследованиях были представлены изоляты из Латвии (20, 1 и 2 изолята соответственно), а в 2021 г. — из Эстонии (3). Латвийские изоляты в 2019 г. были представлены фенотипами групп *PstS14* (90%), *PstS7* (10%) и *PstS10* (10%), в 2020 г. — *PstS17*, в 2021 г. — *PstS17* и *PstS15*. Все эстонские изоляты показали принадлежность к группе *PstS17*. Изоляты, относящиеся к группе *PstS17*, характеризуются вирулентностью к линиям *Yr*: 2, 6, 7, 8, 17, 32, Sp; *PstS15* к *Yr*: 1, 2, 3, 6, 7, 9, 17, 25, 32; *PstS14* к *Yr*: 2, 3, 6, 7, 8, 9, 17, 25, 32, Sp; *PstS10* к *Yr*: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 17, 25, 32, Sp; *PstS7* к *Yr*: 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 17, 25, 32, Sp (Hovmöller et al., 2022). Отличием этих фенотипов от обнаруженных на Северо-Западе в 2021 г. была вирулентность к *Yr17*. Несмотря на то, что фенотипы *PstS17*, *PstS15*, *PstS14*, *PstS10*, *PstS7* не выявлены в северо-западной популяции, в целом их спектр вирулентности существенно не отличался. Группа фенотипов *PstS17*, впервые отмеченная в Латвии и Эстонии в 2021 г., ранее была зарегистрирована в Египте в 2018 г. и Турции в 2019 г. (Hovmöller et al., 2021), что указывает на высокую миграционную способность патогена и необходимость проведения ежегодного мониторинга его популяций.

Всего в глобальных исследованиях *P. striiformis* в GRRC определено 17 групп фенотипов *PstS*. Мы сравнили фенотипический состав северо-западной популяции *P. striiformis* с этими группами. Два фенотипа, представленных в GRRC, отмечены в северо-западной популяции. Один из них (*PstS2*,v3,v27) обнаружен на сорте ThatcherLr34, другой (*PstS16*) — на сорте Метель. По данным GRRC, группа *PstS2*,v3,v27 широко представлена в Вост. Африке, Зап. Азии и Ю. Америке, а *PstS16* — в Ю. Азии и Вост. Африке (Hovmøller et al., 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение расового состава на коллекционных посевах ГСУ и НИИ, где изучается большое количество генетически разнородных образцов пшеницы, позволяет наиболее полно охарактеризовать разнообразие патогена. Представляется возможным выявить группы рас, формирующихся на допущенных к использованию и новых перспективных сортах и селекционном материале. Как правило, на селекционных посевах сосредоточено большое количество рас патогена. В последующем некоторые из них становятся вредоносными для новых сортов, внедряемых в производство. Таким образом, информация о вирулентности и фенотипическом составе *P. striiformis* на районированных и перспективных российских сортах пшеницы в условиях северо-западных госсортоучастках позволяет оценить последующую ситуацию в производственных посевах.

Исследование северо-западной популяции *P. striiformis* показало ее высокую изменчивость по признаку вирулентности. Этому может способствовать воздушный занос уредниоспор из западноевропейских стран, где данное заболевание прогрессирует и представляет экономическую значимость, а также из других российских регионов, где заболевание проявляется в более ранние сроки. Ежегодно на Северо-Западе в осенний период наблюдается высокое развитие желтой ржавчины на злаковых сорняках и газонных травах, что способствует поддержанию локальной инфекции и ее успешному распространению на пшеницу и другие зерновые культуры.

Высокой эффективностью в регионе характеризуются гены *Yr5*, *Yr10*, *Yr15* и *Yr24*, и они могут быть рекомендованы для селекции на устойчивость. Вирулентность к образцам с геном *Yr17* была редкой для северо-западной популяции. Это может быть объяснено отсутствием в регионе возделываемых сортов с этим геном. Однако в случае внедрения таких сортов, следует учитывать, что вероятен занос вирулентных изолятов из западноевропейских стран. Для сохранения и продления срока “полезной жизни” данного гена рекомендуется его сочетание с другими высоко и частично эффективными *Yr*-генами.

В данных исследованиях северо-западной популяции в 2020 и 2022 гг. обнаружены изоляты, относящиеся к инвазивной группе рас *PstS2*. Вирулентность их существенно не отличалась от других северо-западных фенотипов. Однако по литературным данным они имеют высокий эволюционный потенциал, что указывает на необходимость проведения ежегодного мониторинга популяций патогена по признаку вирулентности и представленности инвазивных рас.

Исследования поддержаны Российским научным фондом, проект № 23-26-00042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ali S., Rodriguez-Algaba J., Thach T. et al. Yellow rust epidemics worldwide were caused by pathogen races from divergent genetic lineages. *Front. Plant Sci.* 2017. V. 8. P. 1057.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01057>
- Bogoyavlenskaya R.A. Specialization of the species *Puccinia glumarum* (Schmidt) Eriks. et Henn. *Botanicheskiy zhurnal.* 1962. V. 47 (8). P. 197–201 (in Russ.).
- Brar G.S., Kutcher H.R. Race characterization of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the cause of wheat stripe rust, in Saskatchewan and southern Alberta, Canada and virulence comparison with races from the United States. *Plant Dis.* 2016. V. 100. P. 1744–1753.
<https://doi.org/10.1080/07060661.2014.924560>
- Chen X.M. Epidemiology and control of stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) on wheat. *Can. J. Plant Pathol.* 2005. V. 27 (3). P. 314–337.
<https://doi.org/10.1080/07060660509507230>
- Chen X.M. Integration of cultivar resistance and fungicide application for control of wheat stripe rust. *Can. J. Plant Pathol.* 2014. V. 36 (3). P. 311–326.
<https://doi.org/10.1080/07060661.2014.924560>
- Gangwar O.P., Kumar S., Bhardwaj S.C. et al. Virulence and molecular diversity among *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* pathotypes identified in India between 2015 and 2019. *Crop Protection.* 2021. V. 148. P. 105717.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105717>
- Gassner G., Straib W. Untersuchungen Über die Infektionsbedingungen von *Puccinia glumarum* und *Puccinia graminis*. *Arb. Biol. Reichsanst. Land-Forst-wirtsch Berlin-Dahlem.* 1929. V. 16 (4). P. 609–629.
- Georgievskaya N.A. To the knowledge of the mass development of wheat yellow rust. *Trudy VIZR.* 1966. V. 26. P. 55–63 (in Russ.).
- Gulyaeva E., Shaydayuk E., Gannibal P. Leaf rust resistance genes in wheat cultivars registered in Russia and their influence on adaptation processes in pathogen populations. *Agriculture.* 2021. V. 11 (4). P. 319.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11040319>
- Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L. Virulence of Russian populations of the stripe rust causal agent. *Mikologiya i fitopatologiya.* 2020. V. 54 (4). P. 299–304 (in Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0026364820040042>
- Gulyaeva E., Shaydayuk E., Kosman E. Virulence diversity of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in common wheat in Russian regions in 2019–2021. *Agriculture.* 2022. V. 12

- (11). P. 1957.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12111957>
- Hendrix J.W., Lloyd E.H. Low temperature survival of the stripe rust fungus in host tissue. *Phytopathology*. 1966. V. 56 (2). P. 148.
- Hovmöller M.S., Justesen A.F., Brown J.K.M. Clonality and longdistance migration of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in north-west Europe. *Plant Pathol.* 2002. V. 51 (1). P. 24–32.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2002.00652.x>
- Hovmöller M.S., Patpour M., Rodriguez-Algaba J. et al. GRRC report of yellow and stem rust races 2022. GRRC, Aarhus, 2022. https://agro.au.dk/fileadmin/www.grcc.au.dk/International_Services/Pathotype_YR_results/GRRC_annual_report_2022.pdf
- Hovmöller M.S., Patpour M., Rodriguez-Algaba J. et al. GRRC report of yellow and stem rust races 2021. GRRC, Aarhus, 2021: <https://agro.au.dk/fileadmin/www.grcc.au.dk>
- Justesen A.F., Ridoutb C.J., Hovmöller M.S. The recent history of *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* in Denmark as revealed by disease incidence and AFLP markers. *Plant. Pathol.* 2002. V. 51 (1). P. 13–23.
<https://doi.org/10.1046/j.0032-0862.2001.00651.x>
- Kaidash A.S., Shinkarev V.P., Afonin S.P. An increase in visible infection rates on wheat plants attacked by yellow rust as a result of mycelial growth in leaves. *Mikologiya i fitopatologiya*. 1975. V. 9 (1). P. 57–60 (in Russ.).
- Kokhmetova A., Rsaliyev A., Malysheva A. et al. Identification of stripe rust resistance genes in common wheat cultivars and breeding lines from Kazakhstan. *Plants*. 2021. V. 10. P. 2303.
<https://doi.org/10.3390/plants10112303>
- Kokhmetova A., Sharma R., Rsaliyev S. et al. Evaluation of Central Asian wheat germplasm for stripe rust resistance. *Plant Genet. Resour.* 2018. V. 16. P. 178–184.
<https://doi.org/org/10.1017/S1479262117000132>
- Koyshibaev M. About the international conference on yellow rust. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2002. V. 36 (4). P. 83–85 (in Russ.).
- Krayeva G.A., Matveyenko A.N. Race composition of *Puccinia striiformis* West. on small grasses in the North Caucasus. *Mikologiya i fitopatologiya*. 1974. V. 8 (6). P. 521–523 (in Russ.).
- Kuznetsova R.A. Specialization of the species *Puccinia glumarum* and the role of grasses in the transmission of infection to cereals. Abstract Thesis ... Cand. Biol. All-Union Scientific Research Institute for Plant Protection (VIZR), Leningrad, 1956 (in Russ.).
- Martínez-Moreno F., Solís I. Wheat rust evolution in Spain: an historical review. *Phytopathologia Mediterranea*. 2019. V. 58 (1). P. 3–16.
https://doi.org/10.13128/Phytopathol_Mediterr-22561
- Mikhailova L.A., Gulyaeva E.I., Mironenko N.V. Methods for studying the structure of populations of the leaf rust causative agent. In: Guidelines for plant protection. VIZR, SPb., 1998, pp. 105–126 (in Russ.).
- Popov D.F. Local sources of yellow rust pathogen of wheat in the Altai. *Sibirskiy vestnik*. 1979. V. 3. P. 63–66 (in Russ.).
- Sharma-Poudyal D., Chen X.M., Wan A.M. et al. Virulence characterization of international collections of the wheat stripe rust pathogen, *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Plant Dis.* 2013. V. 97. P. 379–386.
<https://doi.org/10.1094/pdis01-12-0078-re>
- Sharp E.L. Prepenetration and postpenetration environment and development of *Puccinia striiformis* on wheat. *Phytopathology*. 1965. V. 55 (2). P. 198–203.
- Singh R.P., Hodson D.P., Jin Y. et al. Emergence and spread of new races of wheat stem rust fungus: Continued threat to food security and prospects of genetic control. *Phytopathology*. 2015. V. 105 (7). P. 872–884.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-15-0030-FI>
- Stubbs R.W. Influence of light intensity on the reactions of wheat and barley seedlings to *Puccinia striiformis*. *Phytopathology*. 1967. V. 57 (6). P. 615–619.
- Walter S., Ali S., Kemen E. et al. Molecular markers for tracking the origin and worldwide distribution of invasive strains of *Puccinia striiformis*. *Ecol. Evol.* 2016. V. 6 (9). P. 2790–2804.
<https://doi.org/10.1002/ece3.2069>
- Wellings C.R. Global status of stripe rust: A review of historical and current threats. *Euphytica*. 2011. V. 179 (1). P. 129–141.
<https://doi.org/10.1007/s10681-011-0360-y>
- Zadoks J.C., Bouwman J.J. Epidemiology in European. In: A.A. Roelfs, W.R. Bushnell (eds). The cereal rusts. Vol. 2: Diseases, distribution, epidemiology, and control. Acad. Press, Orlando, 1985, pp. 329–369.
- Zeleneva Y.V., Sudnikova V.P., Buchneva G.N. Immunological characteristics of soft winter wheat varieties in conditions of the CBR. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022. № 96. P. 95–99 (in Russ.).
<https://doi.org/10.21515/1999-1703-96-95-99>
- Богоявленская Р.А. (Bogoyavlenskaya) Специализация вида *Puccinia glumarum* (Schmidt) Eriks. et Henn. // Ботанический журнал. 1962. Т. 47 (8). С. 1197–1201.
- Георгиевская Н.А. (Georgievskaya) К познанию закономерностей развития желтой ржавчины пшеницы // Труды ВИЗР. 1966. № 26. С. 55–63.
- Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л. (Gulyaeva, Shaydayuk) Вирулентность российских популяций возбудителя желтой ржавчины пшеницы // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. № 4. С. 299–304.
- Зеленева Ю.В., Судникова В.П., Бучнева Г.Н. (Zeleneva et al.) Иммунологическая характеристика сортов озимой мягкой пшеницы в условиях ЦЧР // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 96. С. 95–99.
- Кайдаш А.С., Шинкарев В.П., Афонин С.П. (Kaydash et al.) Увеличение степени видимого заражения растений пшеницы желтой ржавчиной за счет роста мицелия в листьях // Микология и фитопатология. 1975. Т. 9. № 1. С. 57–60.
- Койшибаев М. (Koyshibaev) О международной конференции по желтой ржавчине // Микология и фитопатология. 2002. Т. 36. № 4. С. 83–85.
- Краева Г.А., Матвеев А.Н. (Kraeva, Matveenko) Расовый состав *Puccinia striiformis* West. на злаках в условиях Северного Кавказа // Микология и фитопатология. 1974. Т. 8. № 6. С. 521–523.
- Кузнецова Р.А. (Kuznetsova) Специализация вида *Puccinia glumarum* и роль злаковых трав в передаче инфекции на зерновые культуры. Автореф. дисс. ...

канд. биол. наук. Л.: Всесоюзный научно-исследовательский институт защиты растений (ВИЗР), 1956. 20 с.

Михайлова Л.А., Гультяева Е.И., Мироненко Н.В. (Mikhailova et al.) Методы исследований структуры популяции возбудителя бурой ржавчины пшеницы //

Сборник методических рекомендаций по защите растений. СПб.: ВИЗР, 1998. С. 105–126.

Попов Д.Ф. (Поров) Местные источники возбудителя желтой ржавчины пшеницы в Алтайском крае // Сибирский вестник. 1979. № 3. С. 63–66.

Characterization of the Northwestern Population of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* on the Basis of Virulence and Representation of Invasive *PstS1* and *PstS2* Races

E. L. Shaydayuk^{a,#} and E. I. Gulyaeva^{a,##}

^aAll Russian Institute for Plant Protection, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: eshaydayuk@bk.ru

^{##}e-mail: eigulyaeva@gmail.com

The expansion of the area of significance of yellow rust was observed in the last years. Until recently, in the conditions of the North-West, the disease occurred sporadically. However, in recent years, its strong development has been observed on wheat samples studied on the collection fields of scientific research institutes and State variety plots, as well as on some commercial fields in the Leningrad region. The aim of this work is to study the virulence and racial composition of the yellow rust pathogen in the Northwest and to conduct a molecular analysis of population samples for the presence of invasive races *PstS1* and *PstS2*. Leaves of common wheat samples with of *Puccinia striiformis* urediniopustules were collected on commercial fields, State variety plots and experimental fields of the Research Institutes in 2020–2022. Near isogenic Avocet lines (Av NIL) with genes *Yr1*, *Yr5*, *Yr6*, *Yr7*, *Yr8*, *Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr18*, *Yr24*, *Yr26*, *YrSp*, *Yr27* and differential varieties from international [Chinese 166 (*Yr1*), Lee (*Yr7*, *Yr+*), Heines Kolben (*Yr6*, *Yr+*), Vilmorin 23 (*Yr3*), Moro (*Yr10*, *YrMor*), Strubes Dickkopf (*YrSD*, *Yr25*, *Yr+*), Suwon 92/Omar (*YrSu*, *Yr+*)] and European [Hybrid 46 (*Yr4*, *Yr+*), Reichersberg 42 (*Yr7*, *Yr+*), Heines Peko (*Yr2*, *Yr6*, *Yr25*, *Yr+*), Nord Desprez (*Yr3*, *YrND*, *Yr+*), Compair (*Yr8*, *Yr19*), Carstens V (*Yr32*, *Yr25*, *Yr+*), Spaldings Prolific (*YrSP*, *Yr+*), Heines VII (*Yr2*, *Yr25*, *Yr+*)] sets used for characteristic of pathogen virulence. Set of SCAR markers (SCP19M24a1, SCP19M24a2, SCP19M26a1, SCP19M26a2) used for identification of invasive races. A total 92 isolates were studied. High effectiveness at the seedling stage had genes *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24*, *Yr26*. Isolates virulent to differential varieties Moro (*Yr10*, *YrMor*) and Nord Desprez (*Yr3*, *YrND*, *Yr+*) was not determined. Virulence to wheat genotypes with *Yr17* gene was rare. Twenty-four virulence phenotypes identified using 29 virulence testers. The number of virulence alleles varied from 7 to 21. At the same time, differences between the phenotypes of *P. striiformis* on the studied common wheat varieties were insignificant. Most of them have united in a common group. Two groups of isolates slightly differentiated from them. The first included isolates from varieties characterized by a smaller number of virulence alleles, the second – with the maximum number of virulence alleles. Molecular analysis of the northwestern population revealed isolates belonging to the invasive *PstS2* group in 2020 and 2022. Their virulence did not differ significantly from other northwestern phenotypes. The high evolutionary potential predetermines the need for annual monitoring of pathogen populations based on virulence and representation of invasive races.

Keywords: invasive races, molecular markers, *Puccinia striiformis*, populations, *Triticum aestivum*, *Yr*-genes