

ГРИБЫ – ВОЗБУДИТЕЛИ БОЛЕЗНЕЙ РАСТЕНИЙ

УДК 632.4.01/08

ВИРУЛЕНТНОСТЬ РОССИЙСКИХ ПОПУЛЯЦИЙ ВОЗБУДИТЕЛЯ ЖЕЛТОЙ РЖАВЧИНЫ ПШЕНИЦЫ

© 2020 г. Е. И. Гультаева^{1,*}, Е. Л. Шайдаюк^{1,**}¹ Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: eigulyaeva@gmail.com

**e-mail: eshaydayuk@bk.ru

Поступила в редакцию 23.04.2020 г.

После доработки 30.04.2020 г.

Принята к публикации 11.05.2020 г.

Желтая ржавчина (возбудитель *Puccinia striiformis*) – распространенное заболевание мягкой пшеницы в России. До настоящего времени популяционные исследования патогена проводились только на Северном Кавказе. Тем не менее, заболевание sporadически отмечается и в других регионах. В данной работе впервые проведен сравнительный анализ популяций *P. striiformis* по вирулентности и расовому составу из географически отдаленных регионов РФ. Инфекционный материал был собран в 2019 г. в Северо-Кавказском (Краснодарский край), Северо-Западном (Ленинградская обл.) и Западно-Сибирском (Новосибирская обл.) регионах. Вирулентность и расовый состав *P. striiformis* изучили с использованием международного и европейского наборов сортов-дифференциаторов и изогенных линий Avocet с 20 генами *Yr*. Всего проанализировано 77 монопустульных изолятов, в том числе 32 из краснодарской, 31 из ленинградской и 14 из новосибирской популяций. В краснодарской популяции выявлено 3 расы (111E247, 109E247, 111E214), ленинградской – 2 (111E247, 110E247), новосибирской – 1 (111E231). Все идентифицированные расы авирулентны к сортам Мого (*Yr10*), Nord Desprez (*Yr3a*, *Yr4a*). Варьирование частот вирулентности отмечено на сортах Carstens V (*Yr32*), Lee (*Yr7*, *Yr22*, *Yr23*) и Chinese 166 (*Yr1*). Раса 111E247 была общей для краснодарской и ленинградской популяций. Раса 111E231, отмеченная в новосибирской популяции, отличалась от других рас авирулентностью к сорту-дифференциатору Compair (*Yr8*). При анализе популяций на линиях Avocet все изоляты были авирулентны к *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr24*, *Yr26* и вирулентны к *Yr6*, *Yr7*, *Yr6*, *Yr9*, *Yr18*, *YrSp*, *YrSk(27)*, *YrJr(18)*, *YrAS*. Варьирование частот наблюдали на линиях с генами *Yr1*, *Yr8*, *Yr11* и *Yr12*. Существенные различия между популяциями наблюдали на линии с геном *Yr11*. Краснодарские изоляты были вирулентными, новосибирские – авирулентными. В ленинградской популяции частота изолятов вирулентных к линии с геном *Yr11* составила 12%. Авирулентность к *Yr12* отмечена только в ленинградской популяции, а к *Yr8* – в новосибирской. Все новосибирские и краснодарские изоляты были вирулентными к линии с геном *Yr1*; среди ленинградских выявлено 12% авирулентных. По индексу Космана (K_{Vm}), характеризующему генетические расстояния между популяциями по частотам вирулентности и фенотипическому составу, различия между северокавказской и ленинградской популяциями *P. striiformis* были ниже (K_{Vm} = 0.08), чем этих двух популяций с новосибирской (K_{Vm} = 0.13). Предварительные популяционные исследования возбудителя желтой ржавчины указывают на определенную географическую дифференциацию патогена на территории России. Высокоэффективные *Yr*-гены могут быть рекомендованы для селекции на устойчивость к желтой ржавчине.

Ключевые слова: популяции, *Yr*-гены, *Puccinia striiformis*, *Triticum aestivum*

DOI: 10.31857/S0026364820040042

Желтая ржавчина (возбудитель *Puccinia striiformis* West.) – распространенное заболевание мягкой пшеницы, при котором поражаются листья, листовые влагалища, колосковые чешуи и реже стебли. На них появляются лимонно-желтые урединиопустулы, располагающиеся продольными рядами. Отличительной чертой *P. striiformis* от других возбудителей ржавчины пшеницы является развитие в условиях пониженных температур (2–15°C) при повышенной влажности воздуха.

В России желтая ржавчина относится к болезням, имеющим региональное значение. На Север-

ном Кавказе каждые 3–4 года из 10 лет наблюдаются эпифитотии. Потери урожая в этот период достигают 20–30% (Sanin, 2010). Sporadически заболевание отмечается в Нечерноземной зоне России, в Поволжье и на Алтае (Porov, 1979; Zhukova, Kupriyanova, 1891; Peresypkin, 1989; Lebedev et al., 2009; Gulyaeva et al., 2018). В Ленинградской обл. возбудитель ежегодно отмечается на сортах пшеницы и тритикале, изучаемых на государственных сортоучастках, и в отдельные годы заболевание имеет широкое распространение на экспериментальных и производственных посевах

(Gulyaeva et al., 2007, 2018). Глобальные изменения климата могут усилить риск появления данной болезни и в других регионах (Levitin, 2012). Например, сильное распространение желтой ржавчины мы наблюдали в 2018 году на селекционных посевах яровой мягкой и твердой пшеницы Омского аграрного центра. В 2019 году желтая ржавчина отмечена на экспериментальных посевах Сибирского НИИ растениеводства и селекции (СИБНИИРС) в Новосибирской обл. [перс. сообщение Е.С. Сколотневой (ИЦИГ) и В.В. Пискарева (СибНИИРС)].

Научно обоснованная стратегия генетической защиты пшеницы от болезней предполагает подбор и пространственное размещение сортов с различными генотипами. Осуществление этого невозможно без исследования вирулентности и расового состава популяций патогена (Sanin, 2010). Анализ вирулентности популяций *P. striiformis* до настоящего времени проводился только в Северо-Кавказском регионе России (Matvienko, 1973; Kraeva et al., 1973; Anpilogova, 1983; Volkova, 2006; Shumilov et al., 2015). Показано, что в эпифитотийные годы источником инфекции является воздушный занос спор из Закавказья в Дагестан, Осетию, Ингушетию, Кабардино-Балкарию, предгорные и прилежащие к ним степные районы Ставропольского и Краснодарского краев (Anpilogova et al., 1995). О происхождение инфекции в других регионах РФ информация отсутствует.

Расширение ареала *P. striiformis* на территории России предопределяет актуальность проведения более масштабных исследований данного патогена. Особый интерес представляет выявление источника происхождения популяций *P. striiformis* в географически отдаленных регионах России и анализ генетической структуры патогена для выявления ареалов популяций. Такие работы были начаты нами в 2019 г. Целью их является анализ вирулентности и расового состава популяций *P. striiformis* в географически отдаленных регионах РФ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовали инфекционный материал *P. striiformis* из трех географически отдаленных регионов РФ (Северо-Кавказский, Северо-Западный, Западно-Сибирский). Образцы популяций на Северо-Западе собирали на опытном поле Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (Санкт-Петербург, Пушкин) и на Гатчинском государственном сортоучастке; на Северном Кавказе – на селекционных посевах Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко (Краснодар). В обеих точках в 2019 г. наблюдали сильное развитие болезни. В Западной Сибири материал желтой ржавчины был отобран на коллекционном посеве Сибирского НИИ растениеводства и селекции и любезно предоставлен нам В.В. Пискаревым.

Работа с возбудителем желтой ржавчины требует поддержания определенных условий инкубации зараженных растений: контрастных температур (8–20°C), влажности (70–100%), и освещенности (15000–30000 люкс), что лимитирует широкое изучение патогена в России и за рубежом. В отличие от *P. triticina* и *P. graminis*, уже через две недели после сбора выделение *P. striiformis* из сухих листьев пшеницы практически неосуществимо, из-за потери жизнеспособности спор. В связи с этим, мы использовали свежесобранные листья пшеницы с урениниопустулами (1–5-дневные). В лаборатории разрезали их на отрезки по 5–8 см и раскладывали в чашки Петри. Концы листьев прикрывали ватой, смоченной раствором бензимидазола (0.004%) и помещали в холодильник (температура 3–5°C) на 2–4 дня (Mikhailova et al., 1998). Данный прием позволял стимулировать свежее спороношение патогена. Споры собирали вакуумным насосом со специальной мини-насадкой. Для размножения популяций 10–12-дневные растения универсально восприимчивого сорта пшеницы Мичиган Амбер инокулировали водной суспензией спор (с добавлением детергента Твин 80). После заражения горшки закрывали каркасами с полиэтиленовыми изоляторами, переносили в климатическую камеру Versatile Environmental Test Chamber MLR-352H (“SANYO Electric Co., Ltd.”, Япония) и выдерживали в темноте при температуре 10°C в течение 14–16 ч. Далее каркасы снимали, и растения инкубировали в течение шести часов при температуре 20–22°C, интенсивном освещении (25000–30000 люкс) и влажности 100%. После этого устанавливали следующие условия: 16 ч – температура 16°C, влажность 70%, освещенность 15000–20000 люкс; 8 ч – без освещения, температура 10°C, влажность 70%. Первые симптомы болезни (пустулы) наблюдали через 14–18 дней. Сбор спор проводили на 18–20-е сутки после инокуляции. Для получения монопустульных изолятов использовали листья с отдельно расположенными пустулами, которые были размножены по вышеописанной методике. Для предотвращения контаминации изолятов, растения в течение всего периода были закрыты каркасом со специальным перфорированным полиэтиленом.

Расовый состав *P. striiformis* изучали с использованием международного и европейского наборов сортов-дифференциаторов. Международный набор включал семь сортов: Chinese 166 (*Yr1*), Lee (*Yr7*, *Yr22*, *Yr23*), Heines Kolben (*Yr6*), Vilmorin 23 (*Yr3a*), Moro (*Yr10*), Strubes Dickkopf, Suwon 92/Omar; европейский восемь: Hybrid 46 (*Yr3b*, *Yr4b*), Reichersberg 42 (*Yr7*), Heines Peko, Nord Desprez (*Yr3a*), Compair (*Yr8*), Carstens V, Spaldings Prolific, Heines VII (*Yr2*) (Volkova et al., 2020).

Для изучения эффективности *Yr*-генов и характеристики популяций по вирулентности использовали изогенные линии Avocet с генами *Yr1*, *Yr5*, *Yr6*, *Yr7*, *Yr8*, *Yr9*, *Yr10*, *Yr11*, *Yr12*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr18*,

Yr24, *Yr26*, *YrSk(27)*, *YrAR*, *YrSp*. Семена сортов-дифференциаторов были любезно предоставлены А.С. Рсалиевым (НИИ проблем биологической безопасности, Казахстан, Жамбылская обл.).

Для обозначения рас, определенных с использованием международного и европейского наборов, использовали десятичную аббревиатуру. Основу ее составляет двоичная система обозначения типов инфекции [устойчивый тип реакции (R) обозначается как 0, восприимчивый (S) как 1] и десятичная система обозначения каждого сорта (первый дифференциатор 2^0 , второй 2^1 , третий 2^2 , и т.д.). Согласно этой системе, если поразились только первый сорт-дифференциатор (2^0), то это раса 1, если первый и второй ($2^0 + 2^1$), то раса 3, т.е. суммарное значение и является номером расы. Ввиду того, что использовали два набора сортов-дифференциаторов, международный и европейский, при наименовании расы сначала указывали номер по международному набору, затем номер по европейскому набору с приставкой E (например, 1E3).

В анализе вирулентности использовали 14–16-дневные растения сортов-дифференциаторов и *Yr*-линий (фаза 2 листа). Заражение и последующая инкубация выполнена по методике, описанной выше. Каждый монопустульный изолят тестировали на дифференциаторах дважды; в случае несовпадения реакции, эксперимент повторяли до получения стабильного результата.

Тип реакции дифференциаторов оценивали по шкале G. Gassner и W. Straib (1928), где балл 0 – иммунитет (симптомы поражения отсутствуют), балл “0” – высокая устойчивость (пустулы отсутствуют, некротические пятна), балл 1 – устойчивость (немногочисленные очень мелкие пустулы с некрозами), балл 2 – умеренная устойчивость (образование пустул слабое, пустулы мелкие с некрозами), балл 3 – умеренная восприимчивость (средние и крупные пустулы с некрозами и хлорозами), балл 4 – высокая восприимчивость (крупные пустулы с хлорозами). Растения с баллами 0–2 относили к устойчивым, с баллами 3–4 – к восприимчивым.

Генетические различия между популяциями оценивали с использованием индексов Нея (*Nei_distance*, N), Роджерса (R) и Космана (KbM). Первый (N) характеризует расстояния по частотам вирулентности, второй (R) по расовому составу, третий (KbM) комплексно по частотам вирулентности и фенотипическому составу. Статистический анализ проводили с использованием программы VAT (*Virulence Analysis Tools*) (Kosman et al., 2008). Построение диаграмм выполнено в пакете программ GenAlEx (опции Genetic distance и Principal coordinates analysis (PCoA)).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего изучено 77 монопустульных изолятов *P. striiformis*, в том числе 32 краснодарских, 31 ле-

Таблица 1. Характеристика региональных российских популяций *Puccinia striiformis* по вирулентности и расовому составу (2019 г.)

Показатель	Популяции <i>P. striiformis</i>		
	1	2	3
Число изученных изолятов	32	31	14
Число выявленных рас ^а	3	2	1
Частота рас (%):			
111E247	63	88	0
109E247	12	0	0
111E214	25	0	0
110E247	0	12	0
111E231	0	0	100
Частота вирулентности к линиям Avocet с генами <i>Yr</i> (%):			
<i>Yr</i> : 5, 10, 15, 17, 24, 26	0	0	0
<i>Yr1</i>	100	88	100
<i>Yr8</i>	100	100	0
<i>Yr11</i>	100	12	0
<i>Yr12</i>	100	0	100
<i>YrAR</i>	63	100	100
<i>Yr</i> : 6, 7, 9, 18, Sp, Sk(27), Jr(18), AvS	100	100	100
Среднее число аллелей вирулентности ^б	13.6	12.1	12
Общее число фенотипов ^б	3	3	1

Примечание. Популяции *P. striiformis*: 1 – краснодарская, 2 – ленинградская, 3 – новосибирская. ^аРасы, выявленные с использованием международного и европейского наборов сортов-дифференциаторов; ^бПри использовании 20 линий Avocet с генами *Yr*; ^врасы, выявленные при анализе на линиях Avocet и сортах-дифференциаторах.

нинградский и 14 новосибирских. Результаты изучения региональных популяций представлены в табл. 1.

С использованием сортов-дифференциаторов в краснодарской популяции выявлено 3 расы (111E247, 109E247, 111E214), ленинградской – 2 (111E247, 110E247), новосибирской – 1 (111E231). Все идентифицированные расы авирулентны к сортам Mogo (*Yr10*), Nord Desprez (*Yr3a*, *Yr4a*). Раса 111E247 была общей для краснодарской и ленинградской популяций (частота 63 и 88% соответственно). Эта раса вирулентна ко всем сортам-дифференциаторам, за исключением Mogo и Nord Desprez. Раса 111E231, выявленная в новосибирской популяции, отличалась от 111E247 авирулентностью к сорту Compair (*Yr8*). Другие идентифицированные расы различались между собой авирулентностью к сортам-дифференциаторам Chinese 166 (*Yr1*) (раса 110E247), Lee (*Yr7*, *Yr22*, *Yr23*) (раса 109E247) и Carstens V (*Yr32*) (раса 111E214) и были представлены умеренно.

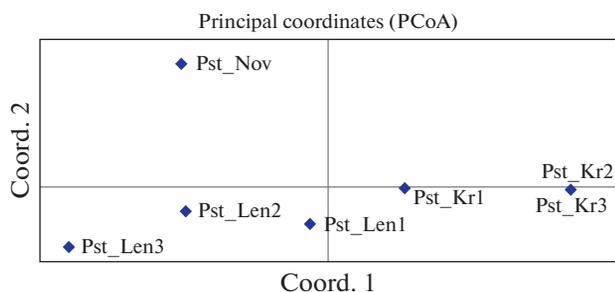


Рис. 1. Многомерная диаграмма расстояний между фенотипами вирулентности, выявленными в региональных российских популяциях *Puccinia striiformis*: Pst – изоляты (Kr – краснодарские, Len – ленинградские, Nov – новосибирские).

Разнообразие расового состава краснодарской и ленинградской популяций было выше, чем новосибирской. Согласно индексу Роджерса (R) новосибирская популяция *P. striiformis* отличалась от ленинградской и краснодарской ($R = 1$), а между ленинградской и краснодарской наблюдали умеренное сходство ($R = 0.37$).

Аналогичные различия между изученными популяциями отмечены и при использовании изо-генных *Yr*-линий Avocet (табл. 1). Все изоляты авирулентны к линиям с генами *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr24*, *Yr26* и вирулентны к носителям генов *Yr6*, *Yr7*, *Yr6*, *Yr9*, *Yr18*, *YrSp*, *YrSk(27)*, *YrJr(18)*, *YrAS*. Большинство изолятов были вирулентны к *Yr1*, за исключением 12% ленинградских. Существенные различия между популяциями наблюдали по вирулентности к линиям с генами *Yr8*, *Yr11* и *Yr12*. Все краснодарские изоляты вирулентны к образцу с геном *Yr11*, новосибирские – авирулентны; в ленинградских частота вирулентности к *Yr11* составила 12%. Авирулентность к линии с геном *Yr12* наблюдали только в ленинградской популяции, к *Yr8* – только в новосибирской. Для новосибирской популяции полученные сведения согласуются с анализом на сорте Compaig, несущем также ген *Yr8*. Согласно индексу Нея (Nei distance, N), характеризующему генетические расстояния по частотам вирулентности, новосибирская популяция умеренно отличалась ($N = 0.11$) от краснодарской и ленинградской ($N = 0.09$).

Сводный анализ вирулентности популяций *P. striiformis* на 35 тестерах (набор дифференциаторов и Avocet *Yr*-линии) выявил 7 фенотипов: по три фенотипа в северокавказской и краснодарской популяциях, один в новосибирской. Общие фенотипы в географически отдаленных популяциях не выявлены. Многомерная диаграмма генетических расстояний между определенными фенотипами представлена на рис. 1. На диаграмме новосибирские изоляты выделились в отдельную группу. Краснодарские и ленинградские изоляты также различались между собой, но в меньшей степени, чем с новосибирскими.

По индексу Космана (KbM), характеризующему комплексные расстояния между популяциями

по частотам вирулентности и фенотипическому составу, различия между краснодарской и ленинградской популяциями были ниже ($KbM = 0.08$), чем этих двух популяций с новосибирской ($KbM = 0.13$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ вирулентности российских популяций *P. striiformis* указывает на существование определенной географической дифференциации. Это согласуется с ранее проведенными исследованиями возбудителя бурой ржавчины (Gulyaeva et al., 2020) в которых различия между северокавказской и северо-западной популяциями также были ниже, чем этих двух популяций с азиатской.

По некоторым данным (Anpilogova, 1980; Volkova, 2006), до 2005 г. северокавказская популяция характеризовалась низким разнообразием расового состава, но, начиная с 2010 г., оно начало существенно нарастать. Так в 2009–2011 гг., выявлено 108 рас, среди которых широко представленными были 15 рас (Shumilov et al., 2015). В аналогичных исследованиях в 2013–2015 гг. проанализировано 130 клонов гриба и идентифицировано 126 фенотипов вирулентности, т.е. каждый проанализированный изолят имел свой фенотип вирулентности. Высокой эффективностью в регионе характеризовались гены *Yr3*, *Yr5*, *Yr24*, *Yr26* и *YrSp* (Volkova et al., 2020). В данных исследованиях внутривидовое разнообразие северокавказской популяции *P. striiformis* в 2019 г. было ниже. Среди 32 изолятов выявлено лишь три фенотипа, т.е. высокую долю в популяции составляла клональная фракция. Подтверждена высокая эффективность генов *Yr5*, *Yr24* и *Yr26*.

Полученные нами результаты согласуются с исследованиями популяций *P. striiformis*, проводимыми в Global Rust Reference Center (GRRC) в Дании в Ахуском университете (Aarhus University) (Novmøller et al., 2002, 2017). В этих исследованиях эффективностью характеризовались гены *Yr5* и *Yr15*, *Yr10* и *Yr24*. Большинство изолятов из Центральной и Южной Азии характеризовались авирулентностью к *Yr8*, что мы наблюдали в новосибирской популяции.

В российских сортах мягкой пшеницы широкое распространение имеют гены *Yr9* и *Yr18*. Ген *Yr9* содержится в пшенично-ржаной транслокации 1BL.1RS, несущей комплекс генов устойчивости *Lr26/Sr31/Pm8*, и относится к группе генов, обеспечивающих расоспецифическую устойчивость. Вероятно, длительное выращивание сортов с этой транслокацией в России предопределило потерю эффективности гена *Yr9*, как это наблюдается и для сцепленного с ним гена устойчивости к бурой ржавчине *Lr26* и гена устойчивости к мучнистой росе *Pm8*. Кластер *Yr18/Lr34/Sr57/Pm38* обуславливает количественную устойчивость к бурой, стеблевой ржавчине и мучнистой росе в фазе взрослых

растений (Radchenko et al., 2020). Сорты с геном *Yr18* также выращиваются в России более полувека, что предопределило потерю его эффективности.

Предварительные популяционные исследования указывают на определенную географическую дифференциацию возбудителя желтой ржавчины на территории России. Последующие исследования позволяют уточнить данное предположение. Высокоэффективные Yr-гены могут быть рекомендованы для селекции на устойчивость к желтой ржавчине.

Исследования поддержаны Российским научным фондом, проект № 19-76-30005. Огромная благодарность сотрудникам Национального центра зерна и СибНИИРС-филиал ИЦиГ СО РАН за помощь в сборе инфекционного материала *Puccinia striiformis*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Anpilogova L.K.* Differentiation of races of the yellow rust pathogen (*Puccinia striiformis* West. f. sp. *tritici* Erikss. et Henn.) based on resistance genes detected in wheat varieties. Abstract Cand. biol. Thesis. Moscow, 1980 (in Russ.).
- Anpilogova L.K.* The racial composition of the causative agent of yellow rust of wheat. Selskoye khozyaystvo za rubezhom. 1983. V. 11. P. 20–24 (in Russ.).
- Anpilogova L.K., Alekseeva T.P., Levashova G.I., Vaganova O.F.* Effective resistance genes of adult wheat plants to leaf, stem and yellow rust, powdery mildew and their use in breeding in the North Caucasus. In: *M.S. Sokolova, Ye.P. Ugryumova* (ed.). Proizvodstvo ekologicheski bezopasnoy produktsii rasteniyevodstva: Regionalnyye rekomendatsii. V.1. Pushchino, 1995, pp. 79–100 (in Russ.).
- Chen W., Wellings C., Chen X., Kang Z., Liu T.* Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. Mol. Plant Pathol. 2014. V. 15 (5). P. 433–446 <https://doi.org/10.1111/mpp.12116>
- Chen X.M.* Epidemiology and control of stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) on wheat. Can. J. Bot. 2005. V. 27. P. 314–337. <https://doi.org/10.1071/ar07045>
- 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.
- Gulyaeva E.I., Levitin M.M., Semenyakina N.F., Nikiforova N.V., Savelyeva N.I.* Diseases of cereals in the North-West region of Russia. Plant Protection and Quarantine. 2007. V. 6. P. 15–16 (in Russ.).
- Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Shipilova N.P., Levitin M.M., Maslova I.V., Vusatyuk M.P., Kolesnikova O.A.* Diseases of cereals in the Northwest Region in 2017. Plant Protection and Quarantine. 2018. V. 4. P. 19–21 (in Russ.).
- Hovmöller M.S., Rodriguez-Algaba J., Thach T., Justesen A.F., Hansen J.G.* Report for *Puccinia striiformis* race analyses and molecular genotyping 2017 https://agro.au.dk/fileadmin/Summary_of_Puccinia_striiformis_race_analysis_2017.pdf
- Kosman E., Dinoor A., Herrmann A., Schachtel G.A.* Virulence analysis tool (VAT). User Manual. 2008. <http://www.tau.ac.il/lifesci/departments/plants/members/kosman/VAT.html>
- Kraeva G.A., Anpilogova L.K., Shopina V.V., Mikhailova L.A.* Identification of genes conditioning virulence of causal agents of brown and yellow rusts of wheat. Mikologiya i fitopatologiya. 1973. V. 7 (4). P. 312–317 (in Russ.).
- Lebedev V.B., Yusupov D.A., Mikhaylin N.V., Kudimova L.M., Nazarova L.N., Minaeva E.M.* Monitoring fungal diseases of wheat and their harmfulness in the Volga region. Plant Protection and Quarantine. 2009. V. 12. P. 35–37 (in Russ.).
- Levitin M.M.* Climate change and the forecast of development of plant diseases. Mikologiya i fitopatologiya. 2012. V. 46 (1). P. 4–19 (in Russ.).
- Matvienko A.N.* The races composition of wheat yellow rust causative agent in the North Caucasus. Selektiya i semenovodstvo. 1973. V. 5. P. 36–38 (in Russ.).
- Mikhailova L.A., Gulyaeva E.I., Mironenko N.V.* Methods for studying the structure of populations of the leaf rust causative agent. St. Petersburg, 1998. P. 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.).
- Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Anisimova I.N.* Genetic diversity of cereal crops for powdery mildew resistance. Ecological Genetics. 2020. V. 18 (1). P. 59–78. <https://doi.org/10.17816/ecogen14530>
- Sanin S.S., Nazarova L.N.* Phytosanitary situation on wheat crops in the Russian Federation (1991–2008). Plant Protection and Quarantine. 2010. V. 2. P. 69–80 (in Russ.).
- Shumilov Yu.V., Volkova G.V., Nadykta V.D.* Population structure of wheat stripe rust pathogen by virulence in the North Caucasus. Mikologiya i fitopatologiya. 2015. V. 49 (3). P. 194–200 (in Russ.).
- Volkova G.V.* The structure and variability of the populations of pathogens of leaf and yellow rust of wheat in the North Caucasus and the rationale for the management of intrapopulation processes. Dr. Sci. Thesis. Krasnodar, 2006 (in Russ.).
- Volkova G.V., Mateeva I.P., Kudinova O.A.* Virulence of the wheat stripe rust pathogene population in the North-Caucasus Region of Russia. Mikologiya i fitopatologiya. 2020. V. 54 (1). P. 33–41 (in Russ.).
- 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>
- Zhukova L.V., Kupriyanova V.K.* Autumn inoculum sources of *Puccinia striiformis* West. in the Non-chernozem belt. Mikologiya i fitopatologiya. 1981. V. 15 (6). P. 504–507 (in Russ.).
- Анпилогова Л.К.* (Anpilogova) Дифференциация рас возбудителя желтой ржавчины (*Puccinia striiformis* West. f. sp. *tritici* Erikss. et Henn.) на основе выявленных у сортов пшеницы генов устойчивости: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва: ВНИИФ, 1980. 34 с.
- Анпилогова Л.К.* (Anpilogova) Расовый состав возбудителя желтой ржавчины пшеницы. Сельское хозяйство за рубежом. 1983. Т. 11. С. 20–24.
- Анпилогова Л.К., Алексеева Т.П., Левашова Г.И., Ваганова О.Ф.* (Anpilogova et al.) Эффективные гены устойчивости взрослых растений пшеницы к бурой, стеблевой, желтой ржавчине, мучнистой росе и их использование в селекции на Северном Кавказе // М.С. Соколова, Е.П. Угрюмова (ред.). Производство экологически безопасной продукции растениеводства: Региональные рекомендации. Пушкино, 1995. Т. 1. С. 79–100.
- Волкова Г.В.* (Volkova) Структура и изменчивость популяций возбудителей бурой и желтой ржавчины пшени-

- цы на Северном Кавказе и обоснование приемов управления внутрипопуляционными процессами: Дисс. ... докт. биол. наук. Краснодар, 2006.
- Волкова Г.В., Матвеева И.П., Кудинова О.А. (Volkova et al.) Вирулентность популяции возбудителя желтой ржавчины пшеницы в Северо-Кавказском регионе России // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54, № 1. С. 33–41.
- Гультяева Е.И., Левитин М.М., Семенякина Н.Ф., Никифорова Н.В., Савельева Н.И. (Gulyaeva et al.) Болезни зерновых культур в Северо-Западном регионе России // Защита и карантин растений. 2007. № 6. С. 15–16.
- Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Шипилова Н.П., Левитин М.М., Маслова И.В., Вусатюк М.П., Колесникова О.А. (Gulyaeva et al.) Болезни зерновых культур в Северо-Западном регионе в 2017 г. // Защита и карантин растений. 2018. № 4. С. 19–21.
- Жукова Л.В., Курпьянова В.К. (Zhukova, Kupriyanova) Источники осенней инфекции озимой пшеницы желтой ржавчиной *Puccinia striiformis* West. в Нечерноземье // Микология и фитопатология. 1981. Т. 15, № 6. С. 504–507.
- Краева Г.А., Анпилогова Л.К., Шопина В.В., Михайлова Л.А. (Краева et al.) Выявление генов вирулентности у возбудителей бурой и желтой ржавчины пшеницы // Микология и фитопатология 1973. Т. 7, № 4. С. 12–317.
- Лебедев В.Б., Юсупов Д.А., Михайлин Н.В., Кудимова Л.М., Назарова Л.Н., Минаева Е.М. (Lebedev et al.) Мониторинг грибных болезней пшеницы и их вредоносность в условиях Поволжья // Защита и карантин растений. 2009. № 12. С. 35–37.
- Левитин М.М. (Levitin) Изменение климата и прогноз развития болезней // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46, № 1. С. 14–19.
- Матвиенко А.Н. (Matvienko) Расовый состав возбудителя желтой ржавчины пшеницы на Северном Кавказе // Селекция и семеноводство. 1973. № 5. С. 36–38.
- 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. 1998. СПб.: ВИЗР. С. 105–126.
- Попов Д.Ф. (Porov) Местные источники возбудителя желтой ржавчины пшеницы в Алтайском крае // Сибирский вестник. 1979. № 3. С. 63–66.
- Радченко Е.Е., Абдуллаев Р.А., Анисимова И.Н. (Radchenko et al.) Генетическое разнообразие зерновых культур по устойчивости к мучнистой росе // Экологическая генетика. 2020. Т. 18, № 1. С. 59–78.
- Санин С.С., Назарова Л.Н. (Sanin, Nazarova) Фитосанитарная обстановка на посевах пшеницы в Российской Федерации (1991–2008 гг.) // Защита и карантин растений. 2010. № 2. С. 69–80.
- Шумилов Ю.В., Волкова Г.В., Надьикта В.Д. (Shumilov et al.) Структура популяции возбудителя желтой ржавчины пшеницы по вирулентности на Северном Кавказе // Микология и фитопатология. 2015. Т. 49, № 3. С. 194–200.

Virulence of Russian Populations of the Stripe Rust Causal Agent

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

^a All Russian Institute of Plant protection, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: eigulyaeva@gmail.com

^{##}e-mail: eshaydayuk@bk.ru

Yellow rust (causal agent *Puccinia striiformis*) is widely distributed in Russia disease of common wheat. Until now, pathogen population studies in Russia carry out only in North Caucasia region. But disease sporadically observed also in other regions. In first comparative analysis of pathogen populations in geographically distant regions of Russia was conducted. Infection material was collected in 2019 in the North Caucasian (Krasnodar), North-Western (Leningrad) and West Siberian (Novosibirsk) regions. The virulence and racial composition of *P. striiformis* was studied using an international and European sets of differentials and Avocet isogenic lines with 20 *Yr* genes. A total of 77 single pustule isolates were studied, including 32 from the Krasnodar, 31 from Leningrad and 9 from the Novosibirsk populations. In the Krasnodar population three races (111E247, 109E247, 111E214) were identified, two in Leningrad (111E247, 110E247), one in Novosibirsk (111E231). All identified races were avirulent to varieties Moro (*Yr10*) and Nord Desprez (*Yr3a*, *Yr4a*). Variability of virulence frequencies was revealed for virulence to varieties Carstens V (*Yr32*), Lee (*Yr7*, *Yr22*, *Yr23*) and Chinese 166 (*Yr1*). Race 111E247 was common in Krasnodar and Leningrad populations. The race 111E231 detected in the Novosibirsk' population differed from other races by avirulence to the differentiator Compair (*Yr8*). All isolates analyzing on Avocet isogenic lines were avirulent to *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr24*, *Yr26* and virulent to *Yr6*, *Yr7*, *Yr6*, *Yr9*, *Yr18*, *YrSp*, *YrSk* (27), *YrAS*. Virulence variation was observed on lines with genes *Yr1*, *Yr8*, *Yr11*, and *Yr12*. Significant differentiation between populations was observed for line with gene *Yr11*. Krasnodar isolates were virulent to *Yr11* and Novosibirsk isolates – avirulent. Virulence frequency to *Yr11* in Leningrad population consisted 12%. Avirulence to *Yr12* was determined only in Leningrad population and avirulence to *Yr8* – only in Novosibirsk. All Novosibirsk and Krasnodar isolates were virulent to *Yr1*, but in Leningrad collection of isolates 12% were avirulent. According to the Kosman index (KBm), which evaluate the complex distances between populations for virulence frequencies and phenotypic composition, the differences between the North Caucasus and Leningrad' *P. striiformis* populations were lower (KBm = 0.08) than with Novosibirsk one (KBm = 0.13). Preliminary population studies of yellow rust pathogen were revealed geographical differentiation of the pathogen populations in Russian regions. Highly effective *Yr*-gene may be recommended for resistance breeding to yellow rust.

Key words: populations, *Puccinia striiformis*, *Triticum aestivum*, *Yr*-genes