

doi 10.18699/vjgb-25-126

Внутрипопуляционные изменения *Puccinia hordei* под воздействием двухкомпонентных фунгицидов различных химических классов

М.С. Гвоздева , О.А. Кудинова  , В.Д. Руденко , Г.В. Волкова 

Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, Россия

 alosa@list.ru

Аннотация. Резистентность к фунгицидам является мировой проблемой, обуславливающей снижение их эффективности и срока действия вследствие изменения расового состава и вирулентности популяций фитопатогенов. В настоящее время зарегистрирована резистентность более чем у 230 грибных патогенов растений к 100 действующим веществам. Возбудитель карликовой ржавчины (*Puccinia hordei* Otth.) – один из распространенных и вредоносных в патокмлексе ячменя, в Южном федеральном округе, фиксируется на посевах ежегодно. Исследований по влиянию фунгицидов на характеристики популяции ржавчинных грибов крайне мало, а в отношении *P. hordei* в России не проводилось. Цель данной работы – проанализировать влияние фунгицидов из химических классов триазолов и стробилюринов на внутрипопуляционные изменения *P. hordei* по показателям патогенности (вирулентности и агрессивности) в условиях Северо-Кавказского региона России. Для исследования были выбраны двухкомпонентные фунгициды, разрешенные к применению на территории Российской Федерации: Деларо, КС; Амистар Экстра, СК; Амистар Голд, СК. Обработку растений проводили с использованием нескольких норм применения препаратов: 50, 100, 150 и 200 % (рекомендуемая норма применения принята за 100 %). При обработке растений ячменя озимого фунгицидами с различной нормой применения выявлены внутрипопуляционные изменения в структуре *P. hordei* по вирулентности. Во всех вариантах с увеличением нормы применения фунгицидов происходили снижение частоты изолятов, вирулентных к генам *Rph4*, *Rph5*, *Rph6+2*, *Rph12*, и увеличение частоты изолятов, вирулентных к *Rph14*. Не обнаружено изолятов, вирулентных к *Rph7*, как в исходной популяции, так и в вариантах опыта. Средняя вирулентность популяций гриба, обработанных фунгицидами, во всех вариантах опыта была ниже по сравнению с вирулентностью исходной популяции (без обработки) (48.5 %) и в зависимости от нормы применения варьировала от 33.8 (Амистар Голд, 50 %) до 28.5 % (Амистар Голд, 200 %). Под действием повышенных норм применения препаратов отмечено увеличение длительности латентного периода развития инфекции – от 168 ч (исходная популяция) до 216 ч (Деларо, Амистар Голд, 200 %). Под действием фунгицидов установлено снижение спорующей способности (масса спор с одной пустулы варьировала от 0.013 (исходная популяция) до 0.002 мг (Деларо, Амистар Голд, 200 %) и жизнеспособности *P. hordei* (от 100 % для исходной популяции до 22.5 % при обработке Амистар Голд, 200 %). Таким образом, популяция *P. hordei*, подвергавшаяся обработке фунгицидами, характеризуется внутрипопуляционными изменениями по показателям агрессивности и вирулентности, что может существенно увеличивать потери урожая ячменя вследствие как снижения эффективности химической защиты, так и повышения вредоносности патогена.

Ключевые слова: ячмень; карликовая ржавчина; фунгициды; *Puccinia hordei*; резистентность; патогенность; популяция

Для цитирования: Гвоздева М.С., Кудинова О.А., Руденко В.Д., Волкова Г.В. Внутрипопуляционные изменения *Puccinia hordei* под воздействием двухкомпонентных фунгицидов различных химических классов. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025;29(8):1195-1202. doi 10.18699/vjgb-25-126

Финансирование. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 23-76-10063, <https://rscf.ru/project/23-76-10063/>

Intrapopulation changes in *Puccinia hordei* induced by two-component fungicides from different chemical classes

M.S. Gvozdeva , O.A. Kudinova  , V.D. Rudenko , G.V. Volkova 

Federal Research Center of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia

 alosa@list.ru

Abstract. Fungicide resistance is a global problem that reduces the effectiveness and duration of action of these compounds due to changes in the racial composition and virulence of phytopathogen populations. Currently, resistance to 100 active substances has been registered in more than 230 fungal plant pathogens. Leaf rust of barley (*Puccinia hordei* Otth.) is one of the most widespread and harmful pathogens in the barley pathocomplex; it is

recorded in southern Russia every year. There are very few studies on the effect of fungicides on the characteristics of rust fungi populations, and none have been carried out on *P. hordei* in Russia. This research aimed to analyze the effect of fungicides belonging to the chemical classes of triazoles and strobilurins on intrapopulation changes in *P. hordei* in terms of pathogenicity (virulence and aggressiveness) under the conditions of the North Caucasus region of Russia. Two-component fungicides approved for use in the Russian Federation were selected for the study: Delaro, SC; Amistar Extra, SC; Amistar Gold, SC. Plants were treated using several application rates: 50, 100, 150 and 200 % (the recommended application rate was determined to be 100 %). Treatment of winter barley plants with fungicides with different application rates revealed intrapopulation changes in the virulence structure of *P. hordei*. In all treatment variants, the frequency of isolates virulent to the *Rph4*, *Rph5*, *Rph6+2*, *Rph12* genes decreased with increasing fungicide application rate and the frequency of isolates virulent to *Rph14* increased. No isolates virulent to *Rph7* were found in either the original population or the experimental variants. The average virulence of the fungal populations treated with the fungicides in all experimental variants was lower compared to the original population (no treatment (48.5 %)) and depending on the application rate varied from 33.8 % (Amistar Gold, 50 %) to 28.5 % (Amistar Gold, 200 %). Under the influence of the increased application rates of the fungicides, an increase in the duration of the latent period was observed: from 168 h (original population) to 216 h (Delaro, Amistar Gold, 200 %). A decrease in sporulation ability (spore mass per pustule ranged from 0.013 mg (original population) to 0.002 mg (Delaro, Amistar Gold, 200 %)) and in the viability of *P. hordei* (from 100 % for the original population to 22.5 % in Amistar Gold, 200 % treatment) was found under the action of the fungicides. Thus, a fungicide-treated *P. hordei* population is characterized by intrapopulation changes in aggressiveness and virulence, which can significantly increase barley yield losses due to a decrease in the effectiveness of chemical protection, as well as an increase in the harmfulness of the pathogen.

Key words: barley; leaf rust of barley; fungicides; *Puccinia hordei*; resistance; pathogenicity; population

For citation: Gvozdeva M.S., Kudinova O.A., Rudenko V.D., Volkova G.V. Intrapopulation changes in *Puccinia hordei* induced by two-component fungicides from different chemical classes. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii* = *Vavilov J Genet Breed.* 2025;29(8):1195-1202. doi 10.18699/vjgb-25-126

Введение

Южный федеральный округ лидирует по площади посевов озимых зерновых культур. По данным Федеральной службы государственной статистики (https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/posev-4cx_2024.xlsx), в 2024 г. доля этих культур в посевах составила 51.3 %. Ячмень озимый – перспективная культура, ценная для животноводства, способная давать стабильно высокий урожай даже в экстремально засушливых условиях юга России (Ерешко и др., 2012). В 2024 г. Краснодарский край стал лидером по сбору ячменя – было собрано 1159.5 тыс. т, что составило 7 % от объема по стране (<https://graininfo.ru/news/yachmen-ploshchadi-sbory-i-urozhaynost-v-rossii-v-2024-godu/>).

Посевы ячменя поражаются разными патогенами, вызывающими недобор урожая и потерю качества зерна (Abbas, 2022). Возбудитель карликовой ржавчины биотрофный базидиомицет *Puccinia hordei* Otth. – один из распространенных и вредоносных в патоккомплексе ячменя (Sapkota et al., 2023). В Северо-Кавказском регионе России карликовая ржавчина на посевах ячменя фиксируется ежегодно, а эпифитотии возникают 1–2 раза за 10 лет (Волкова и др., 2018). Обеспечение высоких показателей урожайности культуры невозможно без химической защиты. Помимо высокой пестицидной нагрузки на агробиоценоз, серьезной проблемой является возникновение резистентных к действующим веществам фунгицидов форм патогенов (Shcherbakova, 2019).

Резистентность к фунгицидам стала значительной мировой проблемой, обуславливающей снижение эффективности и срока действия некоторых весьма перспективных фунгицидов (Brent, Hollomon, 2007; Thind, 2021). В настоящее время резистентность зарегистрирована более чем у 230 грибных патогенов растений к 100 действующим веществам на различных культурах и в разных географических регионах (FRAC, 2020). По данным P.E. Russell (2003), ржавчинные грибы относятся к патогенам с низким

риском развития резистентности, но их быстрый жизненный цикл, распространение спор воздушно-капельным путем и смешанный способ размножения могут стать причиной внутрипопуляционных изменений (Ji et al., 2023), обусловленных быстрым распространением и накоплением резистентных форм, что приведет к снижению чувствительности к фунгицидам.

Традиционно для контроля ржавчинных болезней пшеницы и ячменя применяют фунгициды из классов триазолов и стробилуринов (Walters et al., 2012). Триазолы относятся к самому обширному классу фунгицидов, имеющих группу ингибиторов деметилирования (demethylation inhibitor group, DMI), подавляющих биосинтез эргостерола, ключевого компонента плазматической мембраны клеток гриба (Lass-Flörl, 2011). По данным FRAC (2020), риск возникновения резистентности к таким фунгицидам средний. При этом в ряде работ отмечены изменения структуры популяции биотрофных патогенов. Так, например, G. Zhan с коллегами (2022), изучая чувствительность к триадемифону у 446 изолятов *Puccinia graminis*, установили, что устойчивые к фунгициду изоляты демонстрировали сильные адаптивные признаки в отношении скорости прорастания урединиоспор, латентного периода, интенсивности спорообразования и скорости распространения поражений.

Стробилурины – не менее обширный класс фунгицидов, которые после обработки растения накапливаются в восковом слое кутикулы листа (Крупенько, 2023). В мировом масштабе стробилурины составляют 20–25 % от общего объема продаж фунгицидов, треть из которых – азоксистробин, самый продаваемый фунгицид в мире (Leadbeater, 2012). Первые устойчивые изоляты к стробилуринам обнаружены в 1998 г. у *Blumeria graminis* [DC.] в Германии через два года после их использования, а в настоящее время резистентность к стробилуринам зарегистрирована как среди биотрофных (Dodhia et al., 2021),

так и среди гембиотрофных (Ölmez et al., 2023) патогенов по всему миру.

Для карликовой ржавчины ячменя также возможен риск возникновения резистентности к фунгицидам (Walters et al., 2012). Как и все ржавчинные грибы, *P. hordei* является быстро эволюционирующим фитопатогеном (Çelik Oğuz, Karakaşa, 2021). Исследований по влиянию фунгицидов на характеристики популяции ржавчинных грибов крайне мало. Впервые в России такие работы проводились в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР) для патосистемы «пшеница–возбудитель желтой ржавчины» (Волкова, 2007). Было изучено влияние фунгицида на основе триадимефона на вирулентность и агрессивность *P. striiformis*, рассчитана скорость появления резистентных форм патогена, разработана и предложена антирезистентная стратегия применения фунгицидов с этим действующим веществом на посевах пшеницы. Далее исследования были выполнены для возбудителя бурой ржавчины пшеницы (Гвоздева, Волкова, 2022). Установлено, что популяция *P. tritricina*, обработанная химическим фунгицидом на основе тебуконазола, характеризуется изменением структуры по агрессивности и вирулентности и снижением чувствительности к токсиканту. В отношении возбудителя карликовой ржавчины ячменя подобных исследований не проводилось как в мире, так и в России. С учетом высокой вирулентности и изменчивости северокавказской популяции патогена (Danilova, Volkova, 2022) и необходимостью выработки антирезистентной стратегии для каждого патогена и ценоза (Corkley et al., 2021) исследования данного вопроса крайне актуальны.

Цель настоящей работы – анализ влияния фунгицидов из химических классов триазолов и стробилуринов на внутрипопуляционные изменения *P. hordei* по показателям патогенности (вирулентность и агрессивность) в условиях Северо-Кавказского региона России.

Материалы и методы

Исследования проводили в лабораторно-тепличном комплексе ФГБНУ ФНЦБЗР на восприимчивом к карликовой ржавчине сорте ячменя озимого Виват. Сорт селекции ФГБНУ «Аграрный научный центр “Донской”» рекомендован для возделывания в Северо-Кавказском регионе России, устойчив к полеганию и заморозкам.

Для получения спорового материала северокавказской популяции возбудителя карликовой ржавчины ячменя (далее – урединиоспоры гриба, или популяция), пораженные болезнью листья были собраны в ходе маршрутного обследования производственных посевов ячменя на территории Краснодарского, Ставропольского краев, Ростовской области и Республики Адыгея. Затем смесь гербарных образцов была прижита на восприимчивом к болезни сорте Виват по существующим методикам (Грибные патогены зерновых колосовых культур..., 2024). Собранный в необходимом количестве споровый материал хранили при температуре +4 °C.

Для исследования были выбраны двухкомпонентные фунгициды из групп триазолов и стробилуринов, разрешенные к применению на территории Российской Феде-

рации: Деларо, КС (д. в.: 175 г/л протиоконазола + 150 г/л трифлуксистробина); Амистар Экстра, СК (д. в.: 200 г/л азоксистробина + 80 г/л ципроконазола); Амистар Голд, СК (д. в.: 125 г/л азоксистробина + 125 г/л дифеноконазола).

Инокуляцию растений ячменя озимого споровой суспензией патогена осуществляли в фазу всходов. Зараженные растения выдерживали во влажной камере в течение 18 ч, затем содержали в контролируемых условиях теплицы при температуре +20–22 °C, относительной влажности воздуха 70–80 %, освещенности 10–15 тыс. лк со сменой дня и ночи (16/8 ч) (Грибные патогены..., 2000). При появлении первых признаков болезни проводили опрыскивание с использованием нескольких норм применения препаратов: 50, 100, 150 и 200 % (рекомендуемая норма применения принята за 100 %).

Собранные с растений ячменя, обработанных фунгицидами в различных нормах применения, урединиоспоры гриба *P. hordei* переносили на интактные растения для перераспространения и определения показателей агрессивности (жизнеспособность спор, длительность латентного периода, спорулирующая способность, длительность споруляции). Показатели агрессивности были определены для сборных популяций патогена, полученных, как описано выше.

Жизнеспособность спор карликовой ржавчины проверяли во влажной камере под микроскопом путем подсчета общего количества спор гриба и проросших спор (Санин и др., 1975). Длительность латентного периода считали с момента инокуляции до проявления первых признаков заболевания (Пыжикова, 1972). Спорующую способность определяли путем расчета отношения количества пустул к массе собранного биоматериала. Длительность споруляции определяли с начала раскрытия пустул до завершения споруляции (Санин и др., 1975).

Вирулентность популяций *P. hordei*, обработанных фунгицидами в различных нормах применения, определяли по реакции 20 сортов – дифференциаторов и линий ячменя из международного и австралийского наборов, содержащих известные гены устойчивости к патогену: Sudan (*Rph1*), Peruvian (*Rph2*), Estate (*Rph3*), Gold (*Rph4*), Magnif 104 (*Rph5*), Bolivia (*Rph6+2*), Cebada Capa (*Rph7*), Egypt 4 (*Rph8*), Abyssinian (*Rph9*), Triumph (*Rph12*), PI 531849 (*Rph13*), PI 584760 (*Rph14*), Prior (*Rph19*), Ricardo (*Rph21+2*), Fongtein (*Rph25*). Учет типов реакции проводили на 10–12-е сутки после инокуляции по шкале Левина и Черевика в баллах (Волкова и др., 2018). Частоты генов вирулентности рассчитывали вероятностным методом (Wolfe, Schwarzbach, 1975) по отношению числа пустул с типом реакции 3–4 балла на линиях с известными генами устойчивости к числу пустул на универсально восприимчивом сорте Виват. Для равномерного распределения спорового материала на листьях растений ячменя инокуляцию осуществляли в башне осаждения с использованием ликоподия, который смешивали со спорами гриба в соотношении 400:1 (Parlevliet, 1980).

По результатам дифференциации рассчитывали среднюю вирулентность (Михайлова и др., 2003). Различия между исходной популяцией (без обработки) и популяциями, подвергавшимися обработке с различными нормами

применения препаратов, по частотам генов вирулентности определяли по индексу Нея (Nei, 1972). Статистическую достоверность показателей агрессивности оценивали с помощью критерия Фишера ($\alpha = 0.05$) с применением программного обеспечения Statistica 10.0.

В исследованиях использованы материально-техническая база уникальной научной установки (УНУ) «Фитотрон для выделения, идентификации, изучения и поддержания рас, штаммов, фенотипов патогенов» (<https://fncbzb.ru/brk-i-unu/unique-installation-2/>) и объекты биоресурсной коллекции ФНЦБЗР «Государственная коллекция энтомоакарифагов и микроорганизмов» (<https://fncbzb.ru/brk-i-unu/unique-installation-1/>).

Результаты

При обработке растений ячменя озимого фунгицидами с различной нормой применения выявлены внутрипопуляционные изменения в структуре *P. hordei* по вирулентности (табл. 1).

В варианте с применением препарата Амистар Голд, СК при повышении нормы до 200 % от рекомендуемой наблюдалось снижение вирулентности патогена на сортах, содержащих гены устойчивости *Rph2*, *Rph6+2*, *Rph9*, *Rph14*. На линии с генами *Rph13* и *Rph25* при обработке растений ячменя препаратами с нормой применения 50 % от рекомендуемой поражения не отмечено. При увеличении нормы до 200 % тип реакции на заражение возрастал до 3 баллов.

Обработка растений ячменя фунгицидом Амистар Экстра, СК оказала влияние на популяцию гриба в сторону увеличения вирулентности к гену *Rph14*, при этом наблюдался гетерогенный тип реакции, на листе присут-

ствовали пустулы разных размеров, участки отмершей и хлоротичной тканей.

В варианте с применением фунгицида Деларо, СК отмечалось уменьшение вирулентности популяции *P. hordei* к гену *Rph14*. Тип реакции снижался от 3 (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 0 баллов (норма применения 50 % от рекомендуемой), для исходной популяции этот показатель составил 1 и 2 балла. При использовании рекомендованной нормы применения препарата (100 %) тип реакции сортов, содержащих гены устойчивости *Rph19* и *Rph9*, составил 0, 1 балл; для исходной популяции этот показатель был равен 3 баллам.

Тип поражения сортов, содержащих гены устойчивости *Rph1*, *Rph3*, *Rph4*, *Rph5*, *Rph7*, *Rph8*, *Rph12*, *Rph21+2*, во всех вариантах с применением фунгицидов, независимо от нормы применения, соответствовал типу исходной популяции (без обработки) и составил 3 балла.

В данной работе изучено влияние фунгицидов на вирулентность популяции возбудителя карликовой ржавчины ячменя (табл. 2).

Во всех вариантах с увеличением нормы применения фунгицидов происходило снижение вирулентности популяции гриба к *Rph4*, *Rph5*, *Rph6+2*, *Rph12* в варианте с применением препаратов Амистар Экстра, СК и Деларо, КС – к *Rph2*, Амистар Голд, СК и Амистар Экстра, СК – к *Rph9*. Применение изученных фунгицидов с нормой 50–150 % от рекомендуемой способствовало увеличению вирулентности популяции к *Rph14*. Под влиянием фунгицидов Амистар Голд, СК и Деларо, КС с нормой применения 150 % от рекомендуемой отмечалось увеличение вирулентности популяции к *Rph19*. Обработка растений препаратами Амистар Экстра, СК и Деларо,

Таблица 1. Тип реакции сортов-дифференциаторов на заражение северокавказской популяцией *P. hordei* под действием фунгицидов с различными нормами применения (тепличный комплекс ФНЦБЗР, 2024 г.)

№ п/п	Сорт	Ген	Амистар Голд, СК				Амистар Экстра, СК				Деларо, КС				Исходная популяция (без обработки)	
			Норма применения фунгицида, % от рекомендуемой													
			50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200		
Тип реакции сортов на заражение, балл																
1	Sudan	<i>Rph1</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
2	Peruvian	<i>Rph2</i>	3	3	3	0;	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
3	Estate	<i>Rph3</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
4	Gold	<i>Rph4</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
5	Magnif 104	<i>Rph5</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
6	Bolivia	<i>Rph6+2</i>	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
7	Cebada Capa	<i>Rph7</i>	0;	0;	0;	0;	0;	0;	0;	0;	0;	0;	0;	0;	0;	
8	Egypt 4	<i>Rph8</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
9	Abyssinian	<i>Rph9</i>	3	3	3	0;	3	3	3	3	0; 1	3	3	3	3	
10	Triumph	<i>Rph12</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
11	PI 531849	<i>Rph13</i>	0	0;	0;	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
12	PI 584760	<i>Rph14</i>	3	3	3	0;	1, 2, 3	2, 3	1, 2, 3	2, 3	3	3	3	0	1, 2	
13	Prior	<i>Rph19</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	0; 1	3	3	3	3	
14	Ricardo	<i>Rph21+2</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
15	Fong tein	<i>Rph25</i>	0;	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	

Таблица 2. Вирулентность (%) популяции *P. hordei*, обработанной фунгицидами с различными нормами применения, к линиям-носителям *Rph* генов (тепличный комплекс ФНЦБЗР, 2024 г.)

№ п/п	Сорт	Ген	Исходная популяция (без обработки фунгицидом)	Амистар Голд, СК				Амистар Экстра, СК				Деларо, КС			
				Норма применения фунгицида, % от рекомендуемой											
				50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
1	Sudan	<i>Rph1</i>	43	33	22	20	20	76	45	27	34	67	45	39	44
2	Peruvian	<i>Rph2</i>	59	62	67	51	0	87	76	49	44	76	76	68	53
3	Estate	<i>Rph3</i>	80	46	72	50	49	60	54	53	55	58	44	45	34
4	Gold	<i>Rph4</i>	57	22	21	20	20	52	45	38	38	59	45	39	32
5	Magnif 104	<i>Rph5</i>	35	27	13	10	10	72	43	45	41	63	43	43	23
6	Bolivia	<i>Rph6+2</i>	44	17	11	10	0	61	55	44	43	73	85	70	64
7	Cebada Capa	<i>Rph7</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Egypt 4	<i>Rph8</i>	66	16	15	10	40	42	50	98	93	21	59	67	57
9	Abyssinian	<i>Rph9</i>	59	36	34	27	0	28	25	22	20	10	0	10	9
10	Triumph	<i>Rph12</i>	42	25	13	10	8	92	24	17	14	30	34	22	10
11	PI 531849	<i>Rph13</i>	47	0	0	0	37	10	57	65	59	21	27	20	46
12	PI 584760	<i>Rph14</i>	0	27	29	28	0	9	10	4	2	4	40	20	0
13	Prior	<i>Rph19</i>	51	46	59	67	64	11	20	20	18	80	0	78	57
14	Ricardo	<i>Rph21+2</i>	86	99	79	89	99	44	41	33	34	49	78	63	57
15	Fong tein	<i>Rph25</i>	57	41	29	35	21	21	32	28	25	78	62	45	35
Индекс Нея (Nei distance), у. е.			–	0.11	0.10	0.13	0.22	0.28	0.10	0.14	0.14	0.24	0.10	0.14	0.10

КС с увеличением нормы применения до 150 % от рекомендуемой способствовала снижению вирулентности популяции к *Rph1* и увеличению встречаемости изолятов, вирулентных к *Rph8*.

Согласно индексу Нея, максимальные различия по частоте изолятов, вирулентных к линиям с генами *Rph*, получены между исходной популяцией (без обработки) и популяцией, обработанной препаратами Амистар Экстра, СК и Деларо, КС с нормой применения 50 % от рекомендуемой ($N = 0.28$; $N = 0.24$ соответственно). При этом в варианте с фунгицидом Амистар Голд, СК максимальные различия получены при использовании нормы применения 200 % от рекомендуемой ($N = 0.22$).

Средняя вирулентность исходной популяции *P. hordei* (без обработки) составила 48.4 % (рис. 1). Во всех вариантах с увеличением нормы применения фунгицидов отмечалось изменение средней вирулентности.

Обработка растений препаратом Деларо, КС способствовала снижению этого показателя от 45.9 (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 34.7 % (норма применения 200 %), Амистар Экстра, СК – от 44.3 (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 34.7 % (норма применения 200 %), Амистар Голд, СК – от 33.8 (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 28.5 % (норма применения 200 %).

Получены результаты влияния разных норм применения фунгицидов на показатели агрессивности карликовой ржавчины. Установлено увеличение длительности латентного периода болезни под действием высоких норм применения препаратов. Для исходной популяции (без обработки) этот показатель составил 168 ч, что соответствовало значениям, полученным при обработке растений ячменя изученными фунгицидами с пониженной нормой

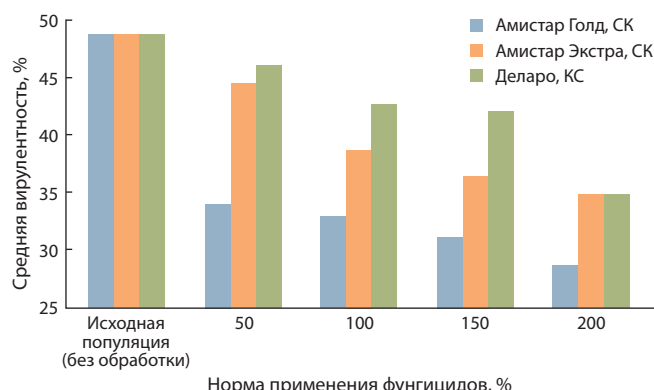


Рис. 1. Средняя вирулентность (%) популяции возбудителя карликовой ржавчины ячменя под воздействием разных норм применения фунгицидов. Лабораторно-тепличный комплекс ФНЦБЗР, 2024 г.

применения (50 % от рекомендуемой). В варианте с использованием фунгицидов Деларо, КС и Амистар Голд, СК в норме применения 200 % от рекомендуемой длительность латентного периода возрастала до 216 ч, Амистар Экстра, СК – до 192 ч.

Установлено снижение спорулирующей способности популяции гриба *P. hordei*, обработанной фунгицидами. В вариантах с использованием препаратов Деларо, КС и Амистар Голд, СК с увеличением нормы применения масса спор с одной пустулы снижалась от 0.007 мг (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 0.002 мг (норма применения 200 %). В варианте, обработанном фунгицидом Амистар Экстра, СК, этот показатель изменялся от 0.006 (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 0.005 мг (норма применения 200 %). Для исходной по-

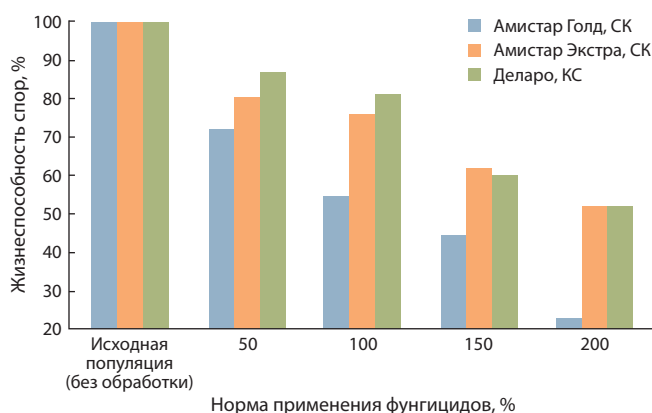


Рис. 2. Влияние разных норм применения фунгицидов на жизнеспособность спор карликовой ржавчины ячменя. Лабораторно-тепличный комплекс ФНЦБЗР, 2024 г.

пуляции (без обработки) спорулирующая способность составила 0.013 мг с одной пустулы.

Под влиянием изученных фунгицидов отмечалось изменение жизнеспособности спор *P. hordei*. Так, для исходной популяции (без обработки) значение этого показателя было принято за 100 % (рис. 2). В варианте, обработанном фунгицидом Деларо, КС, жизнеспособность спор снижалась от 86.7 (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 51.7 % (норма применения 200 %), в варианте с препаратом Амистар Экстра, СК – от 80.0 (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 51.7 % (норма применения 200 %), Амистар Голд, СК – от 71.7 (норма применения 50 % от рекомендуемой) до 22.5 % (норма применения 200 %).

Обсуждение

Полученные в ходе исследования результаты согласуются с работами других ученых. Так, С. Zhao с коллегами удалось получить два устойчивых к флутоланилу изолята *Rhizoctonia* spp., которые отличались более низкой скоростью роста мицелия и пониженной вирулентностью в отношении проростков сахарной свеклы в сравнении с исходным изолятом (Zhao et al., 2019).

Ингибирующее действие на спорулирующую способность гриба *Phytophthora infestans* отмечено при увеличении нормы применения фунгицидов с действующими веществами дифеноконазол и флудиоксонил (Мыца, 2015).

Под действием водного раствора бензимидазола (40 мг/л) установлено снижение спорулирующей способности и количества пустул возбудителя листовой ржавчины ржи *P. dispers* в сравнении с контролем; также отмечена авирулентность гриба (Тырышкин, 2017).

В работе Г.В. Волковой (2007) доказано, что приобретение резистентности к фунгициду из триазолового класса сопровождалось снижением спорулирующей способности в 4.8 раза, скорости диффузного распространения мицелия патогена в тканях растения-хозяина – в 4 раза. Инкубационный период удлинялся на 3-е суток, период пустолюбообразования – на 8–12 суток.

Ранее были получены данные по влиянию фунгицида на основе тебуконазола на показатели агрессивности по-

пуляции возбудителя бурой ржавчины пшеницы. С увеличением нормы применения препарата снижались: жизнеспособность спор – до 21.5 %, спорулирующая способность – до 0.02 мг спор и длительность споруляции – до 8 суток (норма применения 0.7 л/га). При этом длительность латентного периода увеличивалась до 233 ч (Гвоздева, Волкова, 2022).

Зафиксированы изменения структуры популяции под воздействием фунгицидов триазолового класса. Так, X. Wu с коллегами (2020) описали чувствительность 89 изолятов *P. graminis* к триадемифону, фунгициду из класса триазолов. Установлено, что изоляты, проявляющие устойчивость к триадемифону, могут обладать перекрестной устойчивостью к карбендазиму. Изоляты, устойчивые к фунгицидам азолового класса, зарегистрированы также у *P. striiformis* (Tian et al., 2019), *B. graminis* (Cao et al., 2008). Для популяции *P. trititina* из Бразилии отмечено уменьшение чувствительности к триаколам для пяти наиболее распространенных рас патогена (Ardium et al., 2012). Нами исследовано изменение структуры популяции *P. trititina* под влиянием фунгицида на основе тебуконазола (Гвоздева, Волкова, 2022). Согласно полученным данным, при пониженных нормах применения препарата установлены максимальные из изученных изменения в генетической структуре популяции (по Нею, N). Средняя вирулентность популяции патогена снижалась с увеличением нормы применения препаратов.

Установлено снижение вирулентности популяции гриба к *Rph4*, *Rph5*, *Rph6+2*, *Rph12* под влиянием изученных фунгицидов. Данные гены являются неэффективными для северокавказской популяции на протяжении более 10 лет (Volkova et al., 2019; Danilova, Volkova, 2023). При этом вирулентность к *Rph14* увеличилась по сравнению с исходной популяцией. В 2021 г. частота изолятов гриба к данной линии была низкой (Danilova, Volkova, 2023). Это может указывать на снижение эффективности гена *Rph14* под влиянием фунгицидов.

Развитие резистентности для возбудителей болезней часто напоминает эффект вертикальной устойчивости: в первые годы применения фунгицида наблюдается полное подавление инфекции; со временем отмечаются возникновение отдельных толерантных штаммов и их накопление в популяции; и, наконец, полная потеря эффективности фунгицида (Дьяков, 1998). Одним из факторов снижения чувствительности фитопатогенов к действующим веществам препаратов является изменение их внутривидовой структуры (Тютюрев, 2001). Мутации, вызывающие устойчивость изолятов фитопатогенов к фунгицидам, могут приводить к снижению их приспособленности и вирулентности (Hawkins, Fraaije, 2018), но в последующие годы может наблюдаться увеличение агрессивности возбудителя болезни (Дьяков, 1998). В проведенных нами исследованиях для северокавказской популяции возбудителя карликовой ржавчины ячменя под действием двухкомпонентных препаратов из класса триазолов и стробилуринов отмечены изменения внутривидовой структуры по показателям агрессивности и вирулентности, что является обоснованием необходимости перманентного изучения данного вопроса для контроля накопления резистентных форм *P. hordei* в популяции гриба.

Заключение

При сравнительной оценке показателей патогенности под действием фунгицидов из химических классов триазолов и стробилуринов установлено снижение агрессивности и вирулентности северокавказской популяции возбудителя карликовой ржавчины ячменя. Так, во всех вариантах с увеличением нормы применения фунгицидов наблюдалось изменение внутрипопуляционной структуры и средней вирулентности популяций. Во всех вариантах с увеличением нормы применения фунгицидов происходило снижение вирулентности популяции гриба к *Rph4*, *Rph5*, *Rph6+2*, *Rph12*, в варианте с применением препаратов Амистар Экстра, СК и Деларо, КС – *Rph2*, Амистар Голд, СК и Амистар Экстра, СК – *Rph9*.

Применение изученных фунгицидов с нормой 50–150 % от рекомендуемой способствовало увеличению вирулентности популяции к *Rph14*. Линия с геном *Rph7* была без признаков поражения болезнью как в исходной популяции, так и в вариантах опыта. Средняя вирулентность популяций гриба, обработанных фунгицидами, во всех вариантах опыта была ниже по сравнению с исходной популяцией (без обработки (48.5 %)). Существенные изменения по этому показателю установлены в результате действия препарата Амистар Голд, СК, средняя вирулентность снижалась от 33.8 до 28.5 %.

В сравнении с исходной (без обработки) популяцией отмечено увеличение длительности латентного периода болезни под действием высоких норм применения препаратов. В варианте с использованием фунгицидов Деларо, КС и Амистар Голд, СК в норме применения 200 % от рекомендуемой значение этого показателя варьировало от 168 до 216 ч, Амистар Экстра, СК – от 168 до 192 ч.

Установлено снижение спорулирующей способности популяции гриба *P. hordei*, обработанной фунгицидами. В вариантах с использованием препаратов Деларо, КС и Амистар Голд, СК с увеличением нормы применения масса спор с одной пустулы снижалась от 0.013 (исходная популяция (без обработки) до 0.002 мг (норма применения 200 %), в варианте, обработанном фунгицидом Амистар Экстра, СК, – до 0.005 мг (норма применения 200 %). Значительное снижение жизнеспособности спор *P. hordei* в сравнении с исходной популяцией (без обработки) отмечено в результате действия фунгицида Амистар Голд, СК. При норме применения препарата 200 % от рекомендуемой этот показатель снижался от 100 до 22.5 %.

Таким образом, проведенные нами исследования позволяют выявить изменения структуры популяции по вирулентности и агрессивности популяции *P. hordei* под влиянием изученных фунгицидов, что сделает возможным оперативно скорректировать систему защиты озимого ячменя и в дальнейшем может внести вклад в разработку антирезистентной стратегии борьбы с *P. hordei*.

Список литературы / References

Волкова Г.В. Антирезистентная стратегия применения фунгицидов на основе триадимефона против возбудителя желтой ржавчины пшеницы на Северном Кавказе. *Наука Кубани*. 2007;2:39-43 [Volkova G.V. An antiresistant strategy for the triadimefon-based fungicides application against the leaf-rust pathogen on wheat in North Caucasus. *Nauka Kubani = Science of Kuban*. 2007;2:39-43 (in Russian)]

- Волкова Г.В., Кудинова О.А., Гладкова Е.В., Ваганова О.Ф., Данилова А.В., Матвеева И.П. Вирулентность популяций возбудителей ржавчины зерновых колосовых культур. Краснодар, 2018 [Volkova G.V., Kudina O.A., Gladkova E.V., Vaganova O.F., Danilova A.V., Matveeva I.P. Virulence of Populations of Agents of Grain Ear Crop Rusts. Krasnodar, 2018 (in Russian)]
- Гвоздева М.С., Волкова Г.В. Влияние фунгицида Колосаль на структуру популяции возбудителя бурой ржавчины пшеницы по признакам патогенности и чувствительности. *Микология и фитопатология*. 2022;56(1):52-63. doi 10.31857/S0026364822010044 [Gvozdeva M.S., Volkova G.V. Influence of the Kolosal fungicide on the population structure of the wheat leaf rust pathogen by signs of pathogenicity and sensitivity. *Mikologiya i Fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*. 2022;56(1):52-63. doi 10.31857/S0026364822010044 (in Russian)]
- Грибные патогены зерновых колосовых культур: биология, распространение, вредоносность, методы учета, сбора и хранения биоматериала. Создание искусственных инфекционных фонов: Научно-практические рекомендации. Краснодар: ФГБНУ ФНЦБЗР; ООО «Просвещение-Юг», 2024 [Fungal Pathogens of Grain Ear Crops: Biology, Distribution, Harmfulness, Methods of Detection, Collection and Storage of Biomaterial. Creation of Artificial Infectious Backgrounds: Research and Practice Recommendations. Krasnodar, 2024 (in Russian)]
- Дьяков Ю.Т. Популяционная биология фитопатогенных грибов. М., 1998 [Dyakov Y.T. Population Biology of Phytopathogenic Fungi. Moscow, 1998 (in Russian)]
- Ерешко А.С., Хронюк В.Б., Репко Н.В. Состояние и перспективы производства ячменя в Российской Федерации. *Вестник аграрной науки Дона*. 2012;3(19):57 [Ereshko A.S., Hronyuk V.B., Repko N.V. State and prospects of barley production in the Russian Federation. *Vestnik Agrarnoy Nauki Dona = Don Agrarian Bulletin*. 2012;3(19):57 (in Russian)]
- Крупенько Н.А. Классификация и механизм действия химических фунгицидов, применяемых для защиты зерновых культур от болезней в Беларуси. *Вестник защиты растений*. 2023;106(2):84-92. doi 10.31993/2308-6459-2023-106-2-15690 [Krupen'ko N.A. Classification and mode of action of chemical fungicides applied for cereal crops protection in Belarus. *Vestnik Zashchity Rastenij = Plant Protection News*. 2023;106(2):84-92. doi 10.31993/2308-6459-2023-106-2-15690 (in Russian)]
- Михайлова Л.А., Гул'тяева Е.И., МIRONENKO Н.В. Методы исследования структуры популяций возбудителя бурой ржавчины пшеницы *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici*. Иммуногенетические методы создания устойчивых к вредным организмам сортов: Методические рекомендации. СПб.: ВИЗР, 2003 [Mihaylova L.A., Gul'tyaeva E.I., Mironenko N.V. Methods of Studying the Population Structure of the Wheat Leaf Rust Pathogen *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici*. Immunogenetic Methods for Breeding Varieties Resistant to Pests (Methodical Recommendations). St. Petersburg, 2003 (in Russian)]
- Мыца Е.Д. Влияние некоторых пестицидов на возбудителей грибных болезней картофеля (*Solanum tuberosum* L.) и томата (*Lycopersicon esculentum* Mill.): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2015 [Mytsa E.D. Effect of some pesticides on fungal pathogens of potato (*Solanum tuberosum* L.) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): Cand. Sci. Biol. Dissertation. Moscow, 2015 (in Russian)]
- Пыжикова Г.В. Влияние температуры на инфекцию и развитие желтой ржавчины пшеницы. *Микология и фитопатология*. 1972;6(3):51-53 [Pyzhikova G.V. Effect of temperature on infection and severity of leaf rust of wheat. *Mikologiya i Fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*. 1972;6(3):51-53 (in Russian)]
- Санин С.С., Шинкарев В.П., Кайдаш А.С. Методы определения количества спор, образуемых ржавчинными и другими фитопатогенными грибами. *Микология и фитопатология*. 1975;9(3):443-445

- [Sanin S.S., Shinkarev V.P., Kaydash A.S. Methods for determining the number of spores produced by rust and other phytopathogenic fungi. *Mikologiya i Fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*. 1975;9(3):443-445 (in Russian)]
- Тырышкин Л.Г., Сидоров А.В. Изменение вирулентности и агрессивности возбудителя листовой ржавчины ржи под действием абиотических факторов и возможность его практического применения. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2017;46:58-63
- [Tyryshkin L.G., Sidorov A.V. The Changing virulence and aggressiveness of the pathogen of leaf rust of rye under the influence of abiotic factors and the possibility of its practical application. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2017;46:58-63 (in Russian)]
- Тютюрев С.Л. Проблемы устойчивости фитопатогенов к новым фунгицидам. *Вестник защиты растений*. 2001;1:38-53
- [Tyuterev S.L. Problems of phytopathogen resistance to new fungicides. *Vestnik Zashchity Rastenij = Plant Protection News*. 2001;1:38-53 (in Russian)]
- Abbas H.S. Barley diseases: introduction, etiology, epidemiology, and their management. In: Abd-Elsalam K.A., Mohamed H.I. (Eds) *Cereal Diseases: Nanobiotechnological Approaches for Diagnosis and Management*. Singapore: Springer, 2022;97-117. doi 10.1007/978-981-19-3120-8_6
- Arduim G.D.S., Reis E.M., Barcellos A.L., Turra C. *In vivo* sensitivity reduction of *Puccinia triticina* races, causal agent of wheat leaf rust, to DMI and QoI fungicides. *Summa Phytopathol.* 2012;38(4):306-311. doi 10.1590/S0100-54052012000400006
- Bai Q., Liu T., Wan A., Wang M., See D.R., Chen X. Changes of barley stripe rust populations in the United States from 1993 to 2017. *Phytopathology*. 2022;112(11):2391-2402. doi 10.1094/PHYTO-04-22-0135-R
- Brent K.J., Hollomon D.W. Fungicide Resistance in Crop Pathogens: How Can it Be Managed? Bristol, UK: [Fungicide Resistance Action Committee](#), 2007
- Cao X.R., Zhao W.J., Zhou Y.L. Monitoring of resistance of *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* isolates to triadimefon in 2007. *Plant Protection*. 2008;34:74-77
- Corkley I., Fraaije B., Hawkins N. Fungicide resistance management: maximizing the effective life of plant protection products. *Plant Pathology*. 2021;71(1):150-169. doi 10.1111/ppa.13467
- Çelik Oğuz A., Karakaya A. Genetic diversity of barley foliar fungal pathogens. *Agronomy*. 2021;11(3):434. doi 10.3390/agronomy11030434
- Danilova A.V., Volkova G.V. Virulence of barley leaf rust in the South of Russia in 2017–2019. *Span J Agric Res*. 2022;20(1):e10SC01. doi 10.5424/sjar/202201-18337
- Danilova A., Volkova G. Efficiency of *Rph* genes against *Puccinia hordei* in Southern Russia in 2019–2021. *Agronomy*. 2023;13(4):1046. doi 10.3390/agronomy13041046
- Dodhia K.N., Cox B.A., Oliver R.P., Lopez-Ruiz F.J. Rapid in situ quantification of the strobilurin resistance mutation G143A in the wheat pathogen *Blumeria graminis* f. sp. *tritici*. *Sci Rep*. 2021;11(1):4526. doi 10.1038/s41598-021-83981-9
- FRAC. List of first confirmed cases of plant pathogenic organisms resistant to disease control agents. CropLife International. Brussels, 2020. Available at: https://www.frac.info/media/3oils1zl/list-of-first-confirmed-cases-of-plant-pathogenic-organisms-resistant-to-disease-control-agents_05_2020.pdf
- Hawkins N.J., Fraaije B.A. Fitness penalties in the evolution of fungicide resistance. *Annu Rev Phytopathol*. 2018;56:339-360. doi 10.1146/annurev-phyto-080417-050012
- Ji F., Zhou A., Liu B., Liu Y., Feng Y., Wang X., Huang L., Kang Z., Zhan G. Sensitivity of *Puccinia triticina* f. sp. *tritici* from China to triadimefon and resistance risk assessment. *Plant Dis*. 2023;107(12):3877-3885. doi 10.1094/PDIS-02-23-0277-RE
- Lass-Flörl C. Triazole antifungal agents in invasive fungal infections: a comparative review. *Drugs*. 2011;71(18):2405-2419. doi 10.2165/11596540-000000000-00000
- Leadbeater A. Resistance risk to QoI fungicides and anti-resistance strategies. In: Thind T.S. (Ed.) *Fungicide Resistance in Crop Protection: Risk and Management*. CABI, 2012;144-154. doi 10.1079/9781845939052.0141
- Nei M. Genetic distance between populations. *Am Nat*. 1972;106:283-292. doi 10.1086/282771
- Ölmez F., Turgay E.B., Mustafa Z., Büyük O., Kaymak S. Screening the *Zymoseptoria tritici* population in Turkey for resistance to azole and strobilurin fungicides. *J Plant Dis Prot*. 2023;130(5):991-998. doi 10.1007/s41348-023-00761-5
- Parlevliet J.E. Variation for latent period one of the component of partial resistance in barley to yellow rust by *Puccinia striiformis*. *Cereal Rust Bull*. 1980;8:2-17
- Russell P.E. Sensitivity baselines in fungicide resistance research and management. FRAC Monograph No. 3. CropLife International, 2003. Available at: <https://www.frac.info/media/cj3hvbenn/monograph-3.pdf>
- Sapkota R., Jørgensen L.N., Boeglin L., Nicolaisen M. Fungal communities of spring barley from seedling emergence to harvest during a severe *Puccinia hordei* epidemic. *Microb Ecol*. 2023;85(2):617-627. doi 10.1007/s00248-022-01985-y
- Shcherbakova L.A. Fungicide resistance of plant pathogenic fungi and their chemosensitization as a tool to increase anti-disease effects of triazoles and strobilurines. *Agric Biol*. 2019;54(5):875-891. doi 10.15389/agrobiology.2019.5.875eng
- Thind T.S. Changing trends in discovery of new fungicides: a perspective. *Indian Phytopathol*. 2021;74:875-883. doi 10.1007/s42360-021-00411-6
- Tian Y., Meng Y., Zhao X., Chen X., Ma H., Xu S., Zhan G. Trade-off between triadimefon sensitivity and pathogenicity in a selfed sexual population of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Front Microbiol*. 2019;10:2729. doi 10.3389/fmicb.2019.02729
- Volkova G.V., Danilova A.V., Kudinova O.A. The virulence of the barley leaf rust pathogen in the North Caucasus in 2014–2017. *Agric Biol*. 2019;54(3):589-596. doi 10.15389/agrobiology.2019.3.589eng
- Walters D.R., Avrova A., Bingham I.J., Burnett F.J., Fountaine J., Havis N.D., Hoard S.P., Hughes G., Looseley M., Oxley S.J.P., Renwick A., Topp C.F.E., Newton A.C. Control of foliar diseases in barley: towards an integrated approach. *Eur J Plant Pathol*. 2012;133:33-73. doi 10.1007/s10658-012-9948-x
- Wolfe M.S., Schwarzbach E. The use of virulence analysis in cereal mildews. *J Phytopathol*. 1975;82(4):297-307. doi 10.1111/j.1439-0434.1975.tb03495.x
- Wu X., Bian Q., Lin Q., Sun Q., Ni X., Xu X., Qiu Y., Xuan Y., Cao Y., Li T. Sensitivity of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* isolates from China to triadimefon and cross-resistance against diverse fungicides. *Plant Dis*. 2020;104(8):2082-2085. doi 10.1094/PDIS-01-20-0009-RE
- Zhan G., Ji F., Zhao J., Liu Y., Zhou A., Xia M., Zhang J., Huang L., Guo J., Kang Z. Sensitivity and resistance risk assessment of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* to triadimefon in China. *Plant Dis*. 2022;106(6):1690-1699. doi 10.1094/PDIS-10-21-2168-RE
- Zhao C., Zhang X., Hua H., Han C., Wu X. Sensitivity of *Rhizoctonia* spp. to flutolanil and characterization of the point mutation in succinate dehydrogenase conferring fungicide resistance. *Eur J Plant Pathol*. 2019;155:13-23. doi 10.1007/s10658-019-01739-6

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 31.03.2025. После доработки 14.05.2025. Принята к публикации 15.05.2025.