

Яхник Яна Викторовна

**ВЛИЯНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СОРТОВ И ФУНГИЦИДОВ НА
ПОПУЛЯЦИОННУЮ СТРУКТУРУ ВОЗБУДИТЕЛЯ СЕТЧАТОЙ
ПЯТНИСТОСТИ ЛИСТЬЕВ ЯЧМЕНЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ
АГРОКЛИМАТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ**

Специальность: 4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин
растений

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в лаборатории иммунитета растений к болезням Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР), г. Краснодар.

Научный
руководитель:

Волкова Галина Владимировна,
доктор биологических наук, член-корреспондент
РАН, главный научный сотрудник
лаборатории иммунитета
растений к болезням, заместитель директора по
развитию и координации научно-исследовательской
работы ФГБНУ ФНЦБЗР

Официальные
оппоненты:

Зеленева Юлия Витальевна,
доктор биологических наук, доцент, старший
научный сотрудник лаборатории микологии и
фитопатологии ФГБНУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт защиты растений»

Пахолкова Елена Васильевна,
кандидат биологических наук, старший научный
сотрудник отдела микологии и иммунитета ФГБНУ
«Всероссийский научно-исследовательский
институт фитопатологии»

Ведущая
организация:

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»

Защита диссертации состоится «10» сентября 2025 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 35.2.030.05 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел/факс: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета <http://www.timacad.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.05,
к.б.н., доцент



И. М. Митюшев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Увеличение аридности климата, нарушение севооборота, применение фунгицидов, изменение генетической устойчивости промышленных сортов и интродукция семенного материала провоцируют изменение видового состава возбудителей болезней сельскохозяйственных культур, что наиболее заметно в отношении пятнистостей листьев злаков ввиду повсеместного нарастания их вредоносности в последние десятилетия (Баранов, 2019). Ежегодно возрастают количество и объёмы обработок посевов фунгицидами, но в то же время увеличиваются и потери урожая от болезней, что приносит значительный экономический и экологический ущерб агропромышленному комплексу (Санин, 2016). Вследствие того, что ежегодные потери ячменя озимого от сетчатой пятнистости листьев на юге России составляют от 15 до 50 %, необходимо всестороннее изучение структуры и изменчивости популяции возбудителя по вирулентности, агрессивности и чувствительности к фунгицидам в комплексе с разработкой современных методов цифровых интеллектуальных технологий, что и стало предметом наших исследований.

Степень разработанности темы. Существует значительное число работ, посвященных задачам диагностики болезней сельскохозяйственных растений, и несколько публикаций, посвященных вопросам локализации пораженных болезнями участков растений (DeChant et al., 2017; Fuentes et al., 2018; Lin et al., 2019; Saleem et al., 2021). Работ, связанных с количественной оценкой степени развития болезни в рамках одного объекта на основе методов компьютерного зрения, не выявлено. Сетчатая пятнистость листьев является одним из наиболее распространенных и вредоносных заболеваний ячменя озимого во всем мире. Исследования, направленные на изучение генетики устойчивости растения-хозяина к патогену, проводятся российскими и иностранными учеными (Liu et al., 2012; Зубкович, Гриб, 2017; Wonneberger et al., 2017; Rozanova et al., 2019; Ellwood et al., 2019; Novakazi et al., 2020; Afanasenko et al., 2022). Резистентность возбудителя сетчатой пятнистости листьев к фунгицидам основных химических классов фиксируется повсеместно во всех регионах возделывания культуры, выявляя устойчивые к действию токсикантов штаммы: к фунгицидам триазолового класса и к группе ингибиторов сукцинатдегидрогеназы (Mair et al., 2023), к пидифлуметофену и флюксапироксаду (Sautua, Carmona, 2023), к фунгицидам стробилуринового класса (Matsuzaki et al., 2020).

Для разработки научно обоснованной стратегии защиты ячменя озимого от сетчатой пятнистости листьев необходимо получение фундаментальных знаний о внутрипопуляционных изменениях фитопатогенного гриба *Pyrenophora teres* под влиянием таких важных факторов, как устойчивость сорта и действие фунгицидов. Для южного региона России подобных исследований нет.

Цель исследований – определить влияние различных по устойчивости сортов ячменя озимого и фунгицидов из разных химических классов и микробиологических препаратов на изменчивость структуры популяции *Pyrenophora teres* центральной агроклиматической зоны Краснодарского края по

морфолого-культуральным признакам, вирулентности, агрессивности, чувствительности к препаратам.

Задачи исследований:

1. создать аннотированный набор данных, предназначенный для решения задачи автоматической семантической сегментации проявлений сетчатой пятнистости листьев ячменя;

2. провести иммунологическую оценку основных высеваемых на юге России сортов ячменя озимого относительно возбудителя сетчатой пятнистости листьев в ювенильную фазу и фазу взрослого растения; ранжировать их по степени устойчивости;

3. определить влияние генетически разнородных сортовых посевов ячменя озимого на развитие возбудителя сетчатой пятнистости листьев;

4. оценить морфолого-культуральные признаки, вирулентность и агрессивность моноконидиальных изолятов *P. teres*, отобранных с сортов ячменя озимого, различающихся по устойчивости к возбудителю сетчатой пятнистости листьев (умеренно устойчивых сортов (MR) Версаль, Виват и восприимчивых сортов (S) Романс, Рубеж);

5. охарактеризовать вирулентность моноконидиальных изолятов *P. teres*, выделенных с растений после обработки фунгицидами из разных химических классов и микробиологическими препаратами: триазолы (Магнелло, КЭ (дифеноконазол 100 г/л, тебуконазол 250 г/л)), Капелла, МЭ (дифеноконазол 30 г/л, пропиконазол 120 г/л, флутриафол 60 г/л)), Колосаль Про, КМЭ (пропиконазол 300 г/л, тебуконазол 200 г/л)), триазолы и стробилурины (Амистар Трио, КЭ (азоксистробин 100 г/л, пропиконазол 125 г/л, ципроконазол 30 г/л)), стробилурины (Квадрис, СК (азоксистробин 250 г/л)), *Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж), *Pseudomonas aureofaciens* (Псевдобактерин-2, Ж), *Trichoderma harzianum* (Трихоцин, СП);

6. определить чувствительность региональной популяции *P. teres* к фунгицидам на основе триазолов, стробилуринов, биопрепаратам на основе *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas aureofaciens*, *Trichoderma harzianum*.

Научная новизна. Впервые установлено, что на умеренно устойчивых сортах ячменя озимого (Версаль MR, Виват MR) накапливаются сложные расы *P. teres*, имеющие широкий спектр вирулентности и повышенную агрессивность. Обработка ячменя озимого биопрепаратами на основе *Pseudomonas aureofaciens* и *Trichoderma harzianum* не приводит к увеличению вирулентности популяции *P. teres*. Обработка ячменя озимого химическими фунгицидами на основе триазолов (дифеноконазол, тебуконазол, пропиконазол, флутриафол) способствует отбору рас гриба *P. teres* с более широким спектром вирулентности.

Теоретическая значимость. Получены новые фундаментальные знания о структуре и изменчивости популяции возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя под влиянием двух важных факторов – устойчивости сорта и действия фунгицидов для разработки стратегии интегрированной защиты ячменя озимого.

Подтверждена прямая пропорциональная зависимость между устойчивостью сорта ячменя озимого и патогенностью популяции возбудителя сетчатой

пятнистости листьев. Доказано, что на умеренно устойчивых сортах ячменя озимого накапливаются расы *P. teres*, имеющие высокую агрессивность и способные преодолевать гены устойчивости растения-хозяина.

Установлено, что применение биопрепаратов на основе *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas aureofaciens*, *Trichoderma harzianum* (Оргамика С, Ж, Псевдобактерин-2, Ж, Трихоцин, СП) при более низкой в сравнении с химическими препаратами биологической эффективности имеет положительный эффект в пролонгированной защите посевов ячменя озимого локального агроценоза, так как в популяции гриба *P. teres* не происходит отбор более вирулентных рас.

Практическая значимость. Выявлен устойчивый сорт ячменя озимого Тимофей, который рекомендован для использования в зонах сильного распространения сетчатой пятнистости листьев.

Для сдерживания сетчатой пятнистости листьев рекомендовано использование сортосмешанных посевов восприимчивого (Романс S) и умеренно устойчивого сортов (Иосиф MR) ячменя озимого в оптимальном сочетании – 1 S:4 MR.

Рекомендовано использование препаратов на основе триазолов (пропиконазол 300 г/л, тебуконазол 200 г/л (Колосаль Про, КМЭ), дифеноконазол 100 г/л, тебуконазол 250 г/л (Магнелло, КЭ), дифеноконазол 30 г/л, пропиконазол 120 г/л, флутриафол 60 г/л (Капелла, МЭ)) и *Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж) для оперативного сдерживания развития болезни.

Методология и методы исследований. Исследования выполнены по общепринятым методикам, которые подробно изложены в разделе «Материалы и методы исследований» во второй главе диссертации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Высокая степень обратной корреляции доли умеренно устойчивого сорта в сортовой смеси и развития сетчатой пятнистости листьев ячменя. На умеренно устойчивых сортах (Версаль, Виват) накапливаются сложные расы *P. teres*, имеющие широкий спектр вирулентности и повышенную агрессивность.

2. Под действием биопрепаратов на основе *Pseudomonas aureofaciens* (Псевдобактерин-2, Ж) и *Trichoderma harzianum* (Трихоцин, СП) не происходит увеличение вирулентности популяции *P. teres*. Под действием химических фунгицидов на основе триазолов (пропиконазол 300 г/л, тебуконазол 200 г/л (Колосаль Про, КМЭ), дифеноконазол 100 г/л, тебуконазол 250 г/л (Магнелло, КЭ), дифеноконазол 30 г/л, пропиконазол 120 г/л, флутриафол 60 г/л (Капелла, МЭ)) происходит отбор рас гриба *P. teres* с более широким спектром вирулентности.

3. Чувствительность популяции *P. teres* центральной агроклиматической зоны Краснодарского края к препаратам на основе триазолов (действующие вещества: флутриафол, дифеноконазол, тебуконазол, пропиконазол) и *Bacillus amyloliquefaciens* остается на высоком уровне для оперативного сдерживания болезни в регионе.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена трехлетними полевыми и лабораторными испытаниями, использованием современных методов статистической обработки.

Основные результаты диссертационной работы были доложены на 15 Международных научно-практических конференциях. Наиболее значимые из них: Международная научно-практическая конференция «Обеспечение технологического суверенитета АПК: подходы, проблемы, решения» (16-17 февраля 2023 г., г. Екатеринбург), Международная научно-практическая конференция «Фитосанитарная безопасность: угрозы и пути решения» (14-15 декабря, 2023 г., г. Алматы, Казахстан), IV Всероссийский Съезд по защите растений (16-19 апреля, 2024 г., г. Санкт-Петербург), XII Международная научно-практическая конференция «Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем» (17-19 сентября, 2024 г., г. Краснодар), Международная научно-практическая конференция «Агрономия-2024» (19-20 ноября, 2024 г., г. Москва).

Личный вклад соискателя. Автор принимала непосредственное участие в постановке и проведении опытов, обработке полученных данных, подготовке и написании публикаций и диссертационной работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 203 страницах компьютерного текста, состоит из введения, обзора литературы (глава 1), описания условий, объектов и методов исследования (глава 2), результатов исследования (глава 3), заключения, практических рекомендаций, приложений (6). Включает 12 таблиц и 23 рисунка. Библиографический список состоит из 265 наименований, в том числе 129 иностранных.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 19 работ, из которых 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 – в изданиях, индексируемых в базе данных WoS, 7 – в прочих изданиях, 1 – научно-практические рекомендации, 3 базы данных.

Автор выражает благодарность за помощь в проведении исследований и ценные советы научному руководителю доктору биологических наук, член-корреспонденту РАН Волковой Г. В., доктору биологических наук, профессору кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина» Ариничевой И. В., доценту кафедры теоретической экономики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» кандидату экономических наук Ариничеву И. В.

Глава I. РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ВРЕДНОСТЬ, БИОЛОГИЯ ГРИБА *RYRENOPHORA TERES* И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ЯЧМЕНЯ ОЗИМОГО ОТ СЕТЧАТОЙ ПЯТНИСТОСТИ ЛИСТЬЕВ (обзор литературы)

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по распространению, вредности, биологии и диагностике с помощью компьютерного зрения возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя в мире и на юге России. Описаны основные способы защиты ячменя озимого с помощью

посева устойчивых сортов, использования препаратов на основе наиболее распространенных биологических агентов и химических действующих веществ. Раскрыта проблема формирования резистентности возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя к фунгицидам.

Глава II. МЕСТО, УСЛОВИЯ, ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа выполнена на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР) в вегетационные сезоны 2019–2022 гг. и в лабораторных условиях в 2020–2023 гг. при использовании материальной и технической базы УНУ «Фитотрон для выделения, идентификации, изучения и поддержания рас, штаммов, фенотипов патогенов» (<https://fncbzh.ru/brk-i-unu/unique-installation-2/>) и объектов биоресурсной коллекции ФГБНУ ФНЦБЗР «Государственная коллекция энтомоакарифагов и микроорганизмов» (<https://fncbzh.ru/brk-i-unu/unique-installation-1/>). Исследования проводили в условиях лаборатории, тепличного комплекса и климатических камер (Binder KBWF 720) на искусственном инфекционном фоне возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя, а также в условиях полевого стационара на естественном инфекционном фоне *P. teres*.

Объект исследования – возбудитель сетчатой пятнистости листьев ячменя аскомицет *Pyrenophora teres* Drechsler.

Материалами исследования служили 19 сортов (Агродеум, Амиго, Версаль, Гордей, Иосиф, Каррера, Кондрат, Кубагро-1, Лазарь, Лайс, Мадар, Мастер, Паттерн, Рандеву, Романс, Рубеж, Сармат, Спринтер, Тимофей) и одна линия (АС-18) ячменя озимого различной селекции (ФГБНУ «НЦЗ им. П. П. Лукьяненко», ФГБНУ АНЦ «Донской», ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», ООО «Агростандарт», ФГБУН НИИСХ Крыма), а также восемь препаратов на основе триазолов (Магнелло, КЭ (дифеноконазол 100 г/л, тебуконазол 250 г/л)), Капелла, МЭ (дифеноконазол 30 г/л, пропиконазол 120 г/л, флутриафол 60 г/л)), Колосаль Про, КМЭ (пропиконазол 300 г/л, тебуконазол 200 г/л)), триазолов и стробилуринов (Амистар Трио, КЭ (азоксистробин 100 г/л, пропиконазол 125 г/л, ципроконазол 30 г/л)), стробилуринов (Квадрис, СК (азоксистробин 250 г/л)), *Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж), *Pseudomonas aureofaciens* (Псевдобактерин-2, Ж), *Trichoderma harzianum* (Трихоцин, СП)).

Исследования по диагностике степени развития сетчатой пятнистости листьев ячменя озимого на основе цифровых интеллектуальных технологий проводили на восприимчивом к патогену сорте Рубеж (оригинатор ФГБНУ «НЦЗ им. П.П. Лукьяненко») и умеренно устойчивом сорте Виват (оригинатор ФГБНУ АНЦ «Донской»). Отбор растений ячменя для определения развития болезни осуществляли в условиях поля в момент первичного проявления заболевания – фаза кущения (ВВСН 25), последующие отборы – фаза флаг-листа (ВВСН 39), фаза выхода в трубку (ВВСН 45) и фаза молочной спелости (ВВСН 70). Степень

пораженности листьев и других органов сетчатой пятнистостью определяли по шкале Э. Э. Гешеле (Койшыбаев, Муминджанов, 2016). Учет и фотофиксацию осуществляли с помощью выборки не менее 50 растений умеренно устойчивого и восприимчивого сортов в каждой фазе развития ячменя озимого. Фотоснимки пораженных сетчатой пятнистостью листьев получены при искусственном освещении, на белом фоне, под углом 90°, на расстоянии 30–50 см до объекта съемки. Разрешение каждого фотоснимка 1024 на 682 пикселей, формат хранения данных – растровый (png). Для обучения сверточной нейронной сети сегментированию пораженных областей на листьях исходные изображения были размечены вручную. После получения репрезентативной выборки для разработки модели оценки степени развития сетчатой пятнистости ячменя по шкале от 0 до 100 % полученные данные были переданы для математической обработки группе исследователей под руководством д.б.н., доцента кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» Ариничевой И.В. и к.э.н., доцента кафедры теоретической экономики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» Ариничева И.В.

Для изучения влияния сортосмешанных посевов на развитие сетчатой пятнистости листьев были отобраны коммерческие сорта ячменя озимого на основе фенотипической совместимости и направлению использования (фураж): умеренно устойчивый к сетчатой пятнистости листьев сорт Иосиф (далее – MR) и восприимчивый сорт Романс (далее S). Изучение влияния устойчивости сорта ячменя на популяцию *P. teres* было проведено в серии опытов в течение 2020–2021 гг. и 2022–2023 гг. Инфекционный материал отобран на естественном инфекционном фоне полевого стационара ФГБНУ ФНЦБЗР с сортов с различной устойчивостью – умеренно устойчивых сортов (далее MR) Версаль, Виват и восприимчивых сортов (далее S) Романс, Рубеж (Волкова и др., 2024).

Полевые испытания проводили согласно методике полевого опыта (Доспехов, 2014). Развитие болезни на листовой пластине определяли по шкале Э. Гешеле, ранжирование сортов по устойчивости к патогену осуществляли по шкале СИММУТ (Койшыбаев и др., 2014). В исследовании по влиянию генетически разнородных посевов на развитие сетчатой пятнистости листьев перед посевом семена умеренно устойчивого и восприимчивого сортов перемешивали в пропорции 1 S:1 MR, 1 S:2 MR, 1 S:3 MR, 1 S:4 MR, также были высеяны моносорта. Учёт осуществляли в период максимального развития болезни на растениях (Волкова и др., 2024).

Выделение чистой культуры патогена, наработка инокулюма гриба, инокуляция растений были проведены по стандартным методикам (Хасанов, 1992; Афанасенко, 1996; Волкова и др., 2024). Учет относительно возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя осуществляли по шкале Tekauz (Tekauz, 1985). Изучение морфолого-культуральных признаков, агрессивности и вирулентности моноконидиальных изолятов, отобранных с сортов, различающихся по устойчивости к патогену, и с растений после обработки фунгицидами, было проведено с использованием методов, описанных в работах

О. С. Афанасенко (2000), А. Batur-Ciesniewska и др. (2012). Исследование по определению расового состава популяции *P. teres* осуществлено с использованием международного набора дифференцирующих сортов (Afanasenko et al., 2009; Dinglasan et al., 2019). Изучение чувствительности сетчатой пятнистости к фунгицидам различных химических классов и микробиологических препаратов на интактных растениях ячменя озимого осуществляли на фоне искусственного заражения в фазу проростков. Для проведения исследования по изучению чувствительности к фунгицидам в лабораторных условиях с чистой культурой *P. teres* в чашки Петри вносили растворы с установленной для каждого препарата нормой применения согласно методике Чекмарева (Чекмарев и др., 2015).

Биологическую эффективность (далее – БЭ) рассчитывали по формуле Аббота (Методические указания..., 2009), полуэффективную концентрацию (далее – LD₅₀) определяли с помощью сервиса «Quest Graph™ EC50 Calculator». Статистическое различие выборок оценивали с помощью критерия Фишера (при уровне значимости $\alpha=0.05$), линейный коэффициент корреляции Пирсона (r) и связь между признаками – по шкале Чеддока. Различия между изолятами популяции по частоте аллелей вирулентности определяли по индексу Нея (Tamura et al., 2007). Уровень генетического разнообразия *P. teres* описывали с помощью индекса разнообразия Шеннона по формуле: $H_w = - \sum p_i \ln(p_i)$, где p_i – частота i -го фенотипа в данной популяции, n – общее число изолятов исследуемой популяции. Изоляты с идентичными фенотипами, образовавшиеся в результате клонального размножения одного изолята, составили клональную фракцию популяции (clonal fraction – CF) (Zhan et al., 2003), которую рассчитывали по формуле: $CF = 1 - (n_u/n)$, где n_u – число уникальных фенотипов, n – общее число изолятов. Расчеты полученных данных проводили с использованием программного обеспечения Statistica версии 13.3 (<http://statsoft.ru/products/trial/>).

Глава III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диагностика развития сетчатой пятнистости листьев ячменя с помощью компьютерного зрения

С отобранных в ходе фитосанитарных обследований в различных агроклиматических зонах (центральной, западной приазовской, южной предгорной) пораженных образцов ячменя озимого выделена чистая культура гриба *P. teres* и проведена наработка инокулюма для дальнейших исследований.

В полевых условиях проведен сбор репрезентативной выборки с различным процентом развития сетчатой пятнистости листьев. Отобраны пораженные листья с двух сортов – умеренно устойчивого сорта Виват и восприимчивого сорта Рубеж в четыре фазы развития (ВВСН 25, ВВСН 39, ВВСН 45, ВВСН 70). Произведена фотосъемка и осуществлена разметка данных. Данные предоставлены доктору биологических наук Ариничевой И. В. и кандидату экономических наук Ариничеву И. В. для обработки с помощью современных инновационных методов машинного обучения и искусственного интеллекта.

В результате проведенных исследований разработана модель сегментации сетчатой пятнистости ячменя озимого, базирующаяся на архитектуре U-net с кодерами ResNet. Представленные ИИ-решения являются ценным инструментом в части принятия управленческих решений для фермеров и агрономов при борьбе с сетчатой пятнистостью листьев ячменя озимого, предоставляя оперативную и объективную оценку степени развития болезни (рисунок 1). Рассмотрена и решена важная с прикладной точки зрения задача автоматизированной локализации сетчатой пятнистости листьев ячменя на основе полносверточных методов компьютерного зрения. Обученная модель позволяет без участия человека-эксперта диагностировать наличие на органах растений (листьях) ячменя озимого очагов поражений болезни для различных по устойчивости групп сортов.

Показано, что значимо лучших результатов можно достичь, ставя на первое место именно задачу сегментации и решая задачу классификации уже постфактум. Рассмотренный в исследовании инновационный метод может успешно интегрироваться в общую стратегию фитосанитарной диагностики зерновых культур при разработке программы для ЭВМ.



Рисунок 1 – Семантическая сегментация двух классов: а) фотоснимок пораженного листа ячменя озимого; б) соответствующая исходному изображению маска сетчатой пятнистости листьев, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2024 г.

Иммунологическая оценка высеваемых на юге России сортов ячменя озимого относительно возбудителя сетчатой пятнистости листьев

В вегетационный период 2019–2021 гг. в условиях полевого стационара ФГБНУ ФНЦБЗР в фазу взрослого растения (ВВСН 70) (естественный инфекционный фон) и в условиях тепличного комплекса в фазу проростков (ВВСН 12) (искусственный инфекционный фон) проведена иммунологическая оценка относительно возбудителя сетчатой пятнистости листьев 19 сортов и одной линии ячменя озимого.

В течение периода исследования в условиях теплицы в ювенильную фазу (ВВСН 12) устойчивость против возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя выявлена у четырех сортов (R (развитие 2–3 балла)): Гордей (3,1 балла), Паттерн (3,0 балла), Сармат (2,4 балла) и Тимофей (2,7 балла). Умеренную устойчивость (MR (развитие 4–6 баллов)) к болезни проявили семь сортов: Версаль (4,6 балла), Каррера (5,7 балла), Кондрат (5,7 балла), Лазарь (5,0 балла), Мадар (4,5 балла), Мастер (5,5 балла), Спринтер (5,3 балла). Умеренная восприимчивость (MS (развитие 7–8 баллов)) к патогену выявлена у семи сортов:

Агродеум (7,3 балла), Амиго (7,5 балла), Иосиф (7,7 балла), Кубагро-1 (7,9 балла), Лайс (7,5 балла), Рандеву (7,7 балла), Рубеж (7,3 балла). Восприимчивыми (S (развитие 9–10 баллов)) к патогену были линия АС-18 (9,3 балла) и сорт Романс (9,7 балла), который был отобран в качестве контроля по восприимчивости.

При проведении иммунологической оценки сортов и линии ячменя озимого в условиях полевого стационара выявлен сорт, обладающий устойчивостью к патогену в течение 3-х лет исследований, – Тимофей, развитие болезни на данном сорте в среднем составило 13,3 %. Умеренную устойчивость к патогену проявили шесть сортов и одна линия: Агродеум (23,3 %), АС-18 (23,3 %), Версаль (16,7 %), Иосиф (20,0 %), Мастер (20,0 %), Паттерн (21,7 %), Сармат (20,0 %). Умеренная восприимчивость выявлена у девяти сортов ячменя озимого: Амиго (43,3 %), Гордей (40,0 %), Каррера (38,3 %), Кондрат (38,3 %), Кубагро-1 (41,7 %), Лайс (36,7 %), Мадар (40,0 %), Рандеву (38,3 %), Спринтер (38,3 %).

Таким образом, иммунологическая оценка 19 сортов и одной линии ячменя озимого выявила устойчивость в онтогенезе сорта Тимофей и умеренную устойчивость сортов Версаль, Мастер, Паттерн, Сармат. Сорта рекомендованы для использования в зонах сильного распространения сетчатой пятнистости листьев. Использование устойчивых и умеренно устойчивых сортов в сельскохозяйственном производстве рекомендовано для оптимизации системы защиты культуры от *P. teres*, а в селекционных программах – в качестве источников устойчивости к патогену.

Влияние смеси разнородных сортовых посевов ячменя озимого на развитие сетчатой пятнистости листьев

Одним из способов снижения развития и распространенности сетчатой пятнистости листьев ячменя является высев генетически разнородных сортов, отличающихся по устойчивости к патогену (Волкова и др., 2018). В исследовании перед посевом семена умеренно устойчивого и восприимчивого сортов перемешивали в пропорциях 1 S:1 MR, 1 S:2 MR, 1 S:3 MR, 1 S:4 MR, также были высеяны моносорта (таблица 1).

Таблица 1 – Развитие сетчатой пятнистости листьев ячменя (%) в двухкомпонентной смеси в различных пропорциях, естественный инфекционный фон, полевой стационар ФГБНУ ФНЦБЗР, 2020–2022 гг.

Пропорция сортов в смеси	Развитие болезни, % (BVCH 70)		
	2020 год	2021 год	2022 год
S	72,6±8,8**	80,6±9,6	48,6±9,1
1 MR:1 S	44,0±11,8	47,3±12,2	17,6±8,6
2 MR:1 S	36,6±14,9	44,6±14,5	11,0±3,6
3 MR:1 S	33,3±11,7	40,0±10,6	9,2±3,0
4 MR:1 S	22,6±9,6	34,6±6,4	7,4±1,8
MR	16,0±5,0	29,3±8,8	8,5±3,3

* стандартное отклонение (далее по тексту); ** однофакторный дисперсионный анализ выявил достоверные различия между вариантами (S – контроль) в 2020 году (Ft 4,2 < Ff 56,5 для 1S:1MR; Ft 4,2 < Ff 64,3 для 1S:2MR; Ft 4,2 < Ff 107,3 для 1S:3MR; Ft 4,2 < Ff 219,9 для 1S:4MR; Ft 4,2 < Ff 463,9 для MR), в 2021 году (Ft 4,2 < Ff 68,8 для 1S:1MR; Ft 4,2 < Ff 63,7 для 1S:2MR; Ft 4,2 < Ff 120,0 для 1S:3MR; Ft 4,2 < Ff 238,0 для 1S:4MR; Ft 4,2 < Ff 231,0 для MR), в 2022 году (Ft 4,2 < Ff 90,0 для 1S:1MR; Ft 4,2 < Ff 218,5 для 1S:2MR; Ft 4,2 < Ff 251,6 для 1S:3MR; Ft 4,2 < Ff 293,3 для 1S:4MR; Ft 4,2 < Ff 254,8 для MR)

Выявлено, что в течение 2020–2022 гг. развитие болезни снижалось при увеличении в смеси доли умеренно устойчивого сорта, разница показателей составила от 28,6 % до 56,6 % (2020 год), от 33,3 % до 51,3 % (2021 год), от 31,0 % до 40,1 % (2022 год). Установлена высокая степень обратной корреляции доли умеренно устойчивого сорта и развития заболевания ($r = -0,93$).

Масса 1000 семян во всех опытных вариантах в среднем была выявлена максимальной в 2021 году – 45,8 г, в 2022 году масса составила 40,4 г, в 2020 году выявлена минимальная масса семян – 31,6 г (таблица 2).

Таблица 2 – Масса 1000 семян (г) в смесях умеренно устойчивого и восприимчивого к сетчатой пятнистости листьев ячменя сортов, полевой стационар ФГБНУ ФНЦБЗР, 2020–2022 гг.

Пропорция сортов в смеси	Масса 1000 семян, г		
	2020 год	2021 год	2022 год
S	32,0±0,5*	48,8±1,0	35,7±1,0
1 MR:1 S	30,1±0,5	44,1±1,0	40,0±0,5
2 MR:1 S	31,2±0,5	44,9±1,0	39,8±1,0
3 MR:1 S	32,5±0,5	46,3±0,5	40,7±0,5
4 MR:1 S	34,5±1,0	46,9±1,0	43,7±1,0
MR	29,2±1,0	43,9±0,5	42,7±0,5

* однофакторный дисперсионный анализ не выявил достоверные различия между вариантами (S – контроль) в 2020–2022 гг.: для 1S:1MR ($F_{t 9,1} < F_{f 0,2}$); для 1S:2MR ($F_{t 9,1} < F_{f 0}$); для 1S:3MR ($F_{t 9,1} < F_{f 0,02}$); для 1S:4MR ($F_{t 9,1} < F_{f 0,2}$); для MR ($F_{t 9,1} < F_{f 0}$). Между долями устойчивого сорта и массой 1000 семян одинаковой по годам корреляции выявлено не было ($r = -0,12$ (2020); $r = -0,67$ (2021); $r = 0,93$ (2022))

Показатели массы 1000 семян в исследовании зависели от погодных условий вегетационного сезона, поэтому использование смеси сортов позволило стабилизировать данный параметр в 2020 году (в пропорции 1 S:4 MR масса 1000 семян превышала показатели восприимчивого сорта на 2,5 г) и в 2022 году (в пропорции 1 S:4 MR масса 1000 семян превышала показатели восприимчивого сорта на 8,0 г), в 2021 году масса 1000 семян на восприимчивом сорте превысила показатели пропорции 1 S:4 MR на 1,9 г.

Адаптивные механизмы различных сортов ячменя позволяют сохранять относительную толерантность к возбудителю сетчатой пятнистости, что согласуется с приведенными результатами исследования, так как показатели урожайности варьировали по годам исследования в зависимости от погодных условий вегетационного сезона и сортовых особенностей (рисунок 2). В среднем за три года исследования урожайность выявлена минимальной в опытном варианте на умеренно устойчивом сорте (6,3 т/га). В пропорции сортосмеси при увеличении доли устойчивого сорта урожайность увеличивалась (1 MR:1 S – 6,4 т/га; 2 MR:1 S – 6,5 т/га; 3 MR:1 S – 6,6 т/га; 4 MR:1 S – 6,9 т/га). Урожайность ячменя озимого на опытном участке с восприимчивым сортом составила 6,5 т/га.

По результатам трехлетних испытаний определена высокая степень обратной корреляции доли устойчивого сорта и развития болезни растений ($r = -0,93$). Установлено оптимальное для сохранения урожая зерна и снижения развития

сетчатой пятнистости листьев ячменя сочетание смеси сортов (1 S:4 MR). Смесь сортов, одна доля восприимчивого Романс (S) и четыре доли умеренно устойчивого сорта Иосиф (MR), рекомендована для использования в сельскохозяйственном производстве.

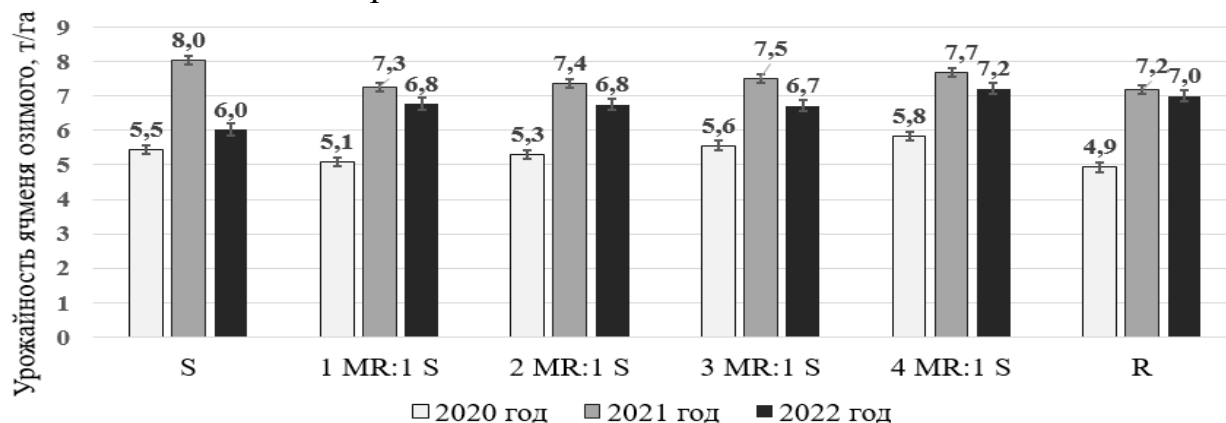


Рисунок 2 – Урожайность ячменя озимого (т/га) при применении смеси сортов* (сорта Романс S, Иосиф MR), полевой стационар ФГБНУ ФНЦБЗР, 2020–2022 гг.

* однофакторный дисперсионный анализ выявил различия между вариантами по годам исследования: $F_t 3,0 < F_f 10,0$ (2020 г.); $F_t 3,1 < F_f 10,3$ (2021 г.); $F_t 3,1 < F_f 13,7$ (2022 г.).

Морфолого-культуральные признаки популяции *Pyrenophora teres* центральной агроклиматической зоны Краснодарского края

Селекция сортов на устойчивость к сетчатой пятнистости листьев предполагает создание искусственного инфекционного фона. Для наработки инокулюма в лабораторных условиях необходимо знание морфолого-культуральных особенностей возбудителя болезни (Пахратдинова и др., 2017). По общепринятой в мире методике Baturо-Ciesniewska (2012) были изучены морфотипы колоний 10 изолятов *P. teres*, выделенных с различных по устойчивости к патогену сортов ячменя озимого (таблица 3, рисунок 3).

Таблица 3 – Встречаемость (%) морфотипов колоний изолятов *Pyrenophora teres*, отобранных с различных по устойчивости сортов ячменя озимого, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2021 г., 2023 г.

Сорт, устойчивость	Встречаемость морфотипов колоний изолятов <i>Pyrenophora teres</i> , %						
	BT	B	BG	DgBT	DgT	WgT	BgT
Версаль, MR	0	10,0	20,0	30,0	10,0	20,0	10,0
Романс, S	10,0	20,0	10,0	20,0	10,0	10,0	20,0
Виват, MR	20,0	10,0	20,0	40,0	0	0	10,0
Рубеж, S	20,0	20,0	0,0	40,0	0	10,0	10,0

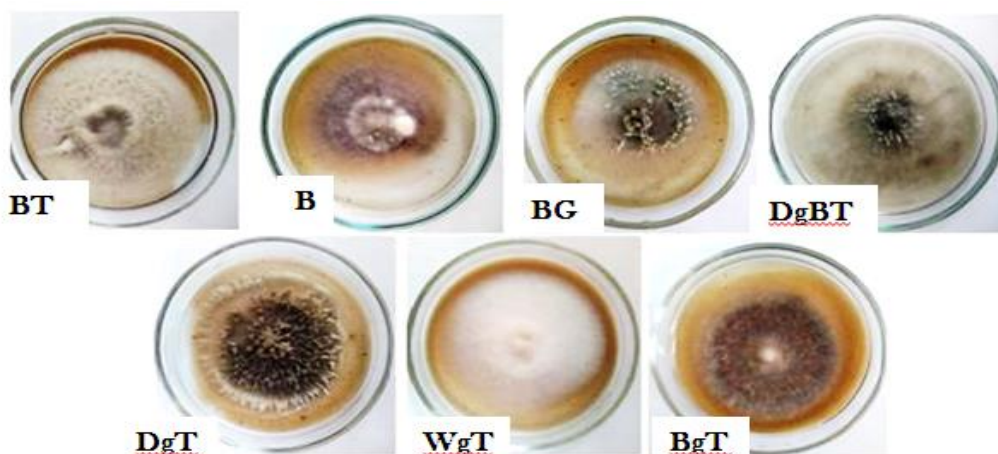


Рисунок 3 – Колонии изолятов *Pyrenophora teres* с различными морфологическими типами (фото Яхник Я.В.), ФГБНУ ФНЦБЗР, 2021 г., 2023 г.

Среди колоний изолятов *P. teres*, выделенных с сортов Версаль (MR) и Романс (S) преобладал тип колонии DgBT, имеющий темно-серый мицелий со снопообразными выростами (20,0 % – Романс (S), 30,0 % – Версаль (MR)). В исследовании морфотипов колоний, выделенных с сортов Виват (MR) и Рубеж (S), также наиболее часто встречался морфотип DgBT (40,0 %).

Выявлена незначительная корреляция между морфотипами колоний и развитием болезни после инокуляции восприимчивого сорта колониями ($r=0,30$).

При изучении морфотипов колоний гриба *P. teres* в чистой культуре на питательной среде с фунгицидами выявлено, что даже в чашках с 25–50 % от разрешенной для применения нормы препаратов колонии росли в основном на внесенном мицелиальном диске. Гриб разрастался на незначительное пространство на среде с фунгицидом, образуя стерильный белый мицелий, характерный при выращивании на обедненной питательными веществами среде.

Таким образом, характеристика популяции *P. teres* центральной агроклиматической зоны Краснодарского края по морфолого-культуральным признакам показала, что преобладающим типом колонии является морфотип DgBT (32,5 %), имеющий темно-серый мицелий со светлыми пучками. Анализ показал незначительную корреляцию между сортовой устойчивостью и морфотипами ($r=0,30$). При внесении изученных фунгицидов на питательную среду гриб *P. teres* разрастался минимально вокруг мицелиального диска, образуя белый пушистый мицелий со стерильными пучками.

Вирулентность популяции *Pyrenophora teres*, отобранной из центральной агроклиматической зоны Краснодарского края

Изучение структуры популяции *P. teres* по вирулентности было проведено в течение 2020–2023 гг. Всего изучено с использованием международного набора дифференцирующих сортов 100 моноконидиальных изолятов. Средняя вирулентность выделенных из популяции *P. teres* центральной агроклиматической зоны Краснодарского края изолятов составила 3,6 балла. Определено увеличение дистанции в частоте генов вирулентности популяции

патогена за четыре года исследования – $N=0,18$ у.е., что на 50 % выше среднего ежегодного увеличения данного показателя. Генетическое разнообразие (согласно информационному индексу Шеннона) повысилось с 2020 года по 2023 год на 0,14 у.е. Выявлено высокое разнообразие популяции гриба *P. teres* по генам вирулентности, анализ клональной фракции за 2020–2023 гг. определен на уровне $CF=0,13$. Количество вирулентных изолятов в период исследования оставалось стабильно высоким. Среднее ежегодное количество вирулентных изолятов определено на уровне 46,7 %. Изучение структуры популяции по вирулентности является необходимым элементом в селекционной работе по изучению эффективности генов устойчивости против сетчатой пятнистости листьев ячменя.

Вирулентность образцов популяции *Pyrenophora teres*, отобранных с различных по устойчивости сортов ячменя

Устойчивость сорта к болезни является одним из основных факторов, влияющих на процессы микроэволюции патогена. Сравнительный анализ по признаку вирулентности изолятов *P. teres*, выделенных с различающихся по устойчивости к патогену сортов ячменя, проведен на сортах Версаль MR, Романс S (2020–2021 гг.) и Виват MR, Рубеж S (2022–2023 гг.) в фазу конец выхода в трубку (ВВСН 45) с использованием международного набора дифференцирующих сортов.

Выявлено, что на умеренно устойчивых сортах накапливаются расы *P. teres*, имеющие высокую агрессивность и способные преодолевать гены устойчивости других сортов. После инокуляции восприимчивого сорта образцами популяции *P. teres*, выделенными с сортов с различной устойчивостью, наибольшее поражение растений вызывали образцы, выделенные с умеренно устойчивых сортов (Версаль MR 2,5 балла, Романс S 0,7 балла; Виват MR 6,0 баллов, Рубеж S 3,4 балла) (рисунок 4). Также с умеренно устойчивых сортов было выделено большее количество рас (Виват MR, Версаль MR – по 17 рас; Романс S, Рубеж S – по 16 рас) и определена более высокая клональная фракция (Виват MR, Версаль MR $CF=0,15$; Романс S, Рубеж S $CF=0,20$).

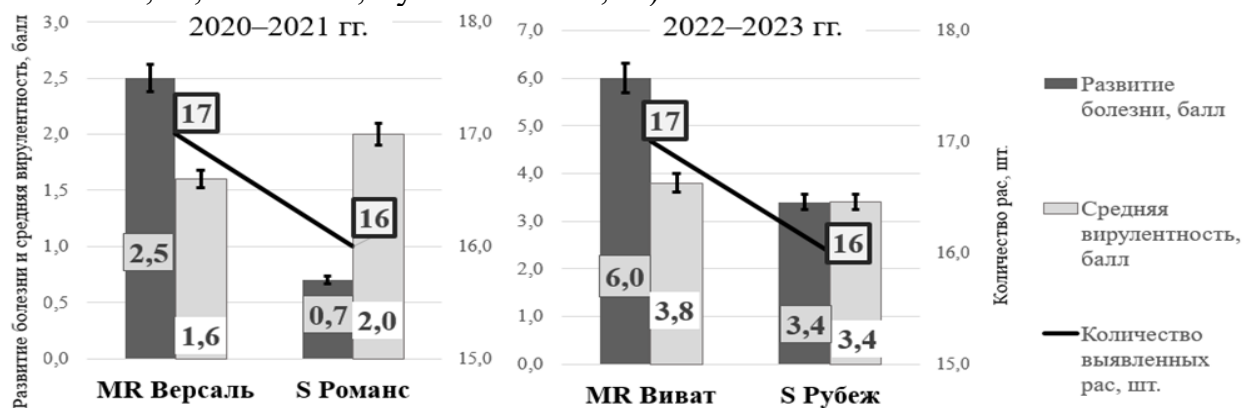


Рисунок 4 – Развитие болезни на восприимчивом сорте Романс, средняя вирулентность и количество выявленных рас в образцах популяции *Pyrenophora teres*, отобранных с различных по устойчивости сортов, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2020–2023 гг.

Можно заключить, что при несоблюдении принципа ротации генов устойчивости высеваемых сортов ячменя озимого ухудшение фитосанитарной обстановки и потери урожая зерна могут достичь значительных размеров, что повлечёт за собой необходимость введения новых сортов с набором эффективных генов расонеспецифической устойчивости.

Вирулентность образцов популяции *Pyrenophora teres*, отобранных после обработки фунгицидами различных химических классов и микробиологическими препаратами

Обработка сельскохозяйственных посевов ячменя фунгицидами является одним из ведущих факторов, влияющих на структуру популяции по вирулентности гриба *P. teres*. Изучение изменения данного показателя под влиянием препаратов проведено после выделения изолятов *P. teres* с каждого из растений, обработанных препаратами на химической основе (триазолы, триазолы и стробилурины, стробилурины) и биологической основе (*Pseudomonas aureofaciens*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Trichoderma harzianum*).

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении генетического разнообразия популяции гриба *P. teres* после обработки растений химическими и биологическими препаратами (рисунок 5). Средняя вирулентность выделенных образцов популяции *P. teres* после обработки ячменя озимого средствами защиты на химической основе наблюдалась выше на 14,6 % в сравнении с образцами, выделенными после обработки растений препаратами на биологической основе. Клональная фракция выявлена с наибольшим значением разнообразия расового состава в опытных вариантах образцов, отобранных с растений после обработки фунгицидами на основе дифеноконазола и тебуконазола (Магнелло, КЭ) и азоксистробина (Квадрис, СК), – CF=0,10. Клональная фракция образцов, которые были отобраны после обработки растений ячменя фунгицидами на основе *Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж) и *Trichoderma harzianum* (Трихоцин, СП), выявлена выше контрольного варианта (CF=0,20) и составила CF=0,25.

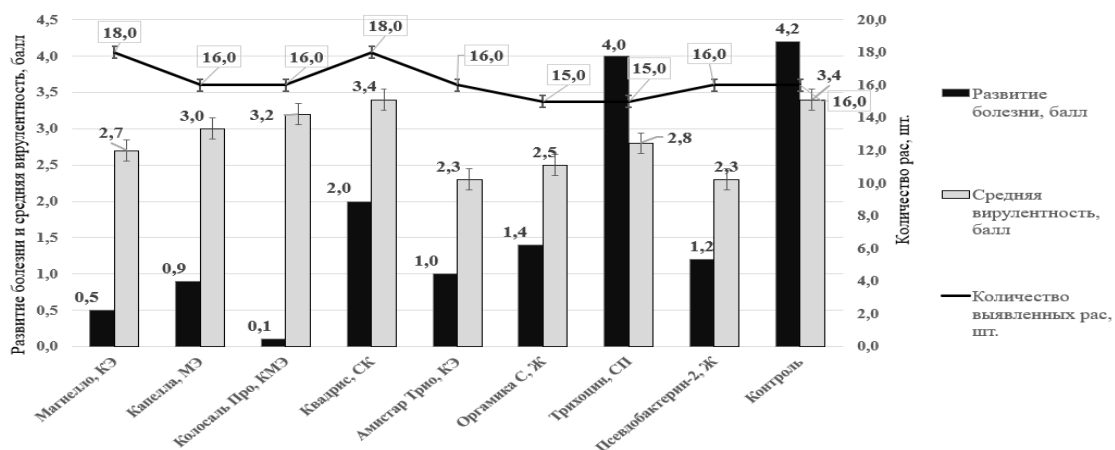


Рисунок 5 – Развитие болезни на восприимчивом сорте Романс, средняя вирулентность и количество выявленных рас в образцах популяции *Pyrenophora teres*, отобранных после обработки растений рекомендуемой нормой применения фунгицида, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2022–2023 гг.

Наибольшие показатели гетерогенности определены в образцах популяции, отобранных с растений после обработки фунгицидами на основе триазолов и *Bacillus amyloliquefaciens*: Колосаль Про, КМЭ (Sh=2,16), Капелла, МЭ, (Sh=2,14), Оргамика С, Ж (Sh=2,12), Магнелло, КЭ (Sh=2,10). Минимальные показатели генетического разнообразия выявлены после обработки препаратом Псевдобактерин-2, Ж (на основе *Pseudomonas aureofaciens*) (Sh=1,96) при значении индекса Шеннона в контрольном варианте Sh=2,0.

Таким образом, под действием биопрепаратов на основе *Pseudomonas aureofaciens* и *Trichoderma harzianum* в популяции *P. teres* не происходит отбор более вирулентных рас патогена. Под действием фунгицидов на основе триазолов (дифеноконазол, тебуконазол, пропиконазол, флутриафол) и *Bacillus amyloliquefaciens* происходит увеличение разнообразия популяции *P. teres* по вирулентности, что следует учитывать при планировании защитных мероприятий сельскохозяйственных посевов ячменя озимого.

Агрессивность образцов популяции *Pyrenophora teres* центральной агроклиматической зоны Краснодарского края, отобранных с различных по устойчивости сортов ячменя озимого

Изучено влияние устойчивости сорта на критерии агрессивности (развитие болезни после инокуляции восприимчивого сорта, инкубационный период, скорость роста колоний, интенсивность споруляции) изолятов *P. teres*, выделенных с различных по устойчивости к патогену сортов ячменя озимого.

Корреляционный анализ образцов популяции *P. teres* выявил прямую пропорциональную зависимость между устойчивостью сорта и агрессивностью образцов популяции патогена, так как такие параметры, как развитие болезни (Версаль MR/Романс $S F_{5,12} < F_{31,5}$ и Виват MR/Рубеж $S F_{5,12} < F_{25,7}$) (таблица 4), скорость роста колоний (Версаль MR/Романс $S F_{5,2} < F_{28,3}$ и Виват MR/Рубеж $S F_{5,2} < F_{49,2}$) (таблица 5), интенсивность споруляции колоний (Версаль MR/Романс $S F_{5,3} < F_{9,3}$ и Виват MR/Рубеж $S F_{5,3} < F_{10,5}$) (таблица 6) были статистически достоверно выше при инокуляции образцами популяции, отобранными с более устойчивых сортов. Образцы популяции *P. teres*, отобранные с более устойчивых сортов, имели меньший инкубационный период (на сортах Версаль MR, Виват MR проявления болезни на растении выявлены на третьи сутки, на сортах Рубеж S и Романс S – на четвертые и пятые сутки).

Таблица 4 – Развитие болезни (балл) на проростках восприимчивого сорта Романс после инокуляции изолятами, отобранными с различных по устойчивости к возбудителю сетчатой пятнистости листьев сортов ячменя озимого, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2021, 2023 гг.

Сорт, устойчивость	Развитие болезни после инокуляции изолятами, балл									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Версаль, MR	5,0±0,3	6,0±0,4	6,0±0,4	6,0±0,4	5,8±0,4	7,0±0,5	7,0±0,4	7,0±0,2	8,0±0,3	8,0±0,4
Виват, MR	3,0±0,2	4,0±0,2	4,0±0,2	4,0±0,2	5,0±0,4	5,0±0,3	5,0±0,5	5,0±0,4	6,0±0,1	6,0±0,2
Романс, S	2,0±0,2	2,0±0,1	3,0±0,2	3,0±0,1	3,0±0,2	3,0±0,1	3,0±0,2	2,0±0,3	4,0±0,5	4,0±0,4
Рубеж, S	2,0±0,1	2,0±0,1	3,0±0,1	3,0±0,2	3,0±0,2	3,0±0,1	3,0±0,1	4,0±0,2	4,0±0,3	5,0±0,2

Таблица 5 – Скорость роста (мм/сутки) колоний изолятов *Pyrenophora teres*, отобранных с различных по устойчивости сортов ячменя озимого, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2021, 2023 гг.

Сорт, устойчивость	Скорость роста колоний изолятов, мм/сутки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Версаль, MR	8,1±0,4	8,0±0,3	8,5±0,2	8,1±0,6	9,1±0,4	8,1±0,2	8,8±0,3	8,3±0,4	9,1±0,3	8,7±0,3
Виват, MR	9,7±0,4	10,6±0,5	8,3±0,4	10,3±0,5	10,0±0,3	9,8±0,4	9,4±0,2	10,9±0,3	8,9±0,2	10,0±0,2
Романс, S	7,9±0,2	7,6±0,5	7,7±0,3	7,9±0,3	8,1±0,2	7,9±0,3	8,0±0,2	8,1±0,2	7,8±0,2	7,4±0,4
Рубеж, S	5,4±0,3	5,7±0,5	6,9±0,7	6,6±0,4	7,1±0,5	5,4±0,3	6,3±0,2	6,6±0,7	6,9±0,4	6,9±0,4

Таблица 6 – Интенсивность споруляции ($\times 10^3$ конидий/мл) колоний изолятов *Pyrenophora teres*, отобранных с различных по устойчивости сортов ячменя озимого, ФГБНУ ФНЦБЗР, 2021 г., 2023 г.

Сорт, устойчивость	Интенсивность споруляции, $\times 10^3$ конидий/мл									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Версаль, MR	25±2,9	20±0,9	29±4,0	23±2,9	25±2,6	30±3,7	20±2,0	28±1,6	32±2,4	18±1,2
Виват, MR	17±3,3	15±2,0	10±2,2	8±2,5	14±3,2	10±1,6	12±1,6	8±0,8	17±2,8	12±1,4
Романс, S	5±1,2	8±2,2	4±0,8	7±0,4	7±0,6	6±0,4	3±0,3	9±1,4	6±0,8	7±0,4
Рубеж, S	10±2,4	12±3,0	14±2,5	5±0,4	7±0,8	12±2,0	8±1,2	6±0,4	7±0,6	10±2,2

Таким образом, корреляционный анализ образцов популяции *P. teres*, отобранных с сортов ячменя озимого с различной степенью устойчивости, выявил прямую пропорциональную зависимость между устойчивостью сорта и агрессивностью патогена.

Полученные данные необходимы для разработки стратегии защиты ячменя озимого при составлении сортовой мозаики для снижения накопления резистентных к сортам агрессивных клонов возбудителя сетчатой пятнистостей листьев.

Чувствительность к фунгицидам различных химических классов и микробиологическим препаратам образцов популяции *Pyrenophora teres* центральной агроклиматической зоны Краснодарского края

В работе изучена чувствительность образцов региональной популяции *P. teres* к фунгицидам наиболее распространённых и широко применяемых на юге России химических классов и микробиологическим препаратам. Эффективность обработок фунгицидами пораженных сетчатой пятнистостью листьев ячменя озимого (таблица 7) в разрешенной для применения в сельском хозяйстве норме и при внесении препаратов в чистую культуру патогена значительно варьировала в зависимости от действующего вещества. Минимальное значение эффективности после обработки растений разрешенной для применения в сельском хозяйстве нормой выявлено у биологического препарата на основе грибов *Trichoderma harzianum* Трихоцин, СП (29,5 %) и у химического препарата на основе стробилурина Квадрис, СК (52,3 %). Максимальная биологическая эффективность выявлена при использовании препаратов на нехимической основе *Bacillus amyloliquefaciens* Оргاميда С, Ж

(66,8 %) и препаратов химического класса триазолы (Колосаль Про, КМЭ – 97,0 %; Магнелло, КЭ – 88,2 %; Капелла, МЭ – 78,9 %).

Таблица 7 – Развитие сетчатой пятнистости листьев ячменя (балл) после обработки препаратами, сорт Романс, тепличный комплекс ФГБНУ ФНЦБЗР, 2022–2023 гг.

Фунгицид	EC ₅₀ , мг/л	Развитие болезни, балл								
		0 %*	25 %	50 %	75 %	100 %	125 %	150 %	175 %	200 %
Магнелло, КЭ	4,7	4,2±0,2	2,7±0,8	2,7±0,5	2,3±0,4	0,5±0,4	0,6±0,1	0,3±0,1	0,3±0,1	0
Биологическая эффективность, %		-	36,8	36,8	44,7	88,2	86,8	92,1	94,1	100
Капелла, МЭ	3,4	4,2±0,2	3,8±0,4	2,8±0,4	3±0,2	0,9±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,3±0,1	0,1±0,1
Биологическая эффективность, %		-	11,2	34,9	28,9	78,9	82,2	86,8	94,1	97,4
Колосаль Про, КМЭ	1,4	4,2±0,2	3,3±0,4	0,9±0,1	0,3±0,1	0,1±0,1	0,4±0,1	0,4±0,1	0,3±0,1	0
Биологическая эффективность, %		-	21,1	78,9	92,1	97,0	89,5	97,6	97,6	100
Квадрис, СК	21,2	4,2±0,2	3,0±0,4	2,4±0,2	2,2±0,2	2,0±0,4	1,2±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,2±0,1
Биологическая эффективность, %		-	28,9	43,2	47,9	52,3	71,6	81,1	85,8	95,3
Амистар Трио, КЭ	13,0	4,2±0,2	2,0±0,1	1,6±0,1	1,6±0,1	1,0±0,1	1,2±0,1	0,6±0,1	0,6±0,1	0,4±0,1
Биологическая эффективность, %		-	52,6	62,1	62,1	76,3	71,6	85,8	85,8	90,5
Органика С, Ж	3,6	4,2±0,2	3,2±0,2	3,0±0,1	2,2±0,1	1,4±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	0,6±0,1	0,4±0,1
Биологическая эффективность, %		-	24,2	28,9	47,9	66,8	81,1	85,8	85,8	90,5
Псевдобактерин-2, Ж	3,2	4,4±0,2	3,8±0,3	4,1±0,2	2,2±0,1	1,8±0,1	1,1±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,5±0,1
Биологическая эффективность, %		-	13,6	6,8	50,0	59,1	75,0	81,8	81,8	88,6
Трихоцин, СП	4,2	4,4±0,2	3,8±0,2	3,8±0,1	3,4±0,2	3,1±0,1	2,3±0,3	1,7±0,1	2,1±0,2	1,8±0,1
Биологическая эффективность, %		-	13,6	13,6	22,7	29,5	47,7	61,4	52,3	59,1

* – норма применения от разрешенной в сельском хозяйстве, %

В среднем во всех вариантах при внесении разрешенной для применения в сельском хозяйстве нормы рост колоний патогена замедлился от 70,1 % (Трихоцин, СП (*Trichoderma harzianum*)) до 94,7 % (Органика С, Ж (*Bacillus amyloliquefaciens*)) и от 86,1 % (Квадрис, СК (стробилурины)) до 98,2 % – 100 % (Капелла, МЭ, Магнелло, КЭ; Колосаль Про, КМЭ (триазолы), Амистар Трио, КЭ (стробилурины, триазолы)).

Препараты на основе *Trichoderma harzianum* (Трихоцин, СП), *Pseudomonas aureofaciens* (Псевдобактерин-2, Ж) и стробилуринов (Амистар Трио, КЭ и Квадрис, СК) полностью предотвращали спорообразование.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что чувствительность *P. teres* к препаратам класса триазолов (дифеноконазол, тебуконазол, пропиконазол, флутриафол) и *Bacillus amyloliquefaciens* остается на достаточно высоком уровне для оперативного сдерживания болезни (EC₅₀ от 1,4 мг/л до 4,7 мг/л). Установлено снижение чувствительности к препаратам на основе

стробилуринов, стробилуринов и триазолов популяции *P. teres* (EC₅₀ от 13,0 мг/л (азоксистробин, пропиконазол, ципроконазол) до 21,2 мг/л (азоксистробин)). Против повторного конидиального заражения сетчатой пятнистостью листьев рекомендовано применять препараты на основе азоксистробина, *Pseudomonas aureofaciens* и *Trichoderma harzianum*, которые полностью ингибируют спороношение гриба.

Заключение

Создан аннотированный набор данных для семантической сегментации проявлений сетчатой пятнистости листьев ячменя, ориентированный на автоматизированную диагностику степени развития *Pyrenophora teres*. Набор данных служит основой для разработки специализированных прикладных решений, таких как мобильные приложения или облачные сервисы, для использования в условиях реального сельскохозяйственного производства.

Иммунологическая оценка 19 сортов и одной линии ячменя озимого в фазу проростков и взрослого растения выявила устойчивость в онтогенезе сорта Тимофей и умеренную устойчивость сортов Версаль, Мастер, Паттерн, Сармат.

При посеве двухкомпонентной смеси умеренно устойчивого и восприимчивого к патогену сортов в различных пропорциях определена высокая степень обратной корреляции доли умеренно устойчивого сорта и развития болезни растений ($r = -0.93$). Оптимальной пропорцией для снижения развития болезни и хозяйственной эффективности сортосмеси умеренно устойчивого (MR) и восприимчивого (S) сортов определена пропорция 1 S:4 MR.

Выявлена слабая корреляция между сортовой устойчивостью к возбудителю сетчатой пятнистости листьев ячменя и морфотипами колоний *P. teres* ($r = 0,30$).

Определено, что на умеренно устойчивых сортах ячменя озимого накапливаются сложные расы возбудителя сетчатой пятнистости листьев, имеющие высокую агрессивность. Выделенные изоляты вызывали наибольшее развитие болезни восприимчивого сорта (Версаль (MR) – 2,5 балла, Романс (S) – 0,7 балла (2020–2021 гг.); Виват (MR) – 6,0 баллов, Рубеж (S) – 3,4 балла (2022–2023 гг.)). Наибольшее разнообразие рас определено после инокуляции образцами популяции *P. teres*, выделенными с умеренно устойчивых сортов Виват и Версаль (CF=0,15). Клональная фракция выделенных с восприимчивых к возбудителю сетчатой пятнистости листьев сортов составила CF=0,20.

Выявлена прямая пропорциональная зависимость между устойчивостью сорта и агрессивностью образцов популяции патогена. Развитие болезни на восприимчивом к патогену сорте (Версаль MR / Романс S – $F_{t5,12} < F_{f31,5}$ и Виват MR / Рубеж S – $F_{t5,12} < F_{f25,7}$), скорость роста колоний *P. teres* (Версаль MR / Романс S – $F_{t5,2} < F_{f28,3}$ и Виват MR / Рубеж S – $F_{t5,2} < F_{f49,2}$), интенсивность споруляции (Версаль MR / Романс S – $F_{t5,3} < F_{f9,3}$ и Виват MR / Рубеж S – $F_{t5,3} < F_{f10,5}$) статистически выше при инокуляции изолятами, отобранными с более устойчивых сортов. Данные изоляты имели меньший инкубационный период после инокуляции восприимчивого к патогену сорта (Версаль MR, Виват MR – трое суток; Рубеж S, Романс S – четверо и пятеро суток соответственно).

Установлено увеличение генетического разнообразия популяции гриба *P. teres* после обработки растений препаратами на основе триазолов (Колосаль Про, КМЭ (Sh=2,16), Капелла, МЭ, (Sh=2,14), Магнелло, КЭ (Sh=2,10)) и *Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж (Sh=2,12)). Средняя вирулентность выделенных после обработки биопрепаратами образцов популяции патогена была ниже на 14,6 % в сравнении с образцами, выделенными после обработки препаратами на химической основе.

Определена низкая эффективность против возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя препарата на основе грибов *Trichoderma harzianum* Трихоцин, СП (29,5 %) и химического препарата на основе стробилурина Квадрис, СК (52,6 %). Максимальная биологическая эффективность определена при использовании препаратов на биологической основе *Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж – 66,8 %) и препаратов химического класса триазолы (Колосаль Про, КМЭ – 97,0 %; Магнелло, КЭ – 88,2 %; Капелла, МЭ – 78,8 %). Во всех вариантах при внесении на агаризованную среду разрешенной для применения в сельском хозяйстве нормы рост колоний патогена замедлился с препаратами на биологической основе от 70,1 % (*Trichoderma harzianum* (Трихоцин, СП)) до 94,7 % (*Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж)) и от 86,1 % (стробилурины (Квадрис, СК)) до 100 % (стробилурины, триазолы (Амистар Трио, КЭ)) с препаратами на химической основе.

Препараты на основе *Trichoderma harzianum* (Трихоцин, СП), *Pseudomonas aureofaciens* (Псевдобактерин-2, Ж) и стробилуринов (Амистар Трио, КЭ и Квадрис, СК) полностью предотвращали спорообразование гриба.

Практические рекомендации

Устойчивый к патогену сорт Тимофей и умеренно устойчивые сорта Версаль, Мастер, Сармат рекомендованы для использования в зонах сильного распространения сетчатой пятнистости листьев ячменя в системе интегрированной защиты и в селекции как источники устойчивости.

В системах интегрированной защиты ячменя озимого от *P. teres* оптимальной для сдерживания болезни и достижения высоких показателей урожайности пропорцией сортосмеси умеренно устойчивого и восприимчивого сортов определена пропорция 1 S:4 MR, то есть одна часть восприимчивого сорта (Романс S) к четырем частям умеренно устойчивого сорта (Иосиф MR).

При проведении защитных мероприятий рекомендовано использование препаратов на основе триазолов (Колосаль Про, КМЭ, 0,4 л/га (пропиконазол 300 г/л, тебуконазол 200 г/л), Магнелло, КЭ, 1,0 л/га (дифеноконазол 100 г/л, тебуконазол 250 г/л), Капелла, МЭ, 1,0 л/га (дифеноконазол 30 г/л, пропиконазол 120 г/л, флутриафол 60 г/л)) и *Bacillus amyloliquefaciens* (Оргамика С, Ж, 0,4 л/га) для максимального ингибирования развития патогена.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ариничева, И. В. Диагностика развития сетчатой пятнистости озимого ячменя на основе цифровых интеллектуальных технологий / И. В. Ариничева,

Г. В. Волкова, И. В. Ариничев, **Я. В. Яхник** // Научные труды КубГАУ. – 2023. – №. 106. – С. 81–85. <https://doi.org/10.21515/1999-1703-106-81-85>.

2. Волкова, Г. В. Инновационный подход к мониторингу сетчатой пятнистости ячменя / Г. В. Волкова, И. В. Ариничева, **Я. В. Яхник** // Защита и карантин растений. – 2024. – №. 8. – С. 29–32. https://doi.org/10.47528/1026-8634_2024_8_29.

3. Данилова, А. В. Иммунологическая оценка сортов озимого ячменя к листовым заболеваниям на юге России / А. В. Данилова, **Я. В. Яхник**, Г. В. Волкова, Е. В. Гладкова, О. В. Таранчева // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. – № 5. – С. 16–21. <https://doi.org/10.31857/S2500262721050033>.

4. Волкова, Г. В., **Яхник Я. В.** Чувствительность возбудителя сетчатой пятнистости листьев ячменя (*Pyrenophora teres* Drechsler) к фунгицидам // Российская сельскохозяйственная наука. – 2023. – №. 6. – С. 48–52. <https://doi.org/10.31857/S2500262722040000>.

5. Ариничев, И. В. Модели на основе искусственного интеллекта для цифровой диагностики болезней зерновых культур (на примере *Pyrenophora teres* озимого ячменя) / И. В. Ариничев, И. В. Ариничева, Г. В. Волкова, **Я. В. Яхник** // Российская сельскохозяйственная наука. – 2024. – № 1. – С. 64–68. <https://doi.org/10.31857/S2500262724010128>.

Научные публикации в изданиях, индексируемых в базе данных WoS:

1. Volkova, G. Study of the influence of barley varieties with different resistance to barley net blotch on the change in the structure of the hemibiotrophic pathogen population by morphological and cultural characteristics and virulence / G. V. Volkova, **Y. V. Yakhnik**, A. N. Smirnova, E. S. Klychnikov // BIO Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Т. 21. – С. 00030. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202100030>.

2. Volkova, G., **Yakhnik, Y.** *Pyrenophora teres*: Population structure, virulence and aggressiveness in Southern Russia // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2022. – Т. 29. – №. 10. – С. 103401. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103401>.

3. **Yakhnik, Y.** Cultivar Mixtures as Part of Integrated Protection of Winter Barley from Leaf Diseases and Abiotic Stresses / Y. Yakhnik, G. Volkova, A. Danilova, K. Kutumov // Advancements in Life Sciences. – 2024. – Т. 11. – №. 4. – Р. 904–911. <http://dx.doi.org/10.62940/als.v11i4.3495>.

Научные публикации в прочих изданиях:

1. Волкова, Г. В. Подбор оптимальной питательной среды для культивирования *Pyrenophora teres* / Г. В. Волкова, **Я. В. Яхник**, О. Ю. Кремнева, Е. Г. Мерзликина // Вестник Ульяновской ГСА. – 2022. – Т. 3 – №.59. – С. 122–127. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2022-3-122-127>.

2. Волкова, Г. В. Иммунологическая оценка озимых сортов ячменя против сетчатой пятнистости листьев / Г. В. Волкова, **Я. В. Яхник**, А. В. Данилова // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2023. – Т. 53. – №. 7. – С. 48–56. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-7-6>.

3. Данилова, А. В. Защита озимого ячменя от сетчатой пятнистости листьев с использованием современных фунгицидов / А. В. Данилова, **Я. В. Яхник**,

А. Г. Изварина, Г. В. Волкова // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2024. – Т. 54. – №2. – С. 68–76. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2024-2-8>.

4. Ариничева, И.В. Компьютерное зрение для наблюдения и учета *Pyrenophora teres* озимого ячменя / И. В. Ариничева, Г. В. Волкова, **Я. В. Яхник**, И. В. Ариничев // Известия Кабардино-Балкарского НЦ РАН. – 2024. – Т. 26. №2. – С. 72-79. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2024-26-2-72-79>.

5. **Яхник, Я. В.**, Волкова, Г. В. Эффективность генов устойчивости ячменя против сетчатой пятнистости (возбудитель *Pyrenophora teres* f. sp. *teres* Drechler) // Сборник трудов Четвертого Международного Микологического Форума. М: Академия Микологии, 2020. – Т.8. – С. 354–355.

6. Данилова, А. В. Источники устойчивости к сетчатой пятнистости среди диких видов ячменя / А. В. Данилова, **Я. В. Яхник**, Г. В. Волкова, И. Г. Лоскутов // Материалы Международной конференции «Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем». – Краснодар: «ЭДВИ». – 2022. – С. 171–177. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49516147>.

7. Волкова, Г. В. Чувствительность сетчатой пятнистости ячменя к фунгицидам триазолового класса / Г. В. Волкова, **Я. В. Яхник**, Е. Н. Мерзликина, О. Ю. Шарай // Сборник материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей КНФ. – Краснодар: Кубанский научный фонд. – 2022. – С. 51–55. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49946159>.

8. Грибные патогены зерновых колосовых культур: биология, распространение, вредоносность, методы учета, сбора и хранения биоматериала. Создание искусственных инфекционных фонов: Научно-практические рекомендации / Г.В. Волкова, **Я.В. Яхник**, О.А. Кудинова, М.С. Гвоздева, А.В. Данилова, В.Д. Руденко, А.Д. Кустадинчев, Ю.С. Ким – Краснодар: ФГБНУ ФНЦБЗР, 2024. – 98 с. ISBN 978-5-93491-974-1.

Свидетельства о государственной регистрации баз данных:

1. № 2023624018 от 09.11.2023 г. «Образцы ячменя из коллекции генетических ресурсов растений ВИР, устойчивые к комплексу листовых болезней». Авторы: Данилова А. В., **Яхник Я. В.**, Волкова Г. В., Лоскутов И. Г. <https://elibrary.ru/item.asp?id=55997691>.

2. № 2024621996 от 13.05.2024 г. «Изображения сетчатой пятнистости на различных по устойчивости сортах ячменя озимого в онтогенезе». Авторы: Волкова Г. В., **Яхник Я. В.**, Данилова А. В., Ариничева И. В., Ариничев И. В. <https://elibrary.ru/item.asp?id=67262589>.

3. № 2025621010 от 04.03.2025 г. «Устойчивость сортов озимого ячменя к популяции возбудителя сетчатой пятнистости листьев (*Pyrenophora teres*) центральной агроклиматической зоны Краснодарского края». Авторы: **Яхник Я. В.**, Волкова Г. В., Кустадинчев А. Д., Данилова А. В. <https://elibrary.ru/item.asp?id=80524888>.