

*На правах рукописи*

Колесников Леонид Евгеньевич

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ БИОЛОГИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ МЯГКОЙ  
ПШЕНИЦЫ ОТ БОЛЕЗНЕЙ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Шифр и наименование специальности

**4.1.3 Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора биологических наук**

Санкт-Петербург-Пушкин  
2024

Работа выполнена на кафедре защиты и карантина растений Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО СПбГАУ)

**Научный консультант:**

**Павлюшин Владимир Алексеевич** – доктор биологических наук, профессор, академик РАН

**Официальные оппоненты:**

**Джалилов Февзи Сеид-Умерович** – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой защиты растений Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

**Торопова Елена Юрьевна** – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры защиты растений Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный аграрный университет»

**Немченко Владимир Васильевич** – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории регуляторов роста и защиты растений Курганского НИИСХ – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ФГБНУ УрО РАН)»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится 14 ноября 2024 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.008.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» (ФГБНУ ВИЗР) по адресу: 196608, Санкт-Петербург – Пушкин, шоссе Подбельского, д.3.

Тел./факс. +7(812) 470-51-10; e-mail: dissovet@vizr.spb.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ВИЗР и на сайте института: vizr.spb.ru

Автореферат разослан «       » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук

Гусева Ольга Геннадьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Производство зерновых культур – основная отрасль сельского хозяйства Российской Федерации, которая играет важнейшую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны (Архипов и др., 2017). Необходимым условием достижения высокого уровня продуктивности агробиоценозов зерновых культур является оптимизация фитосанитарного состояния посевов. Согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утверждённой Указом Президента РФ (01.12.2016 года № 642), общая концепция защиты растений должна предусматривать включение в процесс управления фитосанитарным состоянием агробиоценозов экологических рычагов естественного регулирования вредных организмов (Павлюшин и др., 2013). Решение этой задачи становится возможным при использовании системного подхода к защите растений, основанного на принципах агробиоценологии (Зубков, 2015), применении современных методов управления структурой агроэкосистем (Соколов и др., 2017).

### **Степень разработанности проблемы.**

В последние десятилетия в стране проводились исследования: влияния разных технологий возделывания пшеницы на продуктивность и фитосанитарное состояние посевов (Захаренко, 2011; Ткачук и др., 2012; Малюга и др., 2014); видового состава возбудителей болезней пшеницы и оценке их вредоносности, агрессивности и вирулентности в условиях изменения климата (Левитин, 2012; Gulyaeva et al., 2021); ассортимента средств защиты растений (Сухорученко и др., 2020; Санин и др., 2022); возможности генетического контроля развития болезней (Jambuthenne et al., 2022; Afanasenko et al., 2022); перспектив использования цифровых технологий в защите растений (Санин, Ибрагимов, 2019). Подчёркивается, что важной особенностью современных систем интегрированной защиты растений должна являться их направленность на экологическую безопасность и биологизацию, а в мероприятиях по защите растений следует учитывать механизмы естественной биоценотической регуляции агроэкосистем (Зубков, 2005; Павлюшин и др., 2020). Однако до настоящего времени мониторинг и системный анализ комплекса фитометрических и фитопатологических параметров посевов пшеницы, структуры урожайности и устойчивости к болезням, а также оценка их элементного статуса, биохимических особенностей, в том числе антиоксидантной активности, и выявление причинно-следственных связей между ними не проводились. Не раскрыты возможности использования методов и инструментов имитационного и статистического моделирования для изучения динамики развития болезней и выявления определяющих их факторов. Недостаточно изучены возможности применения спектрометрического метода к анализу отражательной способности растений, к созданию «оптических портретов» сортов пшеницы, в том числе – с симптомами поражения болезнями. Требуют исследования возможности использования интроскопического метода, включая микрофокусную рентгенографию и газоразрядную визуализацию, при анализе структурно-функциональных характеристик семян пшеницы и выявлении их связи

с продуктивностью и устойчивостью пшеницы к болезням. Недостаточно изучены возможности биологической стимуляции роста и защиты пшеницы от болезней с использованием микробиологических препаратов, композиций на основе хитозана и его производных, полифункциональных комплексов на основе микробов-антагонистов и хитозана, штаммов ассоциативных ризобактерий, гидрогелевых композиций, стимуляторов роста на основе аминокислотных комплексов, органоминеральных препаратов и микроудобрений, а также их сочетания в технологической схеме возделывания пшеницы.

**Цель настоящего исследования** – разработать экологически безопасные подходы к управлению фитосанитарным состоянием агроценозов мягкой пшеницы на основе использования в защите растений информационных технологий, совершенствования способов и средств биологического контроля.

**Задачи**, которые были решены для достижения цели исследования:

1. Экспериментально оценить стратегию защиты растений, основанную на использовании для фитосанитарного оздоровления агробиоценозов генетического потенциала мягкой пшеницы и построить математические модели, отражающие причинно-следственные связи между продуктивностью, пораженностью болезнями и агроэкологическими условиями Северо-Запада РФ;

2. Разработать математические модели, позволяющие прогнозировать развитие возбудителей листостебельных грибных инфекций пшеницы и оценивать их вредоносность с использованием методов системного анализа и имитационного моделирования;

3. Модифицировать системы управления продукционным процессом и фитосанитарным состоянием агробиоценозов мягкой пшеницы с использованием новейших достижений агрофизики: полевой спектрометрии, функциональной рентгенографии, газоразрядной визуализации;

4. Усовершенствовать способы биологической и фитоиммунологической защиты растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем мягкой пшеницы с использованием инновационных средств биологического контроля и регуляции роста растений.

5. Создать модели прогноза эффективности применения инновационных средств биологического контроля и регуляции роста растений при возделывании мягкой пшеницы в зависимости от природно-климатических факторов.

**Научная новизна.**

1. Впервые в исследованиях предложена методика многомерного параметрирования развития особо опасных грибных болезней на мягкой пшенице, основанная на анализе комплекса общепринятых и расчетных фитопатологических и фитометрических показателей, системный анализ которых позволил построить математические модели патогенеза и выявить основные агроэкологические факторы, оказывающие существенное влияние на фитосанитарное состояние посевов: метеорологические условия, в том числе активность Солнца; сочетание генетических, морфометрических и биохимических признаков сортов, линий и гибридов пшеницы, обладающих разной устойчивостью, толерантностью

(выносливостью) к болезням; инновационные и широко применяемые биологические средства защиты растений.

2. Построены математические модели, описывающие агроэкологическое варьирование продуктивности и поражаемости мягкой пшеницы возбудителями корневой гнили, бурой и желтой ржавчины, мучнистой росы и септориоза. Впервые выявление основных факторов, обуславливающих патогенез, основывалось на всестороннем анализе причинно-следственных связей между метеорологическими, фитометрическими и фитопатологическими показателями посевов, а выявление основных предикторов болезней – на определении относительной величины: доли коэффициентов корреляции Спирмена, как отношения числа отрицательных или положительных коэффициентов, характеризующих метеобусловленность патогенеза по месяцам текущего (январь–август) и предшествующего (сентябрь–декабрь) года проведения фитосанитарного мониторинга, к числу анализируемых сортов.

3. Разработана новая концептуальная имитационная модель динамики развития бурой ржавчины пшеницы, основанная на численном решении задачи Коши для системы пяти нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка с двумя запаздывающими аргументами для компонент «вектора состояния» уредостадии патогена, отражающая динамику развития болезни. В отличие от ранее разработанной нами упрощенной модели (Колесников и др., 2008), основанной на использовании при моделировании системы обыкновенных дифференциальных уравнений, предложенная модель позволяет значительно более точно учесть эффекты «запаздывания» в динамике развития патогена. Для численного интегрирования сформулированной системы уравнений была разработана оригинальная программа на основе алгоритма DIFSUBDEL. Экспериментально определен коэффициент оседания уредоспор, необходимый для практической реализации модели.

4. Определены различия в элементном составе устойчивых и восприимчивых к бурой ржавчине сортов и линий мягкой пшеницы, в том числе защищенных Lr-генами. Выявлены зависимости структуры урожайности пшеницы от содержания в растениях металлов и металлоидов.

5. Выявлены зависимости поражения мягкой пшеницы бурой ржавчиной и мучнистой росой, некоторых морфометрических показателей её продуктивности от антиоксидантного статуса образцов.

6. Построены полиномиальные и экспоненциальные регрессионные модели, и фотометрические шкалы, отражающие тенденцию ухудшения состояния посевов пшеницы по основным показателям структуры урожайности, качества зерна (по содержанию азота, фосфора и калия), фитосанитарного состояния (по степени поражения пшеницы возбудителем мучнистой росы) с ростом значений обратного вегетационного индекса  $F$  (стресс-индекса). С использованием вегетационных индексов ( $F$  и  $NDVI$ ) представлены оптические «портреты» сортов пшеницы, обладающих разной устойчивостью к болезням, а также характеризующихся разной отзывчивостью на применение средств биологической защиты растений.

7. Предложена система прогнозирования морфометрических показателей продуктивности мягкой пшеницы и интенсивности развития болезней в зависимости от структурно-функциональных характеристик семян. Построенные

модели были основаны на разработке «параметрического паспорта» семян включающего более 30-ти показателей, в том числе – денситометрических характеристик внутренних структур зерновок, геометрических, яркостных и вероятностных параметров газоразрядного свечения семян, морфометрических характеристик семян пшеницы. Охарактеризованы эффекты влияния полифункциональных комплексов, содержащих штаммы микроорганизмов-антагонистов, композиций на основе хитозана, на морфометрические и рентгенографические характеристики зерна.

8. Выявлены зависимости и построены математические модели, отражающие влияние природно-климатических факторов на эффективность микробиологических препаратов, органо-минеральных удобрений и микроудобрений, необходимые для анализа возможных рисков изменения их защитного и ростостимулирующего действия при возделывании мягкой пшеницы в полевых условиях.

### **Теоретическая и практическая значимость исследований.**

Многофакторный подход к исследованиям позволил усовершенствовать системы фитосанитарного мониторинга, моделирования и прогноза развития особо опасных болезней мягкой пшеницы с использованием комплекса фитометрических, биохимических, фитопатологических и спектрометрических показателей. Кроме того, указанный подход позволил осуществить детальный анализ факторов врожденного и приобретенного фитоиммунитета, оценить выносливость (толерантность) сортов мягкой пшеницы к болезням, проанализировать ее фенотипическую изменчивость по устойчивости к особо опасным болезням, отзывчивость на применение инновационных средств биологической защиты и регуляции роста растений, а также ее варьирование в зависимости от природно-климатических факторов. Это дало возможность расширить знания о причинно-следственных связях между комплексом агроэкологических условий возделывания мягкой пшеницы, фитосанитарным состоянием посевов, продуктивностью, а также оценить полифункциональное действие инновационных средств биологической защиты и регуляции роста на зерновые культуры для разработки зональных систем защиты растений.

Практическая значимость работы заключается в разработке и апробации методов исследования, актуальных при проведении фитосанитарного мониторинга мягкой пшеницы на устойчивость к особо опасным болезням, а также для построения системы прогноза их развития в других регионах; при выявлении наиболее ценных для селекции форм по признакам продуктивности, устойчивости и выносливости. Кроме того, практическая значимость исследований состоит в выявлении моделей сортов, адаптированных к полевым условиям Северо-Запада РФ; расширении ассортимента инновационных средств регуляции роста и биологической защиты растений от болезней, а также выработке рекомендаций по их применению при возделывании пшеницы с целью обеспечения производства семенного и продовольственного зерна с наилучшими посевными и товарными качествами, с учетом современных требований к безопасности сельскохозяйственной продукции. Значительную практическую ценность имеет адаптация методик полевой спектрометрии и интроскопического анализа к

экспресс-оценке продуктивности посевов пшеницы, к выявлению растений с симптомами поражения болезнями, к оценке качества зерна, в том числе, - у растений, подвергнутых защитным и стимулирующим обработкам.

### **Объект, предмет, место и период проведения научного исследования.**

Объект исследования – сорта и линии мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. ярового и озимого типа развития из отдела генетических ресурсов пшениц ФГБНУ «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (ВИР); особо опасные болезни пшеницы: бурая, желтая и стеблевая ржавчина, мучнистая роса, септориоз, гельминтоспориозная корневая гниль, инфекционное выпревание. Предмет исследования – селекционно-ценные признаки мягкой пшеницы, в том числе – устойчивость к болезням, фитопатологические и морфометрические показатели продуктивности и их изменение в зависимости от агроклиматических условий возделывания; средства биологической защиты и регуляции роста растений и отзывчивость мягкой пшеницы на их применение. Место проведения исследования – опытное поле научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (Северо-Западный регион РФ). Период проведения исследований: 1995–2022 гг.

### **Научно-методический подход и методы исследований.**

Подход включает несколько аспектов: *системный* – для разработки систем фитосанитарного мониторинга, моделирования и прогноза развития особо опасных болезней зерновых культур; *комплексный* – для создания имитационных и статистических моделей патогенеза; *инструментальный* – для оценки продуктивности пшеницы и устойчивости к болезням с использованием методов полевой спектрометрии растений, интроскопического анализа семенного материала, зерна вновь собранного урожая; *биохимический* и *агрохимический* – для оценки продуктивности пшеницы и её устойчивости к болезням, в том числе, при использовании инновационных и общепринятых средств биологической защиты и регуляции роста растений, органо-минеральных удобрений и микроудобрений.

В рамках принятого научно-методического подхода применялись как известные, так и оригинальные методы исследования. К использованным известным методам исследования относятся: *методы фитопатологической оценки устойчивости сортов пшеницы к болезням* (Stakman, Levine, 1922; Mains, Jackson, 1926; Mains, Dietz, 1930; Gassner, Straib, 1932; Peterson et al., 1948; Manners, 1950; Гешеле, 1971; James, 1971; Saari, Prescott, 1975; Бабаянц и др., 1988; Корнеев, Чадаева, 1992, 1993; Roelfs et al., 1992; Попов, 2011; Волкова и др., 2020); *методы учета морфометрических показателей продуктивности и урожайности пшеницы* (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур, 1989; Мережка и др., 1999; Семена сельскохозяйственных культур. Методы анализа, 2004; ГОСТ 12038-84; ГОСТ 12042-80); *методы интроскопического анализа зерна пшеницы* с использованием методов микрофокусной рентгенографии и газоразрядной визуализации (Архипов и др., 2016); *методы полевой спектрометрии*, используемые для оценки фитометрических и фитопатологических характеристик посевов пшеницы (Сурин, 2013; Сурин, Шубина, 2013; Фесенко, Шпанев, 2016, 2019); *фотоэлектрометрические методы*

определения в растительном материале общего азота, фосфора  $P_2O_5$  (метод Кьельдаля, ГОСТ 10846-91, ГОСТ Р 51420-99); *методы пламенной фотометрии* (ГОСТ 30504-97) – калия ( $K_2O$ ); *спектрофотометрический способ* определения содержания в листьях хлорофиллов *a* и *b* с использованием спектрофотометра SPEKOL-11 (Ермаков, 1987); *методы масс-спектрального анализа* с использованием масс-спектрометра ICP-MS 7700х, адаптированного к исследованиям по определению элементного состава листьев и зерен пшеницы (Колесников и др., 2014; Колесников и др., 2018); *методы определения антиоксидантной активности растительного материала* на основе способности клеточного сока ингибировать аутоокисление адреналина *in vitro*, и тем самым предотвращать образование активных форм кислорода (Сирота Т.В. Патент № 2144674. Способ определения антиоксидантной активности супероксиддисмутазы и химических соединений. 20.01.2000. РФ); *методы определения количества микроорганизмов в почве* (Титова, Козлова, 2011).

К применённым в работе оригинальным методам, разработанным при участии автора, относятся: *метод многомерного параметрирования патогенеза*, в том числе – с использованием дополнительных к общепринятым фитопатологических показателей: число пустул на флаговом и предфлаговом листе, площадь пустулы, определяемая по формуле площади эллипса – бурая ржавчина, желтая ржавчина; число и длина полос с пустулами, число пустул в полосе – желтая ржавчина; число пустул на 1 см длины стебля – стеблевая ржавчина (Колесников и др., 2013); число и площадь пятен с налетом, число конидий с 1 см<sup>2</sup> пораженной поверхности – мучнистая роса (Власова, Колесников, 2002; Колесников и др., 2011; Kolesnikov et al., 2021; Колесников и др., 2022); объем пикноспор (мкм<sup>3</sup>) возбудителей септориоза: *Stagonospora nodorum* Berk, аппроксимируемых эллипсоидами вращения и *Zymoseptoria tritici* Desm. – круговыми цилиндрами (Колесников и др., 2010); *алгоритм автоматической систематизации данных полевых исследований* 1995-2022 гг. для статистического анализа и построения математических моделей патогенеза (госзадание Министерства сельского хозяйства РФ по теме: «Моделирование влияния агроэкологических факторов на развитие возбудителей болезней зерновых культур и определение возможности повышения урожайности мягкой пшеницы в изменяющихся условиях Северо-Запада Российской Федерации, номер государственного учета НИОКТР 122011300483-3, 2021 г., руководитель проекта – Колесников Л.Е., URL: <https://rosrid.ru>); *метод анализа многолетней динамики развития болезней* с использованием формулы трапеций для расчета площади под кривой, характеризующей изменение фитопатологических показателей со временем учета, определения их средневременных значений и ошибок (Колесников, Власова, 2003; Колесников, 2017); *методика имитационного моделирования развития уредостадии бурой ржавчины пшеницы*, основанная на использовании системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка с двумя запаздывающими аргументами (Колесников и др., 2022); *метод экспериментального определения коэффициента оседания уредоспор* для практической реализации вышеуказанной имитационной модели (Колесников и др., 2001); *методика метеопатологического прогноза развития особо опасных болезней мягкой пшеницы*, основанная на построении матриц коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена,



характеризующих метеобусловленность фитопатологических показателей на разных сортах с последующим выявлением тенденций в их изменении, а также – на факторном анализе развития болезней листьев пшеницы (Колесников и др., 2009; Колесников и др., 2022); методика моделирования эффективности микробиологических препаратов и штаммов ассоциативных бактерий в зависимости от метеорологических условий возделывании мягкой пшеницы (Колесников и др., 2023).

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Оптимизация фитосанитарного состояния для повышения продуктивности агроценозов мягкой пшеницы на Северо-Западе Российской Федерации (в Ленинградской области) на основании данных о ее внутривидовом разнообразии по устойчивости к особо опасным болезням, построении моделей, отражающих причинно-следственные связи между фитопатологическими, фитометрическими характеристиками посевов, элементным составом и антиоксидантной активностью растений.
2. Экологические принципы управления фитосанитарным состоянием агробиоценозов мягкой пшеницы, основанные на системном (многомерном) анализе и моделировании количественных закономерностей в патосистеме «пшеница-патоген», прогнозировании рисков развития эпифитотий.
3. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем мягкой пшеницы с использованием инновационных инструментальных методов агрофизики (газоразрядной визуализации, микрофокусной мягколучевой рентгенографии, спектральных индексов) для оценки качества семенного материала и анализа адаптивного потенциала растений в полевых условиях.
4. Подходы к разработке экологически безопасных систем возделывания мягкой пшеницы, основанные на применении инновационных средств биологической защиты растений и регуляции роста (полифункциональных комплексов и композиций на основе хитозана, биологически активных веществ и бактерий-антагонистов; чистых культур штаммов PGPR-ризобактерий; белковых гидролизатов; полимерного гидрогеля; органо-минеральных удобрений и микроудобрений).
5. Биологизация системы защиты мягкой пшеницы от болезней с использованием элементов прогнозирования эффективности органо-минеральных удобрений, микроудобрений, микробиологических препаратов и штаммов бактериальных культур, отселектированных по хозяйственно-ценным признакам.

### **Степень достоверности результатов исследований.**

Объективность и достоверность полученных результатов обусловлена многолетней экспериментальной работой (с 1995 по 2022 гг.) с использованием известных и оригинальных методов исследования, а также статистической обработкой данных с применением пакетов прикладных программ: «Statgraphics», «NCSS and PASS», «Statistica», «SPSS Statistics», «STADIA», «Mathematica».

**Апробация результатов исследования.** Основные положения диссертации были представлены на 81-й международной, 9-и всероссийских и 5-и региональных конференциях и съездах, в том числе на Всероссийских съездах по защите растений (1995, 2005, 2013, 2024) и на ежегодных международных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО СПбГАУ (1996-2024 гг.).

Результаты исследований были внедрены на предприятии ЗАО «Павловская МТС» и использованы в Северо-Западном Центре междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения – обособленном структурном подразделении ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН» (СЗЦПО– СПб ФИЦ РАН).

Результаты исследований были представлены на международных ярмарках-выставках «Агрорусь» (2019 г., 2021 г.), на XV и XVII Международных биотехнологических Форумах-Выставках «РосБиоТех» (2022 г., 2024 г.), XXV-ой Российской агропромышленной выставке «Золотая осень-2023» (2023 г.) и были поддержаны пятью Золотыми медалями и одной Бронзовой медалью.

**Личный вклад автора.** Многолетние полевые исследования выполнены автором лично или под его непосредственным руководством по разработанной им методике анализа и контроля фитосанитарного состояния посевов мягкой пшеницы. По инициативе и при непосредственном активном участии автора были созданы информационные ресурсы; адаптированы подходы к статистической обработке экспериментальных результатов, способствующие автоматизированной систематизации данных полевых исследований. Составление плана исследований, выбор места их проведения, анализ данных и осмысление полученных результатов осуществлены лично автором.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 148 работ, из которых: 55 – в изданиях, входящих в список ВАК РФ и индексируемых в международных базах данных; 90 – в других периодических изданиях, материалах научных конференций, съездов; 3 – в учебных и методических пособиях.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на 624 страницах машинописного текста, включает Введение, 4 главы, Заключение, Практические рекомендации, Список публикаций по теме диссертации, Список литературы, 8 приложений и содержит 19 таблиц, 150 рисунков. Список использованной литературы включает 778 источников, из них 312 на иностранных языках.

**Благодарности.** Выражаю искреннюю благодарность и признательность ученым ФГБОУ ВО СПбГАУ, СПбГУ, ВИР, ФГБНУ ВИЗР, ФГБНУ ВНИИСХМ, Университета ИТМО, ФГБНУ АФИ, ФГУП «НИИ ГПЭЧ» ФМБА России, оказавшим помощь в ходе выполнения работы по теме диссертации: профессору кафедры экологии и физиологии растений, кандидату с.-х. наук С.П. Мельникову; профессору кафедры физической механики математико-механического факультета СПбГУ, доктору физ.-мат. наук Е.К. Колесникову; зав. отделом генетических ресурсов пшеницы канд. с.-х. наук Е.В. Зуеву, доктору биол. наук И.Г. Одинцовой; ведущему научному сотруднику лаборатории микологии и фитопатологии, доктору

биол. наук Е.И. Гультяевой; ведущему научному сотруднику лаборатории микробиологической защиты растений, доктору биол. наук И.И. Новиковой и канд. биол. наук Э.В. Поповой; зав. лабораторией ризосферной микрофлоры, доктору биол. наук А.А. Белимову; профессору мегафакультета Биотехнологий Университета ИТМО, доктору техн. наук М.И. Кременевской; директору международного научно-исследовательского Центра биоинженерии Университета ИТМО, доктору техн. наук М.В. Успенской; зав. сектором биофизики растений, канд. техн. наук Н.С. Прияткину; главному научному сотруднику сектора биофизики растений, профессору, доктору биол. наук М.В. Архипову; зав. лабораторией опытного дела АФИ, доктору биол. наук А.М. Шпаневу и канд. физ.-мат. наук В.Г. Сурину; зав. лабораторией промышленной и водной токсикологии, доктору мед. наук О.Н. Танюхиной, младшему научному сотруднику лаб. промышленной и водной токсикологии ФГУП «НИИ ГПЭЧ» ФМБА России О.И. Буровой. Особые слова признательности выражаю моему научному консультанту академику РАН, доктору биол. наук, профессору В.А. Павлюшину за ценные советы, рекомендации и постоянную поддержку. Считаю своим долгом вспомнить моих учителей в области изучения фитопатологии канд. биол. наук В.В. Костицина, Н.Л. Полозову, А.И. Литвиненко, а также моего первого научного руководителя доктора с.-х. наук, профессора Э.А. Власову и выразить им глубокую благодарность за переданные мне знания и опыт.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ ФИТОСАНИТАРНОГО ОЗДОРОВЛЕНИЯ ПОСЕВОВ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)**

В обзоре проанализированы научные сведения, связанные с темой исследований. Отмечено, что усиление интенсивности поражения зерновых культур болезнями может быть связано с нарушениями в структурно-функциональной организации агроэкосистем (Зубков, 2008; 2015; Павлюшин и др., 2008). При этом сорта являются важнейшими средообразующими факторами агробиоценозов (Санин, 2013), поэтому современные стратегии защиты растений от болезней должны быть основаны на всестороннем использовании генетического потенциала зерновых культур (Афанасенко и др., 2011). Математические модели эпифитотий позволяют рассматривать взаимодействие патоген – хозяин как комплексный процесс, зависящий от большого количества факторов (Павлюшин, Лысов, 2019; Николаев и др., 2019; Чекмарев, 2016; Жаров и др., 1999; Санин, 1999). Существенно расширили возможности исследований достижения агрофизики: методы полевой спектроскопии (Сурин, Кувалдин, 2009; Сурин и др. 2011) и интроскопического анализа семян (Архипов и др., 2016). Альтернатива химическим средствам защиты растений – использование штаммов бактерий-антагонистов фитопатогенных микромицетов (Шапошников и др., 2011; Павлюшин и др., 2021; Сырова и др., 2021); индукторов болезнестойчивости растений, в том числе

хитозана, который обладает высокой ростостимулирующей и элиситорной активностью, выраженными антибактериальными и фунгицидными свойствами (Тютюрев, 2016; Попова и др., 2021; Краснобаева и др., 2022). При выборе средств защиты растений от вредных организмов большое внимание уделяется использованию биопрепаратов полифункционального действия (Новикова, 2019; Титова и др., 2019), а для повышения продуктивности растений и улучшения структуры почвы – органо-минеральным удобрениям (Tejada et al, 2005; Kravets et al., 2011; Ergo et al., 2016; Olivares et al., 2017), микроудобрениям, в том числе на основе наночастиц серебра (Yurkova et al., 2013), аминокислотным подкормкам растений (Colla et al., 2017; Xu, Geelen, 2018), полимерным гидрогелям (Pourjavadi et al., 2004; Успенская и др., 2006; Chang et al., 2009; Baidakova et al., 2019) и др.

## Глава 2. НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ, ОБЪЕКТ, ПРЕДМЕТ, МЕСТО И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работу выполняли на полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова». Почвы дерново-слабоподзолистые, супесчаные и суглинистые по механическому составу, хорошо окультуренные. Основные агрохимические показатели почвы: водородный показатель солевой вытяжки  $pH = 4,8$  (ГОСТ 26483-8); фосфор подвижный в пересчете на  $P_2O_5$  (ГОСТ Р 54650-2011)  $3455 \pm 691$  млн<sup>-1</sup> (мг/кг); калий подвижный в пересчете на  $K_2O$  (ГОСТ Р 54650-2011)  $97,5 \pm 14,6$  млн<sup>-1</sup>; органическое вещество (ГОСТ 26213-2021)  $3,55 \pm 0,53\%$  (Колесников и др., 2023).

Общая схема исследований изображена ниже на рисунке 1. Объект, предмет, место и период проведения исследований указаны выше на стр. 7. Научно-методические подходы к проведению исследований и использованные автором известные и оригинальные методы исследования, перечисленные выше на стр. 7-9, подробно описаны в п. 2.3 Диссертации. Там же представлена подробная методологическая схема исследования.

Для совершенствования приемов защиты зерновых культур от болезней в работе был использован комплекс средств биологической защиты и регуляции роста растений: *микробиологические препараты* – «Гамаир, СП» (*Bacillus subtilis* М-22), «Витаплан, СП» (*B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D) (Колесников и др., 2017; 2019), *экспериментальные образцы из лаборатории микробиологической защиты ФГБНУ ВИЗР* – композиции на основе хитозана: «Хитозан I» и «Хитозан II»; 0,1% салицилат хитозана (Попова и др., 2017; Колесников Л.Е. и др., 2018, 2022); полифункциональные комплексы «Витаплан, КЖ + Хитозан II» (Колесников и др., 2019); «Витаплан, КС и Хитозан II» (Novikova et al., 2020); «Витаплан, КЖ + 0,1% Хитозан (салицилат хитозана)»; «Витаплан КЖ + коллоидный хитин (0,1%)»; «Витаплан КЖ + коллоидный хитин (0,1%) + 0,1% Хитозан (салицилат хитозана)» (Kolesnikov et al, 2020); «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (глубинное культивирование)»; полифункциональный комплекс «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (композиция)» (Kolesnikov et al., 2021); «*B. subtilis* И-5 + 0.1 % салицилат хитозана»; *штаммы ассоциативных ризобактерий*: *Bacillus subtilis* 124-11, *B. subtilis* И-5, *B. subtilis* ВКМ В-2604D, *B. subtilis* ВКМ В-2605D (ингибиторы роста фитопатогенных грибов); *Sphingomonas*

sp. K1B (гиперпродуцент ауксинов) и *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 (продуцент ауксинов, содержит АЦК дезаминазу, ингибитор роста фитопатогенных грибов) из лабораторий микробиологической защиты растений ФГБНУ ВИЗР и ризосферной микрофлоры ВНИИСХМ; *белковые стимуляторы роста различного состава и молекулярной массы* (R и RM), которые были разработаны по уникальной технологии на мегафакультете пищевых биотехнологий и низкотемпературных систем Университета ИТМО из продуктов переработки убойных животных (Кременевская и др., 2022; Kolesnikov et al., 2020, 2023); *влагопоглощающая полимерная гидрогелевая композиция* на основе акрилата калия и N, N' – метиленбисакриламида, предоставленная для исследований Международным научным центром Биоинженерии Университета ИТМО (Baidakova et al., 2019; Колесников и др., 2021; Kolesnikov et al., 2021); *микроудобрения и органоминеральные препараты*: «ФлорГумат», «Флора С», «Эдагум», «Фитоп-Флора-С», «Зеребра агро», «БатырМах», «Батыр 40N», «Батыр 40N+Мах», «Азофоска» (Колесников и др., 2019), экспериментальный образец «Органик» находящийся в стадии испытаний и сертификации (Мельников и др., 2016), «Trace Mix» («ZM-Grow», <https://www.tracegrow.com>) – продукт переработки алкалиновых батареек (ISO 9001:2015; ISO 14001:2015); «Natural Green» (Прияткин и др., 2020).

### Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1 Анализ генетических ресурсов мягкой пшеницы яровой по устойчивости к особо опасным болезням листьев.

Иммунологическая защита от возбудителей болезней является приоритетной во всем мире. В связи с этим особое внимание было уделено выявлению образцов пшеницы, обладающих высокой устойчивостью к болезням листьев: стеблевой ржавчине (Колесников и др., 2013), септориозу (Колесников и др., 2010), бурой ржавчине (Колесников и др., 2018), желтой ржавчине (Колесников и др., 2013), мучнистой росе (Зуев Е.В. и др., 2012). Использование комплекса общепринятых (развитие болезни, тип реакции), и дополнительных (расчетных) фитопатологических показателей (число и площадь пустул, число спор в пустуле, число конидий с 1 см<sup>2</sup> листа и др.), а также методов и средств компьютерного анализа позволило повысить точность обнаружения устойчивых к болезням образцов. В результате проведенных исследований определены взаимосвязи между происхождением мягкой пшеницы и полевой устойчивостью к болезням, что дает возможность осуществлять целенаправленный отбор устойчивых форм из выявленных по происхождению групп. Построены математические модели, характеризующие динамику различных типов патогенеза на сортах и линиях пшеницы, защищенных генами устойчивости (Власова, Колесников, 2002; Колесников, Власова, 2003; Колесников и др., 2006). Полученные данные могут быть использованы для решения проблемы рационального использования генетических ресурсов мягкой пшеницы в экологически безопасных системах защиты растений и обеспечения национальной продовольственной безопасности Российской Федерации.

### **3.2 Оценка мягкой пшеницы озимой по устойчивости к инфекционному выпреванию.**

На основании результатов фитосанитарного мониторинга мягкой пшеницы озимой по устойчивости к инфекционному выпреванию за период 2002-2006 гг. выявлены сорта, резистентные к болезни. Наибольшее число образцов с отсутствием симптомов инфекционного выпревания было выявлено, когда в посевах пшеницы преобладали образцы из России и сопредельных стран Ближнего зарубежья. Наиболее интенсивное развитие болезни было отмечено в 2006 г. на посевах мягкой пшеницы преимущественно иностранной селекции (площадь очага поражения для большинства исследуемых образцов достигала 90-100%). Представленные данные подтверждают предположение о том, что чем сильнее климатические условия стран, из которых были завезены исследуемые образцы, отличаются от условий Северо-Западного региона РФ, тем значительнее такие образцы будут поражаться инфекционным выпреванием вследствие отсутствия у них генетической приспособленности к такого рода климатическим условиям (Власова и др., 2004, 2005; Колесников, Фунтов, 2004; Колесников, Колесникова, 2010).

### **3.3 Влияние особо опасных болезней на фитометрические показатели посевов мягкой пшеницы.**

Построены математические модели, позволяющие оценивать степень ограничения продуктивности пшеницы при различных типах патогенеза, обусловленных развитием особо опасных болезней: бурой и желтой ржавчины, мучнистой росы, септориоза. Выявлена тенденция снижения толерантности большинства сортов пшеницы к болезням при росте их потенциальной урожайности (Колесникова, Колесников, 2012). В наибольшей степени поражению бурой ржавчиной подвергались сорта с наиболее ценными показателями структуры урожая (Колесников и др., 2012). Возрастание поражения пшеницы корневой гнилью обуславливало сильное снижение урожайности пшеницы по годам исследования, а также способствовало усилению поражения пшеницы бурой ржавчиной и мучнистой росой (Колесников и др., 2022). Усиление интенсивности развития корневой гнили пшеницы приводило к снижению общей кустистости образцов ( $r = -0.5$ ;  $P = 0.031$ ); площади флаговых ( $r = -0.8$ ;  $P = 0.01$ ) и предфлаговых листьев ( $r = -0.3$ ;  $P = 0.04$ ) (Kolesnikov et al., 2021). Построенные модели оценки вредоносности возбудителей болезней, изученной по комплексу фитопатологических показателей на различных по устойчивости сортах пшеницы, позволяют детально проанализировать влияние различных типов патогенеза на морфометрические показатели продуктивности пшеницы, повышают точность и информативность результатов прогнозирования потерь урожая при принятии решений о целесообразности проведения защитных мероприятий.

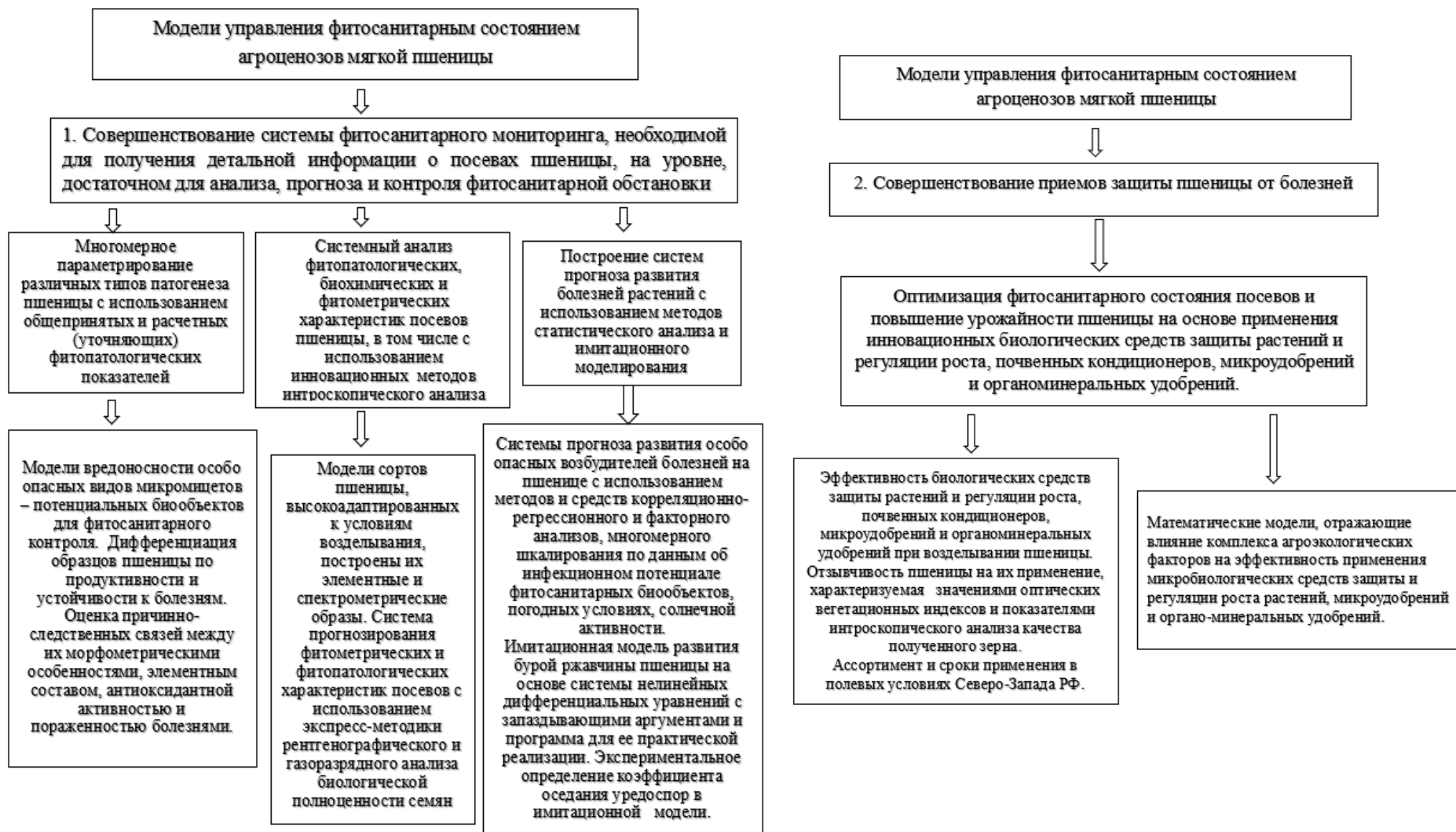


Рисунок 1 – Общая схема исследований (1995-2022 гг.).

### **3.4 Выявление взаимосвязей морфобиологических признаков мягкой пшеницы с продуктивностью и устойчивостью к болезням.**

Наибольшая урожайность выявлена у среднерослых сортов пшеницы (81-98 см). Высокорослые сорта (более 98 см), по сравнению с низкорослыми (менее 81 см), отличались наибольшей длиной колоса и числом колосков в колосе, но меньшим числом зерен в колосе, массой зерен колоса, массой 1000 зерен. Максимальными величинами массы колоса ( $M_k=1,3\pm 0,1$  г) и интегрального показателя – продуктивности одного растения ( $Y_p = 1,8\pm 0,1$  г растение<sup>-1</sup>) характеризовались среднерослые растения (Колесников и др., 2022). Выявлена зависимость роста числа зерен в колосе, массы зерен одного колоса, массы колоса с зернами от увеличения содержания хлорофилла *b* во флаговых листьях пшеницы (Колесников и др., 2019). Статистически обосновано влияние морфологических особенностей растений (высоты растений, угла наклона листа к стеблю (балл, градусы), окраски и опушенности листьев (балл, длина и плотность трихом на 1 см<sup>2</sup>) на интенсивность развития особо опасных болезней пшеницы. В частности, бурая ржавчина меньше всего развивалась на высокорослых растениях, желтая ржавчина – на низкорослых (госзадание Министерства сельского хозяйства РФ, номер государственного учета НИОКТР 122011300483-3, 2021 г.). При светло-зеленой окраске листа отмечено меньшее развитие бурой ржавчины, чем при темно-зеленой. Зарегистрирована меньшая пораженность флаговых листьев разных сортов пшеницы бурой и желтой ржавчиной, мучнистой росой при угле наклона к стеблю в интервале 121-180° (Колесников и др., 2022). Увеличение угла наклона листа к стеблю и утолщение воскового налета приводило к снижению не только развития желтой ржавчины, но и числа спор в пустуле, числа полос с пустулами, площади пустулы (Колесникова и др., 2008). Выявленные морфологические особенности образцов относятся к факторам нерасоспецифической (горизонтальной) устойчивости растений к болезням, и могут быть использованы в зональных системах фитоиммунологической защиты пшеницы, в частности, для ограничения распространения инфекционного начала и замедления эпифитотического процесса.

### **3.5 Моделирование влияния природно-климатических факторов на интенсивность развития листостебельных болезней.**

Зарегистрировано усиление развития бурой ржавчины с повышением температуры в декабре, мае и со снижением температуры в июле, что было установлено на основании значений коэффициентов корреляции Спирмена, рассчитанных для 74 сортов пшеницы и характеризующих многолетнюю (с 1995 по 2012 гг.) метеобусловленность фитопатологических показателей (госзадание Министерства сельского хозяйства РФ, номер государственного учета НИОКТР 122011300483-3, 2021 г.). С увеличением температуры воздуха и количества дней с повышенной температурой от 24 до 26°С (с 8 июля по 14 августа 1995-2005 гг., таблица 1), наблюдали уменьшение среднемноголетней интенсивности развития бурой ржавчины (Колесников и др., 2009).

Усилению развития желтой ржавчины способствовало уменьшение суммы температур в мае, а также уменьшение солнечной активности, характеризуемой числом пятен на Солнце и индексом Вольфа – таблица 2 (Колесников и др., 2022).



Таблица 1 – Относительные значения коэффициентов корреляции Пирсона R, отражающих влияние среднесуточной температуры воздуха на особенности развития возбудителя бурой ржавчины на 74-х сортах мягкой пшеницы. 1995-2006 гг. (Колесников и др., 2009).

| Показатель                            | Число пустул на флаговом листе |       | Площадь пустулы, мм <sup>2</sup> |       | Число спор в пустуле, шт. |       |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------|----------------------------------|-------|---------------------------|-------|
|                                       | R > 0                          | R < 0 | R > 0                            | R < 0 | R > 0                     | R < 0 |
| Среднее значение температуры, °С      | 42,11                          | 57,89 | 36,84                            | 63,16 | 84,21                     | 15,79 |
| Коэффициент вариации температуры, %   | 63,16                          | 36,84 | 68,42                            | 31,58 | 21,05                     | 78,95 |
| Дисперсия значений температуры        | 31,58                          | 68,42 | 47,37                            | 52,63 | 36,84                     | 63,16 |
| Интервал колебаний температуры, °С    | 42,11                          | 57,89 | 78,95                            | 21,05 | 36,84                     | 63,16 |
| Минимальное значение температуры, °С  | 42,11                          | 57,89 | 31,58                            | 68,42 | 89,47                     | 10,53 |
| Максимальное значение температуры, °С | 42,11                          | 57,89 | 63,16                            | 36,84 | 68,42                     | 31,58 |
| Число дней с температурой (°С):       |                                |       |                                  |       |                           |       |
| от 8 до 10                            | 5,56                           | 94,44 | 72,22                            | 27,78 | 38,89                     | 61,11 |
| от 10 до 12                           | 5,56                           | 94,44 | 72,22                            | 27,78 | 38,89                     | 61,11 |
| от 12 до 14                           | 73,68                          | 26,32 | 68,42                            | 31,58 | 5,26                      | 94,74 |
| от 14 до 16                           | 73,68                          | 26,32 | 73,68                            | 26,32 | 0                         | 100   |
| от 16 до 18                           | 47,37                          | 52,63 | 26,32                            | 73,68 | 36,84                     | 63,16 |
| от 18 до 20                           | 26,32                          | 73,68 | 52,63                            | 47,37 | 84,21                     | 15,79 |
| от 20 до 22                           | 31,58                          | 68,42 | 21,05                            | 78,95 | 73,68                     | 26,32 |
| от 22 до 24                           | 57,89                          | 42,11 | 73,68                            | 26,32 | 100                       | 0     |
| от 24 до 26                           | 15,79                          | 84,21 | 36,84                            | 63,16 | 63,16                     | 36,84 |

Сильная эпифитотия стеблевой ржавчины, зарегистрированная в 2010 г., может быть связана с резким увеличением числа пятен на Солнце – на 418,8% по сравнению с 2009 г. (Колесников и др., 2020). Усилению развития мучнистой росы способствовал рост среднемесячной температуры января и ее снижение в мае и июле. Интенсивность поражения пшеницы септориозом возрастала с уменьшением температуры воздуха в весенний период: март–май (госзадание Министерства сельского хозяйства РФ, номер государственного учета НИОКТР 122011300483-3, 2021 г.). В ходе наших исследований (Колесников Л.Е. и др., 2020) отмечено, что в ближайшие десятилетия может наблюдаться тенденция снижения поражения пшеницы бурой ржавчиной и усиления – мучнистой росой, желтой ржавчиной, пиренофорозно-септориозной пятнистостью. Это связано с гипотезой о возможном глобальном похолодании климата планеты и периодом минимума солнечной активности, на что указывает и выявленная нами положительная непараметрическая корреляционная связь между среднегодовым общим числом пятен на Солнце и среднемесячными значениями температуры в июле.

Интенсивность поражения сортов пшеницы инфекционным выпреванием большинства изученных образцов пшеницы преимущественно возрастала с понижением температуры в январе и уменьшением суммы выпавших осадков, а также определялась значениями относительной влажности воздуха. Непосредственно в период проведения наблюдений (апрель) отмечена сопряженность интенсивности патогенеза инфекционного выпревания с ясной и теплой погодой, без осадков, но с высокими значениями относительной влажности воздуха (Колесников, Колесникова, 2010).

Таблица 2 – Факторный анализ элементов продуктивности мягкой пшеницы (сорт Ленинградская 6, к-64900), фитопатологических показателей развития болезней, метеорологических условий и солнечной активности в периоды ее вегетации. 2009-2020 гг. (Колесников и др., 2022).

| Показатель                                        | Факторные нагрузки |                |                |                |                |
|---------------------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                   | F <sub>1</sub>     | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> | F <sub>4</sub> | F <sub>5</sub> |
| Высота, см                                        | -0,16              | <b>0,89</b>    | 0,05           | 0,28           | 0,13           |
| Площадь флагового листа, см <sup>2</sup>          | 0,39               | 0,40           | 0,13           | 0,67           | -0,01          |
| Длина колоса, см                                  | 0,07               | 0,00           | 0,14           | 0,65           | 0,55           |
| Число колосков в колосе, шт.                      | 0,07               | 0,11           | -0,04          | 0,39           | 0,48           |
| Число зерен в колосе, шт.                         | 0,08               | -0,41          | -0,10          | 0,00           | <b>0,81</b>    |
| Масса зерен колоса, шт.                           | -0,42              | -0,59          | -0,14          | 0,11           | 0,57           |
| Масса 1000 зерен, г                               | -0,41              | -0,64          | -0,25          | 0,07           | 0,20           |
| Урожайность одного растения, г                    | 0,07               | -0,05          | 0,38           | -0,06          | <b>0,84</b>    |
| Сумма температур выше 10 °С (май, с 11 числа), °С | <b>0,70*</b>       | 0,15           | <b>0,58</b>    | 0,05           | -0,07          |
| Сумма осадков (май, с 11 числа), °С               | 0,02               | -0,24          | 0,22           | 0,09           | <b>0,86</b>    |
| Сумма температур (июнь), °С                       | 0,31               | 0,13           | -0,12          | 0,06           | <b>0,74</b>    |
| Сумма осадков (июнь), °С                          | -0,06              | 0,29           | <b>0,73</b>    | -0,53          | -0,05          |
| Сумма температур (июль), °С                       | 0,68               | 0,24           | 0,26           | 0,44           | -0,24          |
| Сумма осадков (июль), °С                          | -0,08              | 0,09           | 0,17           | <b>-0,92</b>   | -0,06          |
| Сумма температур (август), °С                     | <b>0,84</b>        | 0,20           | 0,03           | -0,14          | 0,08           |
| Сумма осадков (август), °С                        | 0,10               | 0,24           | 0,15           | <b>-0,90</b>   | -0,10          |
| Относительная влажность (май), %                  | 0,56               | 0,48           | 0,21           | 0,33           | -0,25          |
| Относительная влажность (июнь), %                 | 0,31               | <b>0,71</b>    | -0,06          | 0,29           | -0,36          |
| Относительная влажность (июль), %                 | 0,21               | 0,68           | -0,42          | -0,19          | -0,15          |
| Относительная влажность (август), %               | 0,13               | <b>0,90</b>    | -0,08          | 0,07           | -0,05          |
| ГТК (июль)                                        | -0,23              | <b>0,79</b>    | 0,01           | -0,46          | -0,08          |
| ГТК (август)                                      | 0,11               | <b>0,79</b>    | 0,17           | -0,44          | 0,09           |
| Развитие бурой ржавчины, %                        | -0,11              | -0,05          | <b>0,84</b>    | 0,08           | -0,04          |
| Число пустул бурой ржавчины, шт.                  | 0,10               | -0,06          | <b>0,82</b>    | -0,05          | 0,30           |
| Площадь пустулы бурой ржавчины, мм <sup>2</sup>   | -0,03              | 0,14           | <b>0,85</b>    | 0,00           | 0,06           |
| Развитие желтой ржавчины, %                       | <b>-0,92</b>       | 0,21           | -0,06          | 0,14           | 0,04           |
| Число пустул желтой ржавчины, шт.                 | <b>-0,95</b>       | 0,08           | -0,01          | 0,11           | 0,11           |
| Площадь пустулы желтой ржавчины, мм <sup>2</sup>  | <b>-0,80</b>       | -0,22          | 0,31           | 0,28           | -0,08          |
| Число пустул желтой ржавчины в полосе, шт.        | <b>-0,98</b>       | -0,03          | -0,04          | -0,06          | 0,04           |
| Число полос желтой ржавчины, шт.                  | <b>-0,97</b>       | 0,10           | -0,05          | -0,05          | 0,07           |
| Длина полосы желтой ржавчины, мм                  | <b>-0,96</b>       | 0,09           | -0,03          | -0,17          | -0,09          |
| Развитие септориоза, %                            | 0,16               | 0,16           | <b>-0,51</b>   | 0,36           | -0,23          |
| Развитие мучнистой росы, %                        | -0,50              | -0,12          | <b>-0,70</b>   | 0,21           | -0,13          |
| Число пятен мучнистой росы                        | -0,30              | 0,08           | <b>-0,72</b>   | 0,20           | -0,17          |
| Площадь пятен мучнистой росы, мм <sup>2</sup>     | -0,36              | 0,03           | -0,49          | 0,35           | <b>-0,72</b>   |
| Число пятен на Солнце (среднее за год), шт.       | <b>0,86</b>        | 0,20           | 0,04           | 0,25           | 0,37           |
| Число пятен на Солнце (в июле), шт.               | <b>0,82</b>        | 0,23           | 0,01           | 0,28           | 0,37           |
| Число пятен на Солнце (в августе), шт.            | <b>0,88</b>        | 0,23           | 0,09           | 0,14           | 0,33           |
| Число Вольфа (июль), балл                         | <b>0,81</b>        | 0,22           | 0,03           | 0,29           | 0,38           |
| Число Вольфа (август), балл                       | <b>0,88</b>        | 0,23           | 0,10           | 0,16           | 0,35           |

\* – факторные нагрузки статистически достоверны при  $p < 0,05$

### 3.6 Внутривидовая изменчивость мягкой пшеницы по элементному составу, антиоксидантной активности и их связь с урожайностью и устойчивостью к вредным организмам.

Элементный состав и антиоксидантная активность мягкой пшеницы связана с продуктивностью и устойчивостью к болезням. Наибольшее влияние на комплекс показателей продуктивности пшеницы оказало содержание в зерне К, Мо, Cr, Sc, Со.

Растения с отсутствием симптомов развития бурой ржавчины отличались меньшим содержанием в листьях тяжёлых металлов V, Fe, Co, Zn, Pb, Cr, Mn, а также Sb и Al. Интенсивность развития болезни снижалась с увеличением содержания в листьях Se. Устойчивые образцы отличались большим числом достоверных корреляционных связей между изученными химическими элементами, чем восприимчивые (Колесников и др., 2014).

В листьях у высокоустойчивых изогенных линий Thatcher, обладающих ювенильной устойчивостью и характеризующихся отсутствием симптомов поражения бурой ржавчиной, по сравнению с линиями, проявившими сильную восприимчивость к болезни, отмечено достоверно меньшее содержание тяжелых металлов Ni, Ag, Cr, Fe, Co, Cd, а также K. Интенсивность развития бурой ржавчины снижалась с увеличением содержания Se во флаговых листьях. Линии с Lr-генами ювенильной устойчивости отличались меньшим числом достоверных корреляционных взаимосвязей между элементами во флаговых листьях при большей степени поражения возбудителем бурой ржавчины по сравнению с линиями – носителями генов возрастной устойчивости. Согласно данным таблицы 3, интенсивность развития бурой ржавчины на флаговых листьях пшеницы достоверно повышалась с ростом значений коэффициентов биологического накопления Al, K, Cr, Fe, Co, Ni, Sb, Cd (Колесников и др., 2018).

Таблица 3 – Корреляционные связи между фитопатологическими показателями интенсивности развития бурой ржавчины пшеницы на изогенных линиях Thatcher и коэффициентами биологического накопления химических элементов растениями из почвы (Колесников и др., 2018).

| Элемент | R <sub>б</sub> | N <sub>п</sub> | S <sub>п</sub> | T     |
|---------|----------------|----------------|----------------|-------|
| Na      | 0,11           | 0,07           | -0,18          | 0,12  |
| Mg      | 0,20           | 0,13           | -0,14          | 0,11  |
| Al      | 0,47*          | 0,43*          | -0,04          | 0,30  |
| K       | 0,42           | 0,38*          | 0,24           | 0,49* |
| Ca      | 0,27           | 0,21           | -0,02          | 0,13  |
| Cr      | 0,44*          | 0,43*          | 0,25           | 0,32  |
| Mn      | -0,02          | -0,02          | -0,05          | 0,00  |
| Fe      | 0,39*          | 0,38*          | 0,07           | 0,27  |
| Co      | 0,49*          | 0,46*          | 0,10           | 0,35  |
| Cu      | 0,30           | 0,33           | 0,27           | 0,23  |
| Ni      | 0,65           | 0,64*          | 0,14           | 0,51* |
| Zn      | -0,02          | -0,02          | 0,01           | 0,02  |
| Se      | -0,09          | -0,19          | -0,19          | -0,04 |
| Mo      | 0,21           | 0,19           | 0,08           | 0,05  |
| Ba      | 0,23           | 0,13           | 0,14           | 0,18  |
| Pb      | 0,03           | 0,08           | -0,20          | -0,05 |
| Sb      | 0,43*          | 0,40*          | -0,07          | 0,23  |
| As      | 0,05           | 0,15           | 0,09           | 0,06  |
| Cd      | 0,38*          | 0,41*          | 0,14           | 0,24  |
| Be      | -0,05          | -0,03          | -0,27          | -0,13 |
| Ag      | 0,16           | 0,19           | 0,29           | 0,27  |

\* Значения коэффициента корреляции Спирмена статистически значимы при  $P < 0,05$ .

Примечание: R<sub>б</sub> – развитие болезни, %; N<sub>п</sub> – число пустул, шт.; S<sub>п</sub> – площадь пустулы, мм<sup>2</sup>; T – тип реакции, балл.

У сортов, зерна которых отличались более высокой антиоксидантной активностью (АОА), отмечены большие значения массы 1000 зерен, продуктивной кустистости, площади флагового листа, но меньшие значения числа зерен в колосе, длины колоса. Они отличались меньшей поражённостью возбудителями мучнистой росы и бурой ржавчины. Изогенные линии Thatcher, проявившие большую устойчивость к возбудителю бурой ржавчины и характеризующиеся незначительным развитием болезни, отличались большей антиоксидантной активностью листьев, чем восприимчивые образцы, в умеренной и сильной степени пораженные болезнью (Колесников и др., 2015). Таким образом, при проектировании высокопродуктивных агроэкосистем зерновых культур и прогнозировании фитосанитарных рисков следует учитывать элементный статус сортов и линий пшеницы, характер химического загрязнения почвы, а также данные об антиоксидантной активности образцов.

### **3.7 Прогнозирование урожайности и интенсивности поражения мягкой пшеницы болезнями с использованием методов интроскопического анализа зерна.**

Изучена возможность контроля структурно-функциональных характеристик семян мягкой пшеницы с помощью методов неразрушающего контроля – газоразрядной визуализации и микрофокусной рентгенографии для прогнозирования ее урожайности и интенсивности развития болезней. Выявлены положительные корреляционные связи между длиной колоса и фрактальностью по изолинии ( $r = 0,41$ ,  $p < 0,05$ ), длиной изолинии ( $r = 0,35$ ,  $p < 0,05$ ) зерен, используемых в качестве посевного материала. В то же время увеличение длины изолинии зерен обуславливало снижение показателей общей и продуктивной кустистости растений ( $r = -0,41$ ,  $p < 0,05$ ). Отмечена достоверная положительная корреляция между значениями фрактальности по изолинии и следующими показателями: массой зерен колоса:  $r = 0,39$ ,  $p < 0,05$ ; массой 1000 зерен:  $r = 0,72$ ,  $p < 0,05$ ; массой колоса  $r = 0,49$ ,  $p < 0,05$ . На рост значений массы 1000 зерен мягкой пшеницы влияли параметры размеров зерен, в частности, площадь проекции зерна ( $r = 0,61$ ,  $p < 0,05$ ) (Архипов и др., 2016).

Поражение пшеницы бурой ржавчиной усиливалось, а септориозом и мучнистой росой – снижалось с ростом площади и формы газоразрядного изображения ГРИ, среднего квадратичного отклонения СКО фрактальности по изолинии ГРИ семян, изрезанности контура ГРИ семян и с уменьшением энтропии по изолинии ГРИ семян, фрактальности по изолинии ГРИ семян, СКО радиуса изолинии ГРИ семян. Развитие септориоза на большинстве сортов пшеницы усиливалось, а мучнистой росы и бурой ржавчины (по числу пустул) снижалось с возрастанием значений периметра, длины, ширины, средней хорды, СКО яркости, максимальной яркости, интегральной яркости проекции семян. Рост среднего размера и средней яркости проекции семян обуславливал увеличение интенсивности поражения растений бурой ржавчиной, мучнистой росой, септориозом (Kolesnikov et al, 2021).

Применение биопрепаратов оказывало статистически достоверное влияние на интроскопические характеристики зерна вновь собранного урожая. Нами установлено (Колесников Л.Е. и др., 2019), что в варианте опыта с применением полифункционального комплекса «Витаплан, Ж + Хитозан II» и «Хитозан II», зерна пшеницы имели меньшую величину суммарной интенсивности газоразрядного

изображения по сравнению с контролем, что характерно для зерен, имеющих лучшие ростовые показатели при их проращивании. В работе И.И. Новиковой с соавторами (Novikova et al., 2024) отмечено, что в варианте: «*B. subtilis* И-5 + 0,1 % салицилат хитозана» существенно увеличился средний размер и округлость зерен, средняя яркость их рентген-проекции (таблица 4). Нами установлено, что обработка растений пшеницы белковым стимулятором роста R привела к выраженному увеличению размера зерен, их округлости и полноценности по сравнению с контрольной группой (Колесников и др., 2020).

Таким образом, интроскопические методы (микрофокусная рентгенография, газоразрядная визуализация и т.п.) в перспективе могут применяться для повышения продуктивности агроэкосистем зерновых культур и управления фитосанитарным состоянием посевов посредством использования биологически полноценных семян с заданными оптическими характеристиками.

Таблица 4 – Результаты морфометрической и рентгенографической оценки семян пшеницы при обработке растений бактериальными штаммами и полифункциональными комплексами (Novikova et al., 2024)

| Вариант опыта                                           | Показатель, единица измерения |                                                   |                                   |                                     |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
|                                                         | Средний размер, мм            | Средняя яркость рентген-проекции, единицы яркости | Округлость, относительные единицы | Удлиненность, относительные единицы |
| Контроль (вода)                                         | 4,97 ± 0,042                  | 135,4 ± 0,61                                      | 0,508 ± 0,005                     | 1,990 ± 0,0188                      |
| <i>B. subtilis</i> ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D            | 4,91 ± 0,043                  | 133,7 ± 0,62 *                                    | 0,520 ± 0,006 *                   | 1,957 ± 0,0196                      |
| Витаплан, СП                                            | 5,16 ± 0,076 *                | 132,1 ± 0,84 *                                    | 0,507 ± 0,008                     | 2,007 ± 0,0288                      |
| <i>B. subtilis</i> ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0.1 % СХ | 5,04 ± 0,040                  | 134,7 ± 0,57                                      | 0,510 ± 0,005                     | 1,978 ± 0,0188                      |
| <i>B. subtilis</i> И-5 + 0.1 % СХ                       | 5,07 ± 0,038 *                | 136,8 ± 0,58 *                                    | 0,520 ± 0,005 *                   | 1,951 ± 0,0186 *                    |
| <i>B. subtilis</i> И-5                                  | 4,99 ± 0,083                  | 136,4 ± 1,11                                      | 0,510 ± 0,008                     | 1,980 ± 0,0426                      |

\* – Различия существенны при  $p < 0,05$  по сравнению с контролем

### 3.8 Применение спектрометрических индексов при оценке адаптивного потенциала мягкой пшеницы к условиям Северо-Западного региона РФ.

Разработаны фотометрические шкалы, отражающие зависимости основных фитопатологических и фитометрических характеристик посевов пшеницы от стресс-индекса F (обратного вегетационного индекса) и нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI, построенные с использованием отечественных приборов – четырехканального и двухканального оптического тестеров ПИФ-М (Сурин и др., 2005) и АДТ-М (Колесников и др., 2015), а также зарубежного портативного тестера – Trimble GreenSeeker (Novikova et al., 2020).

При увеличении величины стресс-индекса F, измеренного АДТ-М, наблюдалось ухудшение состояния посевов пшеницы по основным показателям структуры урожайности и качества зерна (по содержанию азота, фосфора и калия), поражаемости растений особо опасными болезнями (таблица 5). Рост значений NDVI сопровождался

увеличением основных морфометрических показателей продуктивности растений – площади флагового листа, продуктивной кустистости и высоты растений.

Применение полифункционального комплекса «Витаплан, КЖ и Хитозан II» приводило к существенному росту NDVI, являющегося относительным показателем количества фотосинтетически активной биомассы (Novikova et al., 2020). Полученные данные могут быть использованы для экспресс-контроля продуктивности и фитосанитарного состояния агробиоценозов зерновых культур, а также для оценки эффективности применения ассортимента средств защиты и регуляции роста растений.

Таблица 5 – Состояние посевов пшеницы по структуре урожайности и биохимическим показателям качества зерна при разных значениях стресс-индекса F (Колесников и др., 2015).

| Стресс-индекс (F) | M <sub>1000</sub> , г. | S <sub>л</sub> , см <sup>2</sup> | Y <sub>з</sub> , т/га | N, мг/г | P, мг/г | K, мг/г | R <sub>м</sub> , % | N <sub>п.м</sub> | Состояние посевов |                    |
|-------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|
|                   |                        |                                  |                       |         |         |         |                    |                  | Балл              | Градация состояния |
| 0,1               | 37,1                   | 14,6                             | 3,1                   | 23,3    | 2,5     | 26,1    | 1,0                | 1,0              | 5                 | Хорошее            |
| 0,2               | 35,4                   | 13,5                             | 2,3                   | 22,4    | 2,3     | 25,6    | 4,2                | 4,7              | 4                 |                    |
| 0,3               | 33,8                   | 12,5                             | 2,2                   | 21,4    | 2,3     | 25,1    | 19,1               | 14,4             | 3                 | Удовлетворительное |
| 0,4               | 32,2                   | 11,6                             | 2,2                   | 20,5    | 2,2     | 24,6    | 37,4               | 26,3             | 2                 |                    |
| 0,5               | 30,5                   | 10,8                             | 2,2                   | 19,6    | 2,2     | 24,1    | 59,7               | 40,7             | 1                 | Плохое             |

Примечание: M<sub>1000</sub> – масса 1000 зерен, г; S<sub>л</sub> – площадь флагового листа, см<sup>2</sup>; Y<sub>з</sub> – урожайность (т/га); N, P, K – содержание в зерне азота, фосфора, калия, мг/г; R<sub>м</sub> – развитие мучнистой росы; N<sub>п.м</sub> – число пятен с налетом мучнистой росы на листе.

### 3.9 Имитационное моделирование развития бурой ржавчины пшеницы с использованием системы нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием.

Цикл развития возбудителя бурой ржавчины пшеницы описывали системой из пяти нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка с двумя запаздывающими аргументами для компонент «вектора состояния» уредостадии патогена. Для численного интегрирования сформулированной системы уравнений был использован программный комплекс DIFSUBDEL (Колесников и др., 2022; госзадание Министерства сельского хозяйства РФ, номер государственного учета НИОКТР 122011300483-3, 2021 г.). Экспериментально определен коэффициент оседания уредоспор, необходимый для практической реализации модели (Власова и др., 2004). Построенная имитационная модель развития бурой ржавчины пшеницы может быть использована при создании современных экспертных систем прогнозирования развития болезней растений, позволит оценивать риски развития эпифитотийного процесса и оптимизировать сроки применения средств защиты растений.

## Глава 4. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ И РЕГУЛЯЦИИ РОСТА ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ

### 4.1 Микробиологические препараты, композиции на основе хитозана, полифункциональные комплексы, 0,1% салицилат хитозана.

Получены новые данные по биологической эффективности как общеизвестных, так и инновационных микробиологических средств защиты растений в отношении комплекса фитометрических и фитопатологических показателей мягкой пшеницы сорта Ленинградская 6, к-64901: биопрепаратов «Гамаир, СП», «Витаплан, СП» (Колесников и др., 2017, 2019), композиций на основе хитозана: «Хитозан I» и «Хитозан II»; 0,1% салицилата хитозана (Попова и др., 2017; Колесников и др., 2018, 2022); полифункциональных комплексов: «Витаплан, КЖ + Хитозан II» (Колесников и др., 2019; Новикова и др., 2023); «Витаплан, КС и Хитозан II» (Novikova et al., 2020); «Витаплан, КЖ + 0,1% Хитозан» (салицилат хитозана); «Витаплан КЖ + коллоидный хитин (0,1%)»; «Витаплан КЖ + коллоидный хитин (0,1%) + 0,1% Хитозан (салицилат хитозана)» (Kolesnikov et al., 2020); «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (глубинное культивирование)»; полифункциональный комплекс «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (композиция)» (Kolesnikov et al., 2021).

Наибольшая продуктивность у сорта Ленинградская 6, к-64901 была выявлена в вариантах опыта «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (глубинное культивирование)» –  $4,17 \pm 0,33$  г/растение и «0,1% салицилат хитозана» –  $4,11 \pm 0,37$  г/растение, что на 100,2% и 97,4% больше, чем средняя величина в контроле ( $Y_{\text{п}} = 2,01 \pm 0,29$  г/растение), соответственно (рис. 2).

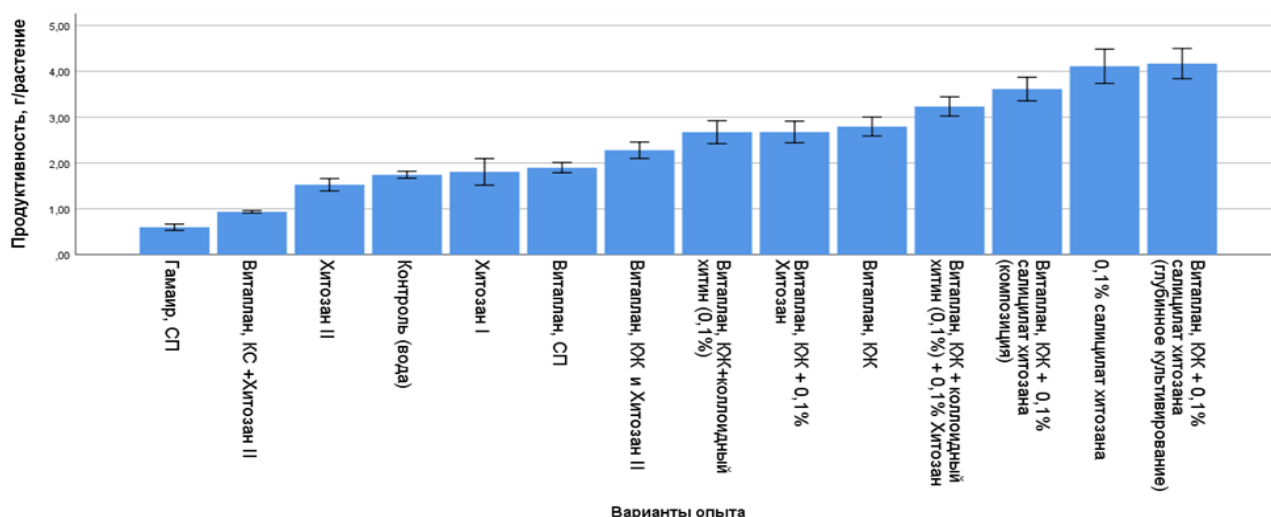


Рисунок 2 – Продуктивность мягкой пшеницы сорта Ленинградская 6, к-64901 при использовании микробиологических препаратов, композиций на основе хитозана, 0,1% салицилата хитозана, полифункциональных комплексов. 2016-2021 гг.

В отношении снижения поражения пшеницы болезнями наибольшая биологическая эффективность БЭ выявлена при использовании «0,1% салицилата хитозана» (мучнистая роса пшеницы,  $BЭ_{\text{м}} = 95,0\%$ ); полифункциональных комплексов: «Витаплан, КЖ + 0,1% Хитозан» (бурая ржавчина пшеницы,  $BЭ_{\text{б}} = 70,2\%$ ), «Витаплан,

КЖ + 0,1% салицилат хитозана (композиция)» (желтая ржавчина пшеницы, БЭ<sub>ж</sub>=80,7%), биопрепарата «Гамаир, СП» (корневая гниль пшеницы, БЭ<sub>г</sub>=77,8%). Наилучшими ростостимулирующими и защитными свойствами обладал полифункциональный комплекс «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (глубинное культивирование)». При его применении зарегистрировано существенное снижение интенсивности поражения растений мучнистой росой, бурой и желтой ржавчиной.

Соотношение содержания хлорофиллов *a* и *b* и содержания пигментов группы каротиноидов, как одного из показателей устойчивости растений к внешним неблагоприятным факторам, достигало максимальных значений в варианте опыта «Витаплан, КЖ + Хитозан II» (Новикова и др., 2023).

В вариантах опыта «*B. subtilis* И-5 + 0,1 % салицилат хитозана» и «*B. subtilis* И-5» зарегистрировано снижение поражения пшеницы желтой ржавчиной на 19% (БЭ=63-64%). Биологическая эффективность полифункциональных комплексов «*B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0,1 % салицилат хитозана» и «*B. subtilis* И-5 + 0,1% салицилат хитозана» в отношении мучнистой росы составила 92,8%. Выявлена тенденция снижения интенсивности развития корневой гнили пшеницы в вариантах опыта: «*B. subtilis* И-5 + 0,1% салицилата хитозана» – на 7,7%; «*B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D + 0,1 % салицилата хитозана» – на 10,8%; *B. subtilis* И-5 – на 11,3% (Novikova et al., 2024).

Эффективность микробиологического препарата «Витаплан, СП» (титр жизнеспособных клеток  $10^{11}$  КОЕ/г) и культуральной жидкости (КЖ) штаммов *B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D (при соотношении 1:1 с титром жизнеспособных клеток  $10^{10}$  КОЕ/мл) в отношении морфометрических показателей продуктивности в большей степени зависела от показателей влагообеспеченности вегетационного периода: суммы осадков в июне, суммы осадков июле-августе, относительной влажности воздуха в июне, гидротермического коэффициента (ГТК) в июле и августе. Эффективность бактериальных штаммов, связанная со снижением развития комплекса возбудителей болезней пшеницы, возрастала с ростом суммы осадков в мае (корневая гниль), суммы осадков в августе (мучнистая роса), суммы температур в мае, суммы осадков в августе, ГТК в июле и августе (желтая ржавчина). Было отмечено усиление поражения пшеницы корневой гнилью при применении бактериальных штаммов с ростом суммы осадков в июне и июле, мучнистой росой – с ростом суммы осадков в мае, желтой ржавчиной – с ростом суммы температур в июне (Колесников и др., 2023).

Вышеперечисленные инновационные микробиологические средства защиты и регуляции роста растений на основе селектированных штаммов *B. subtilis*, индукторов устойчивости растений – хитозана и его производных и, особенно, полифункциональные комплексы защитного и ростостимулирующего действия, могут быть использованы при создании препаративных форм биопрепаратов, в том числе жидких культур, суспензионных концентратов, и их государственной регистрации.

#### 4.2 Ассоциативные ризобактерии (*Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. K1B, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137).

Приведены данные по биологическому обоснованию применения при возделывании мягкой пшеницы (сортов Сударыня, к-66407; Trizo, к-64981; Аjeeba, к-



55721; Ленинградская 6, к-64900) новых штаммов ассоциативных ризобактерий (2017-2022 гг.): *Bacillus subtilis* 124-11; *Sphingomonas* sp. K1B, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 из Ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения при ФГБНУ ВНИИСХМ (Белимов и др., 2018; Колесников и др., 2019, 2023; Kolesnikov et al., 2021, 2023).

При использовании бактериальных штаммов *Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. K1B, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 наибольший рост продуктивности пшеницы по сравнению с контролем был выявлен в период вегетации с более низкими значениями температуры в мае-июле, и более высокими значениями суммы осадков и относительной влажности воздуха. В отношении корневой гнили пшеницы наибольшую эффективность проявил штамм *Sphingomonas* sp. K1B, применение которого, на сортах Сударыня, к-66407 и Trizo, к-64981 приводило к достоверному снижению интенсивности развития болезни по всем годам исследования. Во всех вариантах опыта зарегистрирована тенденция снижения интенсивности развития бурой ржавчины пшеницы по сравнению с контролем, но особенно в варианте с *Sphingomonas* sp. K1B. Достоверное снижение поражения растений септориозом выявлено при обработке растений штаммами *Sphingomonas* sp. (на 16,4%) и *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 (на 14,6%). Поражение растений мучнистой росой достоверно уменьшилось только в варианте опыта с *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 (Kolesnikov et al, 2021, 2023). Выявлено существенное увеличение по сравнению с контролем содержания во флаговых листьях сорта Trizo, к-64981 хлорофилла *a* при использовании *Bacillus subtilis* 124-11 (на 77,3%) и *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 (на 63,8%).

Интенсивность поражения пшеницы корневой гнилью, бурой и желтой ржавчиной, септориозом увеличивалась, а эффективность бактериальных штаммов в отношении возбудителей болезней снижалась с увеличением значений суммы температур в мае. Обратная тенденция выявлена в отношении мучнистой росы – со снижением температуры в мае относительное изменение развития болезни в разных вариантах опыта увеличивалось, а их эффективность снижалась.

Таким образом, эффективность штаммов ассоциативных бактерий *Bacillus subtilis* 124-11, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137, *Sphingomonas* sp. K1B в отношении снижения развития болезней зависела от сорта мягкой пшеницы, типа патогенеза, природно-климатических факторов. Результаты работы подтверждают имеющиеся в литературе сведения о том, что максимальный эффект от применения бактериальных препаратов можно получить на основе тщательного выявления тех штаммов, которые в наибольшей степени адаптируются к агроэкологическим условиям возделывания культуры.

#### **4.3 Белковый стимулятор роста (белковый гидролизат).**

При внекорневой обработке растений белковым стимулятором роста R, в составе которого были аминокислоты с преобладанием глицина и пептидов молекулярной массой от 200 до 1000 Да, у 72% сортов пшеницы выявлен существенный рост продуктивности по сравнению с контролем: Сибирская 21, к-66269 – на 143,1% (2017 г.); Тулайковская 108, к-65452 – на 103,0% (2017 г.); Уральская кукушка, к-66267 – на 87,9% (2017 г.); Амурская красноколоска, к-32095 – на 69,9% (2018–2019 гг.); Красноуфимская 110, к-65478 – на 59,2% (2018–2019 гг.). Увеличение вегетативной массы мягкой пшеницы выявлено на сортах Ленинградская

97, к-62935 – на 41,9% и к-32666 – на 39,1%. Внекорневое опрыскивание растений R обуславливало увеличение общего азота в листьях пшеницы у 92% образцов в среднем на 84,6% (Кременевская и др., 2022). По результатам микрофокусной рентгенографии, в варианте с R зерна пшеницы имели лучшие оптические характеристики по сравнению с контролем (Колесников, 2020).

Статистически достоверное снижение корневой гнили при применении R было зафиксировано на сортах: Тюменская 29, к-65247 (на 16,8%, БЭ<sub>Г</sub> = 33,7%, 2018–2019 гг.), Тюменская 30, к-65248 (на 11,3%, БЭ<sub>Г</sub> = 25,5%, 2018–2019 гг.), Кампанин, к-65445 (на 11,0%, БЭ<sub>Г</sub> = 25,0%, 2018–2019 гг.), Сударыня, к-66407 (на 25,0%, БЭ<sub>Г</sub> = 75,0%, 2017 г.), Trizo, к-64981 (на 26,7%, БЭ<sub>Г</sub> = 80,0%, 2017 г.), Челябинка ранняя, к-66268 (на 22,2%, БЭ<sub>Г</sub> = 66,7%, 2017 г.), Кинельская юбилейная, к-66270 (на 32,9%, БЭ<sub>Г</sub> = 57,6%, 2017 г.), Тюменочка, к-66271 (на 16,7%, БЭ<sub>Г</sub> = 66,7%, 2017 г.). Значительное снижение развития мучнистой росы при применении R было зарегистрировано на сортах: к-32666 (на 7,6%, БЭ<sub>М</sub> = 77,6%, 2018–2019 гг.), Уральская кукушка, к-66267 (на 4,0%, БЭ<sub>М</sub> = 80,0%, 2017 г.) (Кременевская и др., 2022). Ростостимулирующие и защитное действие R отмечали и на других сортах пшеницы (Kolesnikov et al., 2020). Так, нами показана большая эффективность R в отношении продуктивности пшеницы и оздоровления фитосанитарного состояния посевов, чем при использовании органо-минеральных удобрений и микроудобрений.

Совместное применение R с полимерным гидрогелем на основе акрилата калия и N, N' – метиленбисакриламида (1G:2S – гидрогель, 6 г на 1 м<sup>2</sup> или 60 кг/га + белковый стимулятор R, 4 г на 1 м<sup>2</sup> или 40 кг/га) обуславливало прибавку урожая у сорта мягкой пшеницы Trizo, к-64981 – 2,8 т/га, что в основном было связано с действием полимерного гидрогеля и белкового стимулятора роста на показатели полевой всхожести и продуктивной кустистости. В отношении возбудителей болезней полимерный гидрогель и комплексы на его основе действовали неоднозначно. Максимальное снижение интенсивности развития корневой гнили на сорте Trizo, к-64981 выявлено в варианте опыта 0,5G (в перерасчете на возможность связывания 200 мл влаги в почве, 3 г на 1 м<sup>2</sup> или 30 кг/га) – на 20%, а совместное применение полимерного гидрогеля и белкового стимулятора роста в варианте 0,5G:1S (гидрогель, 3 г на 1 м<sup>2</sup> или 30 кг/га + белковый стимулятор, 2 г на 1 м<sup>2</sup> или 20 кг/га) приводило к снижению развития болезни на 8,9% (Kolesnikov et al., 2021). По нашим данным, при совместном использовании R с полимерным гидрогелем (0,5G:1S) на флаговых листьях сорта Ленинградская 97, к-62935 происходило достоверное, по сравнению с контролем, снижение развития желтой ржавчины – на 30,5 % (рис. 3).

В дальнейшем, в опытах на сорте Ленинградская 6, к-64900, использовали белковый стимулятор роста RM с молекулярной массой 700000, да и с содержанием глицина на 17% больше по сравнению с R (Kolesnikov et al., 2023, 2024). При совместном использовании гидрогеля и RM в варианте опыта 0,5G:1RM (3 г на 1 м<sup>2</sup> или 30 кг/га + семена, замоченные в белковом гидролизате) выявлено существенное снижение развития корневой гнили и мучнистой росы (БЭ<sub>Г</sub>=83,3% и БЭ<sub>М</sub>=81,5%), однако, при этом, урожайность пшеницы существенно не изменилась по сравнению с контролем. Существенное снижение поражения растений желтой ржавчиной (по развитию болезни – БЭ<sub>ж</sub>=68,5%; числу полос с пустулами – БЭ<sub>пл.ж</sub>=69,9%; числу пустул БЭ<sub>п.ж</sub>=69,9%) и мучнистой росой (по площади пятен с налетом – БЭ<sub>пл.м</sub>=77,8%)

отмечено в варианте опыта 1G:2RM (гидрогель, 6 г на 1 м<sup>2</sup> или 60 кг/га + семена, замоченные в белковом гидролизате) (Kolesnikov et al., 2023).

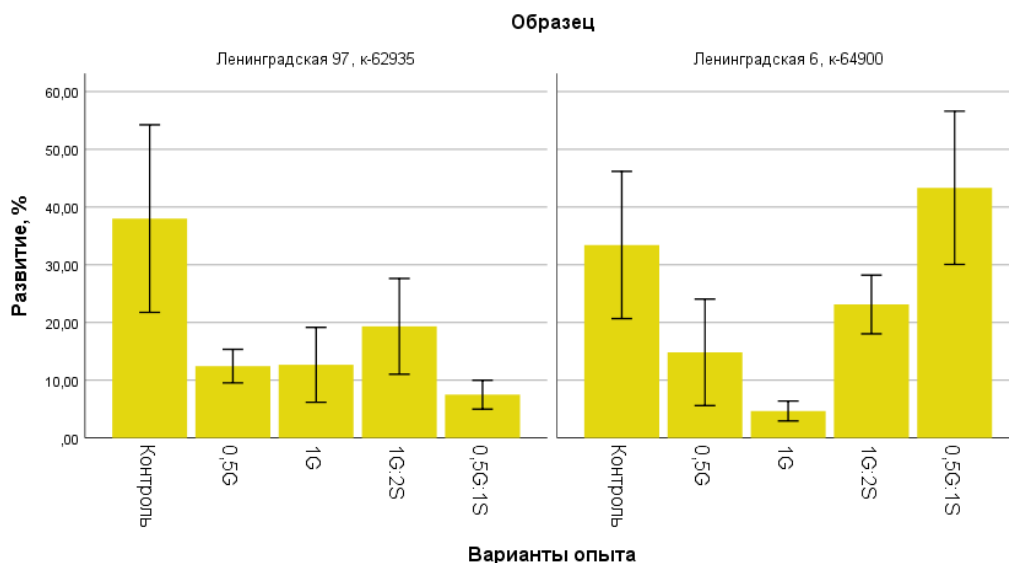


Рисунок 3 – Развитие желтой ржавчины на мягкой пшенице при использовании полимерного гидрогеля и белкового стимулятора роста. 2019-2020 гг. Примечание: К - контроль; 0,5G - гидрогель в перерасчете на возможность связывания 200 мл воды; 1G - гидрогель в перерасчете на возможность связывания 400 мл воды; 0,5G:1S - гидрогель + белковый стимулятор в перерасчете на возможность связывания 200 мл воды); 1G:2S - гидрогель + белковый стимулятор в перерасчете на возможность связывания 400 мл воды).

Таким образом, экспериментально подтверждена перспективность использования инновационных белковых стимуляторов роста (белковых гидролизатов) для повышения продуктивности и защиты мягкой пшеницы от болезней. Однако их молекулярная масса, а также доля и состав акрилового гидрогеля при совместном применении с ними, определяют не только их свойства, но и влияют на показатели биологической эффективности.

#### 4.4 Органо-минеральные удобрения и микроудобрения.

Применение органо-минеральных удобрений оказывало существенное влияние на продуктивность мягкой пшеницы и фитосанитарное состояние ее посевов. За период 2017-2021 гг. наибольшая продуктивность пшеницы была выявлена в вариантах опыта с использованием: «Зеребра агро» ( $Y_{п} = 2,70 \pm 0,20$  г/растение) и «Фитоп-Флора-С» ( $Y_{п} = 2,74 \pm 0,22$  г/растение), при этом показатель вырос на 109,0% и 112,0% относительно контроля, соответственно. Существенный рост продуктивности пшеницы при  $P < 0,05$  отмечен при применении препарата «ФлорГумат» – на 58,8% ( $Y_{п} = 2,06 \pm 0,17$  г/растение), «Трасе Мiх» – на 44,9% ( $Y_{п} = 1,88 \pm 0,20$  г/растение), «Эдагум» – на 28,3% ( $Y_{п} = 1,66 \pm 0,11$  г/растение). В вариантах опыта «Зеребра агро», «Фитоп-Флора-С» и «ФлорГумат» зарегистрировано существенное снижение интенсивности поражения растений возбудителем мучнистой росы по сравнению с контролем – на 22,7% ( $БЭ_{м} = 62,4\%$ ), 23,3% ( $БЭ_{м} = 64,0\%$ ) и 28,8% ( $БЭ_{м} = 79,2\%$ ). Наибольшее снижение развития корневой гнили пшеницы было отмечено в вариантах опыта с использованием препарата «ФлорГумат»: Ленинградская 6, к-64900 (на

22,2%), Тулайковская 108, к-65452 (на 20%), Trizo, к-64981 (на 33,3%) (Kolesnikov et al., 2021).

Эффективность препаратов «Зеребра агро», «ФлорГумат», «Фитоп-Флора-С» в отношении продуктивности пшеницы в наибольшей степени коррелировала с суммой температур в июне, июле, а также зависела от солнечной активности в июле, характеризуемой числом пятен на Солнце, числом Вольфа, УФ-индексом. Интенсивность поражения пшеницы мучнистой росой в варианте опыта «ФлорГумат» снижалась с ростом числа пятен на Солнце, а увеличение суммы температур в июне обуславливало увеличение площади пятен с налетом возбудителя. В указанном варианте опыта интенсивность поражения пшеницы бурой ржавчиной усиливалась с уменьшением суммы осадков (рис. 4) и относительной влажности в июле и с ростом УФ-индекса в данном месяце.

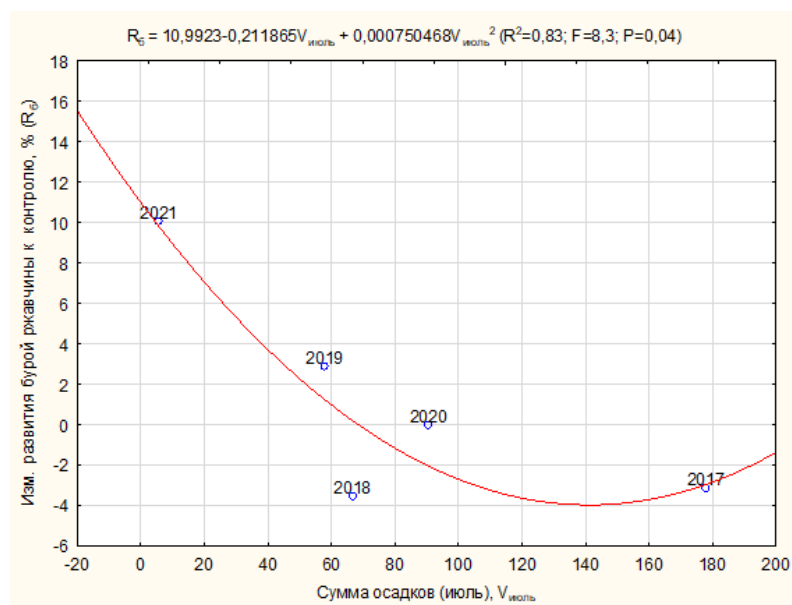


Рисунок 4 – Изменение интенсивности поражения растений бурой ржавчиной при обработке растений препаратом «ФлорГумат» по сравнению с контролем в зависимости от суммы осадков в июле. 2017-2021 гг.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки экологически чистой технологии возделывания пшеницы, обеспечивающей сохранение потенциала плодородия почвы, получение высококачественного зерна и снижение вредности возбудителей болезней. Однако следует учитывать, что эффективность органо-минеральных удобрений и микроудобрений в отношении продуктивности пшеницы зависит от сорта, метеофакторов, солнечной активности и фитосанитарного состояния посевов.

#### **4.5 Сравнительная характеристика эффективности микробиологических препаратов, удобрений, полимерного гидрогеля, регуляторов роста растений, при возделывании пшеницы и её защите от болезней.**

Приведены данные по биологической эффективности при возделывании мягкой пшеницы сорта Ленинградская 6, к-64901 микробиологических препаратов, полифункциональных комплексов и композиций на основе хитозана, 0,1% салицилата хитозана, органо-минеральных удобрений и микропрепаратов, полимерного

гидрогеля, белковых стимуляторов роста R и RM. Наибольшая эффективность по числу достоверных положительных изменений в значениях 21-го показателя продуктивности пшеницы была отмечена в варианте опыта с совместным использованием полимерного гидрогеля и 0,1% салицилата хитозана (вариант «1G+0,1% салицилат хитозана»).

Минимальная интенсивность развития  $R_6$  и число пустул  $N_p$  бурой ржавчины пшеницы были выявлены в варианте опыта, где применяли штамм *Bacillus subtilis* 124-11 ( $R_6=8,90\pm 1,78\%$  и  $N_p = 113,7\pm 43,2$  шт.). Развитие болезни существенно снизилось относительно контроля на 18,6% (БЭ<sub>6</sub>=67,6%), число пустул – на 73,0%. Биологическая эффективность полифункционального комплекса «1G+Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (композиция)» была на 35,5% выше, чем комплекса «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (композиция)». Максимальное снижение интенсивности поражения растений мучнистой росой – на 14,4% (БЭ<sub>м</sub>=89,6%) и числа пятен с налетом – на 81,0%, было выявлено в варианте с использованием 0,1% салицилат хитозана, а максимальное увеличение – в варианте с использованием полимерного гидрогеля 1G – на 71,4% и 197,9%, соответственно.

Существенно снизилось поражение растений мучнистой росой в вариантах опыта: «0,5G:1RM» – на 13,1% (БЭ<sub>м</sub>=81,4%), «Зеребра агро» – на 12,1% (БЭ<sub>м</sub>=75,1%), «Фитоп-Флора-С» – на 10,4% (БЭ<sub>м</sub>=64,8%), «*Bacillus subtilis* 124-11» – на 9,3% (БЭ<sub>м</sub>=58,1%), *Sphingomonas* sp. K1B – на 8,7% (БЭ<sub>м</sub>=54,0%), «1G+ *Pseudomonas fluorescens* SPB2137» – на 8,6% (БЭ<sub>м</sub>=53,4%), «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (глубинное культивирование)» – на 7,8% (БЭ<sub>м</sub>=48,6%), «Витаплан, КЖ» – на 7,6% (БЭ<sub>м</sub>=47,2%). Отмечено, что совместное использование полимерного гидрогеля 1G и штамма *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 повышало биологическую эффективность указанного бактериального штамма на 18,6%.

В вариантах опыта «*Bacillus subtilis* 124-11» развитие корневой гнили снизилось на 24,0% (БЭ<sub>г</sub>=78,3%), «Витаплан, КЖ» – на 23,2% (БЭ<sub>г</sub>=75,5%), «1G:2R» – на 19,5% (БЭ<sub>г</sub>=63,8%), «1G+Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (глубинное культивирование)» – на 19,5% (БЭ<sub>г</sub>=63,8%), «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (глубинное культивирование)» – на 18,4% (БЭ<sub>г</sub>=60,1%), «0,1% салицилат хитозана» - на 17,3% (БЭ<sub>г</sub>=56,5%), «0,5G» – на 14,0% (БЭ<sub>г</sub>=45,6%), «1G:2RM» – на 14,0% (БЭ<sub>г</sub>=45,6%), «1G+Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (композиция)» – на 14,0% (БЭ<sub>г</sub>=45,6%), «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (композиция)» – на 14,0% (БЭ<sub>г</sub>=45,6%); «*Sphingomonas* sp. K1B» – на 12,8% (БЭ<sub>г</sub>=41,7%).

Таким образом, разносторонний анализ средств защиты и регуляции роста растений, проведенный по единой унифицированной методике, позволил выявить из них наиболее эффективные, и после создания препаративных форм и государственной регистрации, рекомендовать их к использованию в практике растениеводства и защиты растений. С целью повышения продуктивности и улучшения фитосанитарного состояния агробиоценов особое внимание следует уделить совместному применению полимерного гидрогеля и 0,1% салицилат хитозана («1G+0,1% салицилат хитозана»).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально оценены элементы стратегии развития защиты растений ФГБНУ ВИЗР (Павлюшин В.А., Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И., Тютюрев С.Л.,

Нефедова Л.И., 2016). Данная стратегия основана на системном подходе к биоценотическому регулированию функционирования агробиоценозов зерновых культур с использованием современных достижений селекции, микробиологической и фитоиммунологической защиты и регуляции роста растений, а также информационных технологий.

Охарактеризована фитосанитарная ситуация с болезнями в агроценозах мягкой пшеницы яровой в условиях Северо-Запада. Отмечено стабильное проявление на посевах мучнистой росы и септориоза во все годы исследований. Для бурой ржавчины наблюдается снижение значимости с 2015 годов. При этом в регионе усиливается представленность пораженности желтой ржавчиной. Стеблевая ржавчина проявлялась в отдельные годы исследований, преимущественно в конце вегетации растений. Для мягкой пшеницы, развивающейся по озимому типу развития, высокую вредоносность в весенний период представляет инфекционное выпревание.

Экспериментально подтверждено существенное влияние возбудителей бурой и желтой ржавчины, мучнистой росы и септориоза на снижение урожайности пшеницы в регионе. В модельных экспериментах, при поражении мучнистой росой свыше 70%, потери урожая составляли 56%, а при комплексной инфекции бурой ржавчины (43%), мучнистой росы (5%), септориоза (12%) – 59%.

На основе анализа эффективности генетической защиты от возбудителей особо опасных болезней и потенциала современных российских и зарубежных сортов и перспективного селекционного материала мягкой пшеницы из коллекции ВИР:

- определен низкий потенциал изученного материала яровой пшеницы по устойчивости к *Septoria* sp., *B. graminis* и *P. graminis*, в том числе перспективных и широко возделываемых на Северо-Западе сортов;
- определены взаимосвязи между происхождением мягкой пшеницы и полевой устойчивостью к болезням, что дает возможность осуществлять целенаправленный отбор резистентных форм из выявленных по происхождению групп;
- выделены образцы пшеницы с высоким уровнем полевой устойчивости к бурой, стеблевой и желтой ржавчине, мучнистой росе, септориозу и образцы озимой пшеницы, устойчивые к инфекционному выпреванию, которые могут быть рекомендованы для селекции на устойчивость в условиях Северо-Запада.

Изучение анатомо-морфологических факторов пассивного иммунитета пшеницы на устойчивость к фитопатогенам показало:

- меньшую пораженность флаговых листьев сортов пшеницы бурой и желтой ржавчиной, мучнистой росой при их угле наклона к стеблю в интервале 121-180°. Это может быть связано с большей возможностью сохранения спор на поверхности и в пазухах листьев с небольшим углом наклона, тогда как угол наклона более 120° может способствовать их осыпанию с листа;
- различное влияние плотности опушения листьев на развитие болезней. Выявлено возрастание площади пятен с налетом мучнистой росы с ростом значений плотности и длины волосков опушения, что может быть связано с тем, что в данном случае волоски на поверхности листа способствовали удержанию и, впоследствии, закреплению на нем инфекционного начала – конидий возбудителя, причем при повышенной плотности опушения мог создаваться микроклимат, благоприятный для их прорастания и дальнейшего развития. Максимальное развитие желтой и бурой

ржавчины отмечено на слабо опушённых листьях, минимальное – на сильно опушённых листьях.

Отмечена тенденция усиления поражения пшеницы болезнями с увеличением содержания в растениях тяжелых металлов. При этом у некоторых сортов пшеницы в зернах найдено превышение ПДК по содержанию Fe, Cu, Cr, Cd. В листьях у высокоустойчивых изогенных линий пшеницы, защищенных генами *Lr24*, *Lr28*, *Lr29*, *Lr47*, определено достоверно меньшее, чем у восприимчивых, содержание в листьях тяжелых металлов Ni, Ag, Cr, Fe, Co, Cd, а также K. Сорта и линии мягкой пшеницы без симптомов патогенеза отличались меньшим содержанием в листьях тяжёлых металлов V, Fe, Co, Zn, Pb, Cr, Mn, а также Sb и Al, некоторые из которых относятся к группе особо опасных экотоксикантов. Устойчивые образцы пшеницы отличались большим числом достоверных корреляционных связей между изученными химическими элементами, чем восприимчивые.

Выявлена тенденция снижения интенсивности поражения растений бурой ржавчиной с ростом антиоксидантной активности ее листьев. При увеличении антиоксидантной активности, определенной в зернах разных сортов пшеницы с 9% до 33%, наблюдался, преимущественно, рост продуктивной кустистости растений (с 1 до 1,7 стеблей на растение) и площади флагового листа: с 13,5 см<sup>2</sup> до 14,6 см<sup>2</sup>, что приводило к повышению урожайности с 3,1 т/га до 3,5 т/га.

2. Для совершенствования системы фитосанитарного мониторинга, прогноза интенсивности поражения растений болезнями, контроля динамики их развития разработаны математические модели. Для повышения точности моделей предложена методика многомерного параметрирования патогенеза особо опасных болезней, основанная на использовании как общепринятых фитопатологических показателей (развитие болезни и тип реакции), так и дополнительных (расчетных). Для бурой ржавчины использовали показатели – число пустул, площадь пустулы, число спор в пустуле; для желтой ржавчины – число и длина пустул, суммарное число пустул, площадь пустулы, число спор в пустуле; для стеблевой ржавчины – число пустул на 1 см длины верхнего колосонесущего междоузлия, площадь пустулы; для мучнистой росы – число и площадь пятен с налетом, число конидий с 1 см<sup>2</sup> листа; для септориоза – число и площадь пятен, размерные характеристики пикноспор (конидий): объем, коэффициент вытянутости.

Разработанные статистические и имитационные модели развития особо опасных болезней пшеницы могут быть использованы для определения вероятности возникновения эпифитотий, оценки интенсивности их развития и последствий. Выявление важнейших предикторов развития болезней было основано как на анализе преобладающих тенденций в изменении комплекса фитопатологических показателей сортов и линий пшеницы, варьирование которых было связано с фитометрическими параметрами посевов и метеорологическими факторами, так и на результатах их системного анализа с использованием методов многомерной статистики.

Выявлены метеофакторы, существенно влияющие на сохранение инфекционного начала особо опасных болезней и определяющие, в дальнейшем, фитосанитарное состояние посевов. В частности, с повышением средней температуры в сентябре и уменьшением суммы осадков в октябре и декабре предшествующего года, суммы осадков в апреле, развитие бурой ржавчины и мучнистой росы усиливалось. Сильное поражение пшеницы стеблевой ржавчиной в 2010 г., возможно, было

обусловлено экстремально высокими значениями суммы температур и незначительной суммой осадков в июле, а также связано с резким возрастанием активности Солнца в 2010 г. по сравнению с 2009 г. Интенсивность поражения инфекционным выпреванием большинства изученных образцов пшеницы возрастала с понижением температуры в январе и уменьшением суммы выпавших осадков, а также определялась значениями относительной влажности воздуха.

Непосредственно в период проведения наблюдений (апрель) отмечена сопряженность интенсивности патогенеза инфекционного выпревания с ясной и теплой погодой, без осадков.

3. Модифицированы системы управления продукционным процессом и фитосанитарным состоянием агробиоценозов мягкой пшеницы с использованием новейших достижений агрофизики: полевой спектрометрии, функциональной рентгенографии, газоразрядной визуализации. Основными результатами исследований по этому направлению являются:

- система идентификации биологической полноценности семян пшеницы с использованием неинвазивных инструментальных физических методов и моделирование возможных изменений в фитометрических и фитопатологических характеристиках посевов в зависимости от качества семенного материала. Выявлены тенденции возрастания большинства показателей продуктивности с ростом площади, средней яркости, минимальной яркости, периметра, длины и ширины, размера, фактора круга проекции семян. Рост среднего размера и средней яркости проекции семян приводил к увеличению интенсивности поражения растений бурой ржавчиной, мучнистой росой, септориозом. С увеличением фактора круга проекции семян на большинстве сортов развитие бурой ржавчины снижалось, а мучнистой росы усиливалось;

- система оценки отзывчивости мягкой пшеницы на биологические средства защиты и регуляции роста растений и органоминеральные удобрения, основанная на данных интроскопического анализа зерна вновь собранного урожая. После обработки растений бактериальными штаммами и полифункциональными комплексами на основе 0,1% салицилата хитозана достоверно увеличился средний размер и округлость зерен. Средняя яркость рентген-проекции семян достоверно увеличилась в варианте *B. subtilis* И-5 + 0,1 % салицилат хитозана, и снизилась во варианте «*B. subtilis* ВКМ В-2604D + ВКМ В-2605D» и «Витаплан, СП»;

- система полевой спектрометрии посевов пшеницы, различающихся как по продуктивности, так и по пораженности особо опасными болезнями с использованием коэффициентов отражения, пропускания и поглощения *in situ*, обратного вегетационного индекса F. Выявлена высокая информативность нормализованного вегетационного индекса NDVI для интегральной оценки биологической эффективности полифункциональных биопрепаратов. Созданы «оптические портреты» сортов мягкой пшеницы.

Выявлена тенденция ухудшения состояния посевов пшеницы по основным показателям структуры урожайности, качества зерна (по содержанию азота, фосфора и калия), фитосанитарного состояния (по степени поражения пшеницы возбудителем мучнистой росы) с ростом значений обратного вегетационного индекса F. Сорта пшеницы, отличающиеся наименьшими значениями F, обладали наибольшей антиоксидантной активностью, наилучшей жизнеспособностью и отсутствием



симптомов развития возбудителя бурой ржавчины по сравнению с другими сортами, на которых было зарегистрировано развитие болезни. Минимальное значение стресс-индекса F и максимальная величина NDVI были выявлены в варианте опыта, где растения пшеницы сорта Ленинградская 6 обрабатывали комплексным полифункциональным препаратом Витаплан, КЖ и Хитозан II, использование которого существенно повышало их продуктивность и снижало интенсивность развития особо опасных болезней.

4. Расширены средства биологической защиты и регуляции роста растений и разработаны регламенты их использования для решения важнейших стратегических задач оздоровления фитосанитарного состояния агробиоценозов мягкой пшеницы и повышения их продуктивности, в том числе:

– видов и штаммов ассоциативных ризобактерий: *B. subtilis* В-2604D, *B. subtilis* В-2605D, *B. subtilis* И-5, *Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. К1В, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137 из ВКМ сельскохозяйственного назначения ФГБНУ ВНИИСХМ. Наиболее выраженным защитным действием в отношении комплекса особо опасных болезней обладал штамм *Sphingomonas* sp. К1В. Его биологическая эффективность (БЭ) в отношении корневой гнили составила 58,3%, мучнистой росы – 70,0%, бурой ржавчины – 50,6%, септориоза – 68,4%, желтой ржавчины – 35,9% (сорт Тризо, 2017-2022 г.). Значительным ростостимулирующим действием на растения обладали штаммы *B. subtilis* 124-11 и *Ps. fluorescens* SPB213;

– полифункциональных комплексов на основе сочетания индукторов устойчивости растений к болезням – хитина, хитозана и 0,1% салицилата хитозана с бактериальными штаммами *B. subtilis* В-2604D, *B. subtilis* В-2605D, *B. subtilis* И-5, а также комплексов хитозана с биологически активными веществами, полученных в лаборатории микробиологической защиты растений ФГБНУ ВИЗР. Наибольшая биологическая эффективность отмечена при использовании «0,1% салицилата хитозана» (мучнистая роса пшеницы, БЭ<sub>м</sub>=95,0%), полифункциональных комплексов «Витаплан, КЖ + 0,1% Хитозан» (бурая ржавчина пшеницы, БЭ<sub>б</sub>=70,2%), «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (композиция)» (желтая ржавчина пшеницы, БЭ<sub>ж</sub>=80,7%), «Витаплан, КЖ + коллоидный хитин (0,1%) + 0,1% Хитозан» и «0,1% салицилат хитозана» (септориоз, БЭ<sub>сп</sub>=100%), биопрепарата «Гамаир, СП» (корневая гниль пшеницы, БЭ<sub>г</sub>=77,8%). Наилучшими ростостимулирующими и защитными свойствами обладал полифункциональный комплекс «Витаплан, КЖ + 0,1% салицилат хитозана (глубинное культивирование)»;

– влагопоглощающей полимерной гидрогелевой композиции на основе акрилата калия, инновационных белковых гидролизатов, в том числе: в вариантах совместного применения, разработанных в университете ИТМО. Использование аминокислотных белковых гидролизатов различного состава и молекулярной массы, в том числе с акриловым гидрогелем, способствует повышению урожайности пшеницы за счет разных показателей. При использовании белкового гидролизата, полученного из побочного сырья первичной переработки сельскохозяйственных животных, молекулярно-массовое распределение которого было представлено аминокислотами с преобладанием глицина и пептидов молекулярной массой от 200 до 1000 Да, продуктивность возрастала за счет ростостимулирующего действия на морфометрические показатели продуктивности пшеницы, а при использовании белкового гидролизата с молекулярной массой 700000 Да – за счет снижения

пораженности растений особо опасными болезнями: корневой гнилью (0,5G:1RM – БЭг=83,3%), мучнистой росой (0,5G:1RM – БЭг=81,5%), желтой ржавчиной (1G:2RM – БЭж=68,5%).

При анализе эффективности применения органо-минеральных удобрений и микроудобрений было установлено, что наряду с ростостимулирующим действием на растения, наибольшим защитным эффектом, в том числе в отношении развития мучнистой росы, обладали «ФлорГумат» (БЭ<sub>м</sub>=79,2%), «Фитоп-Флора-С» (БЭ<sub>м</sub>=64,0%) и «Зеребра агро» (БЭ<sub>м</sub>=62,4%).

5. Построены математические модели, позволяющие в зависимости от агроэкологических условий возделывания пшеницы оценить возможность изменений в защитном и ростостимулирующем действии микробиологических препаратов («Витаплан, КЖ», «Витаплан, СП»), штаммов ассоциативных ризобактерий (*B. subtilis* В-2604D и *B. subtilis* В-2605D, *Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. К1В, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137), органо-минеральных удобрений и микроудобрений («Зеребра агро», «ФлорГумат», «Фитоп-Флора-С»).

Согласно построенным математическим моделям, было установлено, что эффективность штаммов бактерий *B. subtilis* ВКМ В-2604D и *B. subtilis* ВКМ В-2605D (ФГБНУ ВИЗР) в отношении продуктивности и развития особо опасных болезней пшеницы в большей степени зависела от показателей влагообеспеченности вегетационного периода, в том числе суммы осадков в июне, ГТК в июле.

Эффективность бактериальных штаммов (*Bacillus subtilis* 124-11, *Sphingomonas* sp. К1В, *Pseudomonas fluorescens* SPB2137), полученных из ВНИИСХМ также определялась метеоусловиями периодов вегетации пшеницы. Возрастание суммы осадков в мае обуславливало существенное снижение величины относительного изменения потенциальной урожайности пшеницы с единицы площади (т/га) к контролю при применении на сорте Сударыня штаммов *Bacillus subtilis* 124-11:  $r=-0,98$  и *Pseudomonas fluorescens* SPB2137:  $r=-0,97$ . В основном данная тенденция была вызвана снижением массы 1000 зерен с возрастанием данного метеопказателя в указанных вариантах опыта ( $r=-0,97$  и  $r=-0,95$ , соответственно).

Выявлены прямые корреляционные связи между относительным изменением развития бурой ржавчины к контролю при применении бактериальных штаммов и суммой температур в мае, июле; числом пятен на Солнце и числом Вольфа в июле; годовым числом пятен на Солнце.

Величина относительного изменения развития желтой ржавчины при применении бактериальных штаммов по сравнению с контролем увеличивалась с ростом суммы температур и относительной влажности воздуха в мае; суммы осадков и относительной влажности воздуха в июне; суммы температур и суммы осадков, ГТК, числа Вольфа в июле.

Пораженность мучнистой росой сортов пшеницы усиливалась по сравнению с контролем при применении бактериальных штаммов с уменьшением суммы температур и суммы осадков в мае; суммы температуры в июне и июле, числа пятен на Солнце и числа Вольфа в июле, годового числа пятен на Солнце.

Усилению развития корневой гнили в вариантах опыта с применением бактериальных штаммов способствовало возрастание суммы температур в мае, июне и июле, а также рост числа пятен на Солнце и индекса Вольфа в июле.

Пораженность сортов пшеницы септориозом снижалась при применении бактериальных штаммов с увеличением относительной влажности воздуха в мае; суммы осадков и относительной влажности воздуха в июне и июле; ГТК июля и августа; суммы температур, суммы осадков и относительной влажности воздуха, числа пятен на Солнце, годового числа пятен на Солнце.

Метеорологические факторы также оказывали влияние на эффективность микроудобрений и органо-минеральных удобрений (2017-2021 гг.). В частности, с повышением суммы температур в июле эффективность препарата «Зеребра агро» в отношении бурой ржавчины пшеницы снижалась (по числу пустул –  $r=0,88$  и площади пустулы –  $r=0,94$ ), а желтой ржавчины по развитию болезни возрастала ( $r=-0,95$ ). Кроме того, снижение относительной влажности в июне обуславливало рост степени поражения растений септориозом в варианте «Зеребра агро» ( $r=-0,96$ ).

### ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При разработке селекционно-иммунологических схем защиты зерновых культур от болезней в качестве перспективных доноров устойчивости можно рекомендовать сорта и линии мягкой пшеницы, резистентные к особо опасным болезням: *стеблевой ржавчине*: Сајете, к-47108 (Мексика); *бурой ржавчине*: Памяти Леонтьева, к-65245 (РФ, Омская обл.); Памяти Майстренко, к-65448 (РФ, Омская обл.); Волхитка, к-65145; интрогрессивная линия ИТ-6, к-50852 (РФ, Ленинградская обл., LrTt1 и LrTt2), созданная в ВИР Н.А. Скурыгиной (1984) с привлечением вида *T. timopheevii*; Nainari S 60, к-45795 (Мексика, Lr1,Lr3,Lr13, Lr23, Lr10, Lr34, Yr18,YrA); Vasanora 88, к-64402 (Мексика, Lr26,Lr34, Yr7,Yr9,Yr18, Sr31); *желтой ржавчине*: Кубанка 2447, к-30734 (РФ, Чувашия); Самгау, к-65823 (Казахстан); *мучнистой росе*: пшенично-пырейная линия Пысар 29, к-54516 (РФ, Саратовская обл.); Novodvorska Niva, к-38731 (Чехословакия); *инфекционному выпреванию*: Бугда, к-34174 (Азербайджан); Северодонская 12, к-61971 (РФ, Ростовская обл.).

2. При управлении фитосанитарным состоянием агроценозов пшеницы посредством использования в защите растений признака вертикальной (специфической) устойчивости растений рекомендуется использовать генетические формы пшеницы – носители эффективных генов устойчивости Yr5, Yr7, Yr10, Yr15, Yr18, Yr24, Yr26, Yr27, Yr32 (к желтой ржавчине) и Lr19, Lr24, Lr29, Lr45 (к бурой ржавчине). При высоком содержании тяжелых металлов в почве и вероятности сильного поражения растений бурой ржавчиной, можно рекомендовать образцы, сочетающие несколько эффективных Lr-генов устойчивости со слабоэффективным геном Lr34. Данный ген устойчивости кодирует в линии Thatcher белок, аналогичный ABC-транспортерам, которые участвуют в детоксикации, что способствует снижению коэффициента биологического накопления ряда токсичных элементов.

3. Подразделениям сигнализации и прогноза, занимающимся фитосанитарной диагностикой и экспертизой посевов зерновых культур, при построении системы многолетнего прогноза развития болезней, не рекомендовано ограничиваться данными учета болезней, полученными на единичных сортах с использованием только общепринятого показателя – условного развития болезни. Для повышения точности прогнозирования возможных рисков развития эпифитотий следует использовать многомерные модели патогенеза, основанные на применении комплекса общепринятых и расчетных фитопатологических и фитометрических показателей

агробиоценоза, а также руководствоваться данными о доминирующих тенденциях метеообусловленности указанных показателей на большой выборке сортов.

4. При возделывании мягкой пшеницы в агроэкологических условиях Северо-Запада Российской Федерации следует учитывать, что наиболее чувствительным к совокупному действию комплекса метеорологических факторов является показатель «высота растений». С повышением среднемесячной температуры в мае может наблюдаться тенденция усиления поражения растений возбудителем бурой ржавчины в июле-августе. При этом развитие желтой ржавчины и мучнистой росы в указанные месяцы с повышением среднемесячной температуры в мае, напротив, может снижаться.

5. Данные по биологической эффективности бактериальных штаммов и лабораторных образцов, приведенных в работе, обладающих защитным и ростостимулирующим действием на мягкую пшеницу, могут быть использованы при создании препаративных форм биопрепаратов, в том числе жидких культур, суспензионных концентратов, и их государственной регистрации.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

В диссертационной работе представлено восемь приложений, где приведены: методологическая схема исследований (приложение 1); экспериментальные данные по устойчивости мягкой пшеницы к возбудителям особо опасных болезней листьев (приложение 2); результаты моделирования влияния природно-климатических факторов на развитие бурой и желтой ржавчины, мучнистой росы, септориоза (приложение 3), результаты анализа влияния погодных условий на развитие инфекционного выпревания на мягкой пшенице озимой (приложение 4); анализ влияния структурно-функциональных характеристик посевного материала на продуктивность мягкой пшеницы и устойчивость к листовым болезням (приложение 5); материалы по эффективности применения микробиологических препаратов, композиций на основе хитозана, полифункциональных комплексов, 0,1% салицилата хитозана (приложение 6) и ассоциативных ризобактерий в отношении продуктивности, структуры урожайности и фитопатологических показателей мягкой пшеницы (приложение 7), а также акты внедрения и результаты апробации работы (приложение 8).

### Список основных публикаций по теме диссертации

#### *Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и международных реферативных баз данных*

1. Novikova, I.I. The Biological Efficiencies of Multifunctional Complexes Based on Bacillus subtilis Strains and Chitosan Salicylate in Wheat Cultivation/ I.I. Novikova, **L.E. Kolesnikov**, E.V. Popova, B.A. Hassan, N.S. Priyatkin, D.Yu. Radishevskiy, I.L. Krasnobaeva, L.A. Higerovich, Yu. R. Kolesnikova // Applied Biochemistry and Microbiology. – 2024. – Vol. 60. – No 2. – P. 251-263. – DOI: 10.1134/S0003683824020133
2. **Колесников, Л.Е.** Использование ассоциативных ризобактерий для оптимизации фитосанитарного состояния посевов зерновых культур/ **Л.Е. Колесников**, А.А. Белимов, Б.А. Хасан, Ю.Р. Колесникова, М.В. Киселев, Д.С. Минаков // Российская сельскохозяйственная наука. – 2023. – № 1. – С. 40-47. – DOI: 10.31857/S2500262723010088

- Kolesnikov, L.E.** The optimization of grain crops' phytosanitary condition with associative rhizobacteria application / **L.E. Kolesnikov**, A.A. Belimov, B.A. Hassan, Yu.R. Kolesnikova, M.V. Kiselev, D.S. Minakov // Russian Agricultural Sciences. – 2023. – Vol. 49. – No 2. – P. 164-171. – DOI: 10.3103/s1068367423020088
3. **Колесников, Л.Е.** Моделирование эффективности штаммов *Bacillus subtilis* в зависимости от природно-климатических факторов при возделывании мягкой пшеницы / **Л.Е. Колесников**, И.И. Новикова, В.А. Павлюшин, Е.В. Зуев, Ю.Р. Колесникова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2023. – № 4. – С. 29-37. – DOI: 10.31857/S2500262723040063  
**Kolesnikov, L.E.** Modeling the effectiveness of *Bacillus subtilis* strains depending on natural and climatic factors in soft wheat cultivation / **L.E. Kolesnikov**, I.I. Novikova, V.A. Pavlyushin, E.V. Zuev, Yu.R. Kolesnikova // Russian Agricultural Sciences. – 2023. – Vol. 49. – No 5. – P. 488-500. – DOI: 10.3103/s1068367423050087
  4. Новикова, И.И. Устойчивость к болезням, продуктивность и содержание фотосинтетических пигментов в листьях яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) под влиянием полифункциональных биопрепаратов и комплексов на основе микроорганизмов и хитозана / И.И. Новикова, Э.В. Попова, **Л.Е. Колесников**, Ю.Р. Колесникова, С.С. Чекурова // Сельскохозяйственная биология. – 2023. – Т. 58. – № 1. – С. 158-183. – DOI: 10.15389/agrobiology.2023.1.158rus
  5. **Колесников, Л.Е.** Агрэкологическое варьирование продуктивности и поражаемости пшеницы болезнями: элементы и моделирование / **Л.Е. Колесников**, В.А. Павлюшин, М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Ю.Р. Колесникова // Агрофизика. – 2022. – № 3. – С. 40-52. – DOI: 10.25695/AGRPH.2022.03.06
  6. **Колесников, Л.Е.** Применение хитозана в защите пшеницы от болезней и повышении урожайности / **Л.Е. Колесников**, Э.В. Попова, И.И. Новикова, Ю.Р. Колесникова, Е.Д. Балагурова // Прикладная биохимия и микробиология. – 2022. – Т. 58. – № 3. – С. 294-301. – DOI: 10.31857/S0555109922030072  
**Kolesnikov, L.E.** Application of chitosan to protect wheat from diseases and boost yields / **L.E. Kolesnikov**, E.D. Balagurova, E.V. Popova, I.I. Novikova, Y.R. Kolesnikova // Applied Biochemistry and Microbiology. – 2022. – Vol. 58. – No 3. – P. 329-335.
  7. **Колесников, Л.Е.** Фенотипическое проявление устойчивости пшеницы к бурой ржавчине: элементы и моделирование / **Л.Е. Колесников**, Е.К. Колесников, В.А. Павлюшин, С.В. Чернов, Ю.Р. Колесникова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2022. – № 1. – С. 38-46. – DOI: 10.31857/S2500262722010070  
**Kolesnikov, L.E.** Phenotypic expression of brown rust resistance in wheat: element modeling / **L.E. Kolesnikov**, E.K. Kolesnikov, V.A. Pavlyushin, S.V. Chernov, Yu.R. Kolesnikova // Russian Agricultural Sciences. – 2022. – Vol. 48. – No 2. – P. 103-114. – DOI: 10.3103/S1068367422020082
  8. **Колесников, Л.Е.** Повышение урожайности зерновых культур и снижение вредоносности возбудителей болезней при использовании акрилового гидрогеля и белкового стимулятора роста / **Л.Е. Колесников**, М.В. Успенская, М.И. Кременевская, А.Г. Орлова, Е.В. Зуев, Ю.Р. Колесникова // Российская сельскохозяйственная наука. – 2021. – № 3. – С. 33-40. – DOI: 10.31857/S2500262721030078  
**Kolesnikov, L.E.** Increase in the yield of cereals and decrease in the harmfulness of pathogens when using acrylic hydrogel and protein growth stimulant / **L.E. Kolesnikov**, M.V. Uspenskaya, M.I. Kremenevskaya, A.G. Orlova, E.V. Zuev, Yu.R. Kolesnikova // Russian Agricultural Sciences. – 2021. – Vol. 47. – No 4. – P. 377-385. – DOI: 10.3103/S1068367421040091
  9. **Kolesnikov, L.E.** Biological rationale for the use of polyfunctional biological products based on antagonist microbes and chitosan in wheat cultivation / **L.E. Kolesnikov**, D.Yu. Radishevsky, I.I. Novikova, E.V. Popova, Yu.R. Kolesnikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "Innovative Technologies in Agroindustrial, Forestry and Chemical Complexes and Environmental Management, ITAFCCSEM 2021" 2021. – Vol. 852. – No 1 – P. 012048. – DOI: 10.1088/1755-1315/852/1/012048

10. **Kolesnikov, L.E.** Identification of the effectiveness of associative rhizobacteria in spring wheat cultivation / **L.E. Kolesnikov**, A.A. Belimov, E.Y. Kudryavtseva, Y.R. Kolesnikova, B.A. Hassan // *Agronomy Research*. – 2021. – Vol. 19. – No 3. – P. 1530-1544. – DOI: 10.15159/AR.21.145
11. **Kolesnikov, L.E.** Influence of the structural and functional characteristics of the seeding material on the yield structure elements and resistance to leaf diseases of spring soft wheat / **L.E. Kolesnikov**, I.E. Razumova, D.Y. Radishevskiy, N.S. Priyatkin, M.V. Arkhipov, Y.R. Kolesnikova // *Agronomy Research*. – 2021. – Vol. 19. – No 4. – P. 1791-1812. – DOI: 10.15159/AR.21.152
12. **Kolesnikov, L.E.** The biological basis for the use of acrylic hydrogel and protein growth stimulant in the soft wheat and triticale cultivation / **L.E. Kolesnikov**, A.G. Orlova, I.E. Razumova, M.V. Uspenskaya, M.I. Kremenevskaya, Y.R. Kolesnikova // *Agronomy Research*. – 2021. – Vol. 19. – No 3. – P. 1545-1561. – DOI: 10.15159/AR.21.157
13. **Kolesnikov, L.E.** The influence of agroecological factors on diseases development and wheat productivity / **L.E. Kolesnikov**, M.I. Kremenevskaya, S.P. Melnikov, E.V. Tambulatova, B.A. Hassan, Y.R. Kolesnikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. "3rd International Scientific Conference on Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources". – 2021. – Vol. 66. – No 1. – С. 012011. – DOI: 10.1088/1755-1315/866/1/012011
14. **Колесников, Л.Е.** Биологическое обоснование использования белкового стимулятора роста для повышения урожайности пшеницы и оценка качества зерна методами микрофокусной рентгенографии и оптического анализа / **Л.Е. Колесников**, И.И. Кременевская, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, М.В. Киселёв, Ю.Р. Колесникова, И.Е. Разумова // *Российская сельскохозяйственная наука*. – 2020. – № 3. – С. 21-27. – DOI: 10.31857/S2500262720030060  
**Kolesnikov, L.E.** The biological basis for the protein growth stimulant application for increasing the wheat yield and the assessment of grain quality by the microfocus x-ray and optical imaging techniques/ **L.E. Kolesnikov**, I.I. Kremenevskaya, N.S. Priyatkin, M.V. Arkhipov, M.V. Kiselev, Yu.R. Kolesnikova, I.E. Razumova // *Russian Agricultural Sciences*. – 2020. – Vol. 46. – No 4. – P. 347–353. – DOI: 10.31857/S2500262720030060
15. **Колесников, Л.Е.** Влияние метеорологических факторов и солнечной активности на развитие возбудителей болезней мягкой пшеницы/ **Л.Е. Колесников**, Ю.Р. Колесникова, А.А. Кеслина // *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. – 2020. – № 61. – С. 49-59. – DOI: 10.24411/2078-1318-2020-14049
16. **Kolesnikov, L.E.** The biological basis for the use of protein growth stimulant made from cattle split for wheat foliar feeding and disease suppression / **L.E. Kolesnikov**, M.I. Kremenevskaya, I.E. Razumova, Y.R. Kolesnikova, E.V. Tambulatova, E.O. Yazeva // *Agronomy Research*. – 2020. – Vol. 18. – No 2. – С. 1336-1349. DOI: 10.15159/AR.20.082
17. **Kolesnikov, L.E.** The effectiveness of biopreparations in soft wheat cultivation and the quality assessment of the grain by the digital x-ray imaging/ **L.E. Kolesnikov**, M.D. Solodyannikov, I.I. Novikova, E.V. Popova, N.S. Priyatkin, E.V. Zuev, Y.R. Kolesnikova // *Agronomy Research*. – 2020. – Vol. 18. – No 4. – P. 2436-2448. – DOI: 10.15159/AR.20.206
18. Novikova, E.V. Biological effectiveness of polyfunctional biopreparations in soft wheat cultivation and assessment of crop quality based on NDVI index/ I.I. Novikova, E.V. Popova, **L.E. Kolesnikov**, N.S. Priyatkin, Y.R. Kolesnikova // *BIO Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 18. – No 93. – P. 00021. – DOI: 10.1051/bioconf/20201800021
19. **Колесников, Л.Е.** Биологическое обоснование применения микроудобрений и органоминеральных препаратов для внекорневой подкормки пшеницы / **Л.Е. Колесников**, С.П. Мельников, М.В. Киселёв, Е.В. Зуев, Т.А. Васильева // *Российская сельскохозяйственная наука*. – 2019. – № 1. – С. 12-15. – DOI: 10.31857/S2500-26272019112-15  
**Kolesnikov, L.E.** Biological substantiation of application of microfertilizers and organomineral preparations for the foliar treatment of wheat / **L.E. Kolesnikov**, S.P. Melnikov, M.V. Kiselev, E.V. Zuev, T.A. Vasileva // *Russian Agricultural Sciences*. – 2019. – Vol. 45. – No 2. – С. 115-118.
20. **Колесников, Л.Е.** Биологическая эффективность штаммов ассоциативных ризобактерий в посевах мягкой пшеницы / **Л.Е. Колесников**, А.А. Белимов, П.М. Донес // *Известия Санкт-*

- Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 54. – С. 57-64.  
– DOI: 10.24411/2078-1318-2019-11057
21. **Колесников, Л.Е.** Выявление основных факторов, влияющих на структуру урожайности пшеницы и ее изменчивость в условиях Ленинградской области /**Л.Е. Колесников, С.С. Чекурова, Ю.Р. Колесникова** //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 55. – С. 22-28. – DOI: 10.24 411/2078-1318-2019-12022
  22. **Колесников, Л.Е.** Совместное использование штаммов микроорганизмов и хитозановых комплексов для повышения урожайности пшеницы (*Triticum aestivum* L.)/ **Л.Е. Колесников, Э.В. Попова, И.И. Новикова, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, Ю.Р. Колесникова, Н.Н. Потрахов, В. Van Duijn, А.С. Гусаренко** // Сельскохозяйственная биология. – 2019. – Т. 54. – № 5. – С. 1024-1040. – DOI: 10.15389/agrobiology.2019.5.1024rus
  23. **Белимов, А.А.** Повышение урожайности яровой мягкой пшеницы и снижение вредоносности возбудителей болезней с помощью ассоциативных ризобактерий/ **А.А. Белимов, Л.Е. Колесников, П.М. Донес** //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 52. – С. 26-33.
  24. **Колесников, Л.Е.** Влияние препаратов на основе гуминовых веществ и серебра на элементы продуктивности мягкой пшеницы/ **Л.Е. Колесников, С.П. Мельников, Т.А. Васильева** //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 51. – С. 75-84.
  25. **Колесников, Л.Е.** Масс-спектральный анализ содержания некоторых химических элементов во флаговых листьях у изогенных линий пшеницы (*Triticum aestivum* L.) с различной устойчивостью к бурой ржавчине / **Л.Е. Колесников, О.И. Бурова, Ю.Р. Колесникова, А.В. Лаврищев, М.Н. Павлова** //Сельскохозяйственная биология. – 2018. – Т. 53. – № 1. – С. 72-84. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.1.72rus
  26. **Колесников, Л.Е.** Оценка эффективности совместного применения хитозана и микробов-антагонистов в защите яровой мягкой пшеницы от болезней с использованием спектрометрического анализа/ **Л.Е. Колесников, И.И. Новикова, В.Г. Сурин, Э.В. Попова, Н.С. Прияткин, Ю.Р. Колесникова** //Прикладная биохимия и микробиология. – 2018. – Т. 54. – № 5. – С. 546-552. – DOI: 10.1134/S0555109918050082  
**Kolesnikov, L.E.** Estimation of the efficiency of the combined application of chitosan and microbial antagonists for the protection of spring soft wheat from diseases by spectrometric analysis/ **L.E. Kolesnikov, I.I. Novikova, E.V. Popova, V.G. Surin, N.S. Priyatkin, Y.R. Kolesnikova** //Applied Biochemistry and Microbiology. – 2018. – Vol. 54. – No 5. – P. 540-546. – DOI: 10.1134/S0003683818050083
  27. **Кременевская, М.И.** Влияние белкового стимулятора из спилка крупного рогатого скота на элементы продуктивности пшеницы и интенсивность развития болезней /**М.И. Кременевская, Л.Е. Колесников, И.Е. Разумова** //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 53. – С. 80-87. – DOI: 10.24411/2078-1318-2018-14080
  28. **Колесников, Л.Е.** Биологическое обоснование совместного использования микробов-антагонистов и хитозановых комплексов в защите яровой мягкой пшеницы от корневой гнили и листовых пятнистостей/ **Л.Е. Колесников, И.И. Новикова, Э.В. Попова, Н.С. Прияткин, Ю.Р. Колесникова** //Вестник защиты растений. – 2017. – № 2 (92). – С. 28-35.
  29. **Колесников, Л.Е.** Использование информационных технологий в анализе фитосанитарного состояния агроценозов/ **Л.Е. Колесников**// Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 49. – С. 56-63.
  30. **Попова, Э.В.** Биологическая активность хитозана с разной молекулярной массой/ **Э.В. Попова, Н.М. Коваленко, С.Л. Тютерев, Н.С. Домнина, Л.Е. Колесников, Е.А. Борисова** // Вестник защиты растений. – 2017. – № 3 (93). – С. 28-33.
  31. **Архипов, М.В.** Прогнозирование урожайности и устойчивости к болезням мягкой пшеницы с использованием методов интроскопического анализа зерна / **М.В. Архипов, Н.С. Прияткин,**

- Л.Е. Колесников** //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2016. – № 44. – С. 21-27.
32. Мельников, С.П. Влияние препаратов на основе гуминовых веществ и серебра на элементы структуры урожайности и устойчивость яровой мягкой пшеницы к болезням/ С.П. Мельников, **Л.Е. Колесников**, А.Н. Базыкина //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2016. – № 43. – С. 67-75.
33. **Колесников, Л.Е.** Определение устойчивости яровой мягкой пшеницы к возбудителю мучнистой росы спектрометрическим методом/ **Л.Е. Колесников**, В.Г. Сурин, Ю.Р. Колесникова //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 38. – С. 33-39.
34. **Колесников, Л.Е.** Применение спектрометрического анализа при оценке адаптивного потенциала мягкой пшеницы к условиям северо-западного региона РФ/ **Л.Е. Колесников**, В.Г. Сурин, М.В. Киселев, Ю.Р. Колесникова //Вестник Санкт-Петербургского университета. – Серия 3. – Биология. – 2015. – № 2. – С. 78-89.
35. **Колесников, Л.Е.** Биохимический состав зерна у устойчивых и восприимчивых к бурой ржавчине сортов яровой мягкой пшеницы / **Л.Е. Колесников**, М.Н. Павлова, Ю.Р. Колесникова //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 36. – С. 46-49.
36. **Колесников, Л.Е.** Биохимический состав листьев устойчивых и восприимчивых к бурой ржавчине сортов яровой мягкой пшеницы/ **Л.Е. Колесников**, О.Н. Танюхина, О.И. Бутова //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 37. – С. 48-52.
37. **Колесников, Л.Е.** Агробиологические особенности устойчивости пшеницы к возбудителю бурой ржавчины в условиях Северо-Западного региона РФ/ **Л.Е. Колесников**, Е.В. Зуев, Ю.Р. Колесникова //Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – № 5. – С. 23-27.
- Kolesnikov, L.E.** Agrobiological characteristics of leaf rust resistance in wheat under conditions of the orthwestern region of the russian federation/ **L.E. Kolesnikov**, E.V. Zuev, Yu.R. Kolesnikova // Russian Agricultural Sciences. – 2011. – Vol. 37. – No 5. – P. 395-399.
38. **Колесников, Л.Е.** Мониторинг развития септориоза на мягкой пшенице различного происхождения/ Л.Е. Колесников, Э.А. Власова, Ю.Р. Колесникова //Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2010. – № 1. – С. 16-18.
- Kolesnikov, L.E.** Monitoring the Development of Leaf Blotch on Soft Wheat of Various Provenance/ **L.E. Kolesnikov**, E.A. Vlasova, Yu. R. Kolesnikova// Russian Agricultural Sciences. 2010. – Vol. 36. – No 1. – P. 18–21.
39. **Колесников, Л.Е.** Устойчивость изогенных линий Thatcher с Lr-генами к возбудителю бурой ржавчины пшеницы в условиях Северо-Запада России / **Л.Е. Колесников**, Э.А. Власова, Ю.Р. Колесникова //Сельскохозяйственная биология. – 2010. – Т. 45. – № 3. – С. 82-87
40. **Колесников, Л.Е.** Устойчивость яровой мягкой пшеницы к возбудителю стеблевой ржавчины/ **Л.Е. Колесников**, Е.В. Зуев, Ю.Р. Колесникова // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2013. – № 32. – С. 39-44.
41. Зуев, Е.В. Анализ коллекции яровой мягкой пшеницы по селекционно-ценным признакам и устойчивости к болезням в условиях Северо-Запада РФ/ Е.В. Зуев, **Л.Е. Колесников**, Ю.Р. Колесникова //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 28. – С. 37-42.
42. **Колесников, Л.Е.** Влияние возбудителей болезней листьев на урожайность и экономическую эффективность возделывания яровой пшеницы/ **Л.Е. Колесников**, М.Н. Павлова, К.В. Рыхлова //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 29. – С. 19-23.
43. Колесникова, Ю.Р. Продуктивность яровой мягкой пшеницы и ее ограничение возбудителями болезней листьев/ Ю.Р. Колесникова, **Л.Е. Колесников** //Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 27. – С. 60-67.



44. **Колесников, Л.Е.** Анализ и прогноз развития инфекционного выпревания на сортах и линиях мягкой пшеницы в Северо-Западном регионе РФ / **Л.Е. Колесников, Ю.Р. Колесникова** // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2010. – № 19. – С. 47-54.
45. **Колесников, Л.Е.** Влияние природно-климатических факторов на динамику патогенеза возбудителей болезней пшеницы/ **Л.Е. Колесников, Э.А. Власова, Ю.Р. Колесникова** // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2009. – № 2. – С. 19-22.  
**Kolesnikov L.E.** Effect of natural climatic factors on the dynamics of pathogenesis of wheat disease pathogens/ **L.E. Kolesnikov, E.A. Vlasova, Yu.R. Kolesnikova** // Russian Agricultural Sciences. – 2009. – Vol. 35. – No 2. – P. 90-93.
46. **Колесников, Л.Е.** Динамика развития возбудителя бурой ржавчины на сортах мягкой пшеницы с идентифицированными Lr-генами/ **Л.Е. Колесников, Э.А. Власова, Ю.Р. Колесникова** // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2009. – № 13. – С. 30-33.
47. **Колесников, Л.Е.** Многомерный анализ патогенеза видов ржавчины, септориоза, мучнистой росы на мягкой пшенице различного географического происхождения / **Л.Е. Колесников, Ю.Р. Колесникова** // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2009. – № 14. – С. 59-63.
48. **Колесников, Л.Е.** Развитие септориоза на коллекционных образцах мягкой пшеницы/ **Л.Е. Колесников, Э.А. Власова, А.А. Виноградов** // Сельскохозяйственная биология. – 2009. – Т. 44. – № 5. – С. 90-93.
49. **Колесников, Л.Е.** Имитационное моделирование уредостадии возбудителя бурой ржавчины пшеницы / **Л.Е. Колесников, Е.К. Колесников, Э.А. Власова, Ю.Р. Колесникова** // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – № 10. – С. 47-50.
50. **Колесников, Л.Е.** Мониторинг развития возбудителя бурой ржавчины на образцах мягкой пшеницы/ **Л.Е. Колесников, Э.А. Власова, Ю.Р. Саблина** // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2008. – № 4. – С. 18-21.  
**Kolesnikov, L.E.** Monitoring the Development of Leaf Rust Pathogen on Common Wheat Specimens/ **L.E. Kolesnikov, E.A. Vlasova, Yu. R. Sablina** // Russian Agricultural Sciences. – 2008. – Vol. 34. – No 4. – P. 230–233
51. **Колесников, Л.Е.** Фитопатологические аспекты развития основных возбудителей болезней пшеницы / **Л.Е. Колесников, Э.А. Власова, Ю.Р. Колесникова** // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2008. – № 8. – С. 25-28.
52. **Власова, Э.А.** Сопоставление параметров патогенеза возбудителей желтой и бурой ржавчины пшеницы с помощью теоретических и визуально-лабораторных методов/ **Э.А. Власова, Л.Е. Колесников, Ю.Р. Саблина** // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2007. – № 4. – С. 22-29.
53. **Колесников, Л.Е.** Развитие возбудителя бурой ржавчины на образцах мягкой пшеницы из коллекции ВНИИР им. Н.И. Вавилова/ **Л.Е. Колесников, Э.А. Власова** // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2006. – № 3. – С. 90-93.
54. **Колесников, Л.Е.** Динамика развития бурой ржавчины пшеницы на линиях Thatcher / **Л.Е. Колесников, Э.А. Власова** // Микология и фитопатология. – 2003. – Т. 37. – № 1. – С. 87-91.
55. **Власова, Э.А.** Многомерное параметрирование патогенеза бурой ржавчины пшеницы на сортах и линиях Thatcher/ **Э.А. Власова, Л.Е. Колесников** // Микология и фитопатология. – 2002. – Т. 36. – № 6. – С. 86-92.

#### *Основные публикации в других научных изданиях*

1. **Колесников, Л.Е.** Модели управления фитосанитарным состоянием агроценозов пшеницы на Северо-Западе РФ / **Л.Е. Колесников, В.А. Павлюшин, И.И. Новикова, Ю.Р. Колесникова,**

- М.Д. Солодянников// V Всероссийский конгресс по защите растений. Сборник тезисов докладов (Санкт-Петербург, 16-19 апреля, 2024 г.). - СПб.: ФГБНУ ВИЗР. - 2024. - С. 210.
2. **Kolesnikov, L.E.** The effectiveness of the combined use of polymer hydrogel with protein hydrolysates of various composition and molecular weight in relation to wheat productivity and disease susceptibility/ **L.E. Kolesnikov**, M.I. Kremenevskaya, M.V. Uspenskaya, Y.R. Kolesnikova, F. Adkhamov, V.S. Varik // Proceedings of the 2nd International Online Conference on Agriculture, 1-15 November 2023, MDPI. - Basel, Switzerland. - DOI:10.3390/IOACAG2023-17334
  3. **Колесников, Л.Е.** Агроэкологическое варьирование продуктивности и поражаемости пшеницы болезнями: элементы и моделирование/ **Л.Е. Колесников**, Э.В. Попова, И.И. Новикова, Ю.Р. Колесникова, Е.Д. Балагурова //Агрофизика. – 2022. – № 3. – С. 40-52. – DOI: 10.25695/AGRPН.2022.03.06
  4. Долженко, Т.В. Интегрированная защита растений/ Т.В. Долженко, Л.Е. Колесников, А.Г. Семенова, Я.С. Шапиро, Н.В. Лепп, О.В. Сергеева, Е.В. Макаренко. Учебное пособие для вузов. – Санкт-Петербург: Лань. – 2022. – 120 с.
  5. **Колесников, Л.Е.** Совершенствование приемов биологической и фитоиммунологической защиты пшеницы для оптимизации фитосанитарного состояния агроценозов с использованием инструментальных методов агрофизики / **Л.Е. Колесников**, И.И. Новикова, Э.В. Попова, А.А. Белимов, Н.С. Прияткин, Ю.Р. Колесникова // Современные технологии и средства защиты растений - платформа для инновационного освоения в АПК России. Материалы международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 8-12 октября 2018 г.). – 2018. – С. 87-88.
  6. Архипов, М.В. Методика исследования характеристик газоразрядного свечения семян/ М.В. Архипов, Н.С. Прияткин, Л.П. Гусакова, М.В. Борисова, Колесников Л.Е. Методическое пособие. – СПб.: АФИ. – 2016. – 52 с.
  7. **Колесников, Л.Е.** Внутривидовая изменчивость элементного состава яровой мягкой пшеницы и ее связь с урожайностью и повреждением листьев вредителями / **Л.Е. Колесников**, Е.Б. Подгорная, О.Н. Танюхина, О.И. Бурова, Ю.Р. Колесникова //Биосфера. – 2014. – Т. 6. – № 4. – С. 359-364.
  8. **Колесников, Л.Е.** Фитосанитарное состояние посевов мягкой пшеницы в условиях Северо-Запада России / **Л.Е. Колесников**, Е.В. Зуев, Ю.Р. Колесникова, М.И. Павлова, К.В. Рыхлова, С.С. Белов // Фитосанитарная оптимизация агроэкосистем. Материалы III Всероссийского съезда по защите растений (16-20 декабря 2013 г.) – Т. 1 – 2013. – С. 409-411.
  9. **Колесников, Л.Е.** Моделирование развития *Septoria nodorum* Berk на различных по устойчивости образцах пшеницы/ **Л.Е. Колесников**, Э.А. Власова, А.А. Виноградов // Фитосанитарное оздоровление экосистем. Материалы Второго Всероссийского съезда по защите растений (Санкт-Петербург, 05-10 декабря 2005 года). – 2005. – С. 182-184.