

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ БУРОЙ И ЖЕЛТОЙ РЖАВЧИНЫ ПШЕНИЦЫ В
УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Л. Е. Колесников¹, В. А. Павлюшин², М. В. Архипов³, Ю. Р. Колесникова⁴,
М. Д. Солодяников¹, М. В. Шевцов¹

ORCID

Колесников Л. Е. [0000-0003-3765-1192](https://orcid.org/0000-0003-3765-1192)Павлюшин В. А. [0000-0002-4727-8750](https://orcid.org/0000-0002-4727-8750)Архипов М. В. [0000-0002-6903-6971](https://orcid.org/0000-0002-6903-6971)Колесникова Ю. Р. [0000-0002-4002-220X](https://orcid.org/0000-0002-4002-220X)Солодяников М. Д. [0000-0002-1815-0897](https://orcid.org/0000-0002-1815-0897)Шевцов М. В. [0009-0009-4785-9393](https://orcid.org/0009-0009-4785-9393)

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (ФГБОУ ВО СПбГАУ),
Санкт-Петербург, Пушкин,
e-mail: kleon9@yandex.ru;

²Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений (ВИР),
Санкт-Петербург, Пушкин,
e-mail: info@vizr.spb.ru;

³Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук
(СЗЦППО-СПбФИЦ РАН), Санкт-Петербург, Пушкин,
e-mail: maikl.arh1pov@yandex.ru;

⁴ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова (ВИР),
Санкт-Петербург,
e-mail: jusab@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.03.2025, принята в печать 03.09.2025

Определены основные природно-климатические факторы, оказывающие влияние на пораженность мягкой пшеницы возбудителями бурой и желтой ржавчины и разработаны математические модели прогноза их развития. В основе исследования лежало построение факторной модели, отражающей причинно-следственные связи между фитопатологическими, фитометрическими характеристиками пшеницы сортов Сударыня и Тризо и метеорологическими показателями. Методом корреляционно-регрессионного анализа осуществлено моделирование динамики развития видов ржавчины и проанализирована ее метеобусловленность. С целью валидации построенных моделей патогенеза осуществлено их сопоставление с результатами моделирования развития болезней на других сортах пшеницы: Ленинградская 6 и Ленинградка, что позволило более объективно интерпретировать полученные данные. Показано, что пораженность пшеницы бурой ржавчиной возрастала с увеличением: суммы осадков и суммарной температуры в мае (по развитию болезни, площади пустулы, числу пустул на флаговом листе), суммы температур в июле (по числу пустул на флаговом листе), средней температуры в сентябре предшествующего года. Восприимчивость пшеницы к желтой ржавчине, напротив, увеличивалась при росте суммарной температуры в июне и её понижении в июле (по развитию болезни, числу полос с пустулами, общему числу пустул на флаговом листе). Уменьшение солнечной активности, рассчитанной по числу пятен на Солнце и числу Вольфа («цюрихское число») в июле и августе, среднегодовому числу пятен, способствовало увеличению развития на сортах пшеницы Тризо и Сударыня бурой ржавчины и желтой ржавчины. Разработанные модели динамики развития видов ржавчины целесообразно использовать при построении прогноза возникновения эпифитотий, оценки их распространения и возможных последствий. Модели могут применяться в регионах со схожими агроэкологическими характеристиками, а также при возделывании сортов пшеницы со сходной устойчивостью к болезням. При применении моделей в регионах с условиями возделывания, отличающимися от условий Северо-Западного региона РФ, модели требуют обязательной адаптации.

Ключевые слова: метеопатологический прогноз, мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.), продуктивность, *Puccinia triticina*, *Puccinia striiformis*, природно-климатические факторы, моделирование патогенеза.

MODELING DYNAMICS OF WHEAT BROWN AND YELLOW RUST DEVELOPMENT IN THE NORTHWESTERN REGION OF RUSSIAN FEDERATION

L. E. Kolesnikov¹, V. A. Pavlyushin², M. V. Arkhipov³, Yu. R. Kolesnikova⁴,
M. D. Solodyannikov¹, M. V. Shevtsov¹

¹Saint-Petersburg State Agrarian University,

196601, Sankt-Peterburg, Pushkin, e-mail: kleon9@yandex.ru;

²All-Russian institute of plant protection, Saint-Petersburg, Pushkin, e-mail: info@vizr.spb.ru;

³St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,

Saint-Petersburg, Pushkin, e-mail: maikl.arh1pov@yandex.ru;

⁴FRC N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Saint-Petersburg,
e-mail: jusab@yandex.ru

The main environmental and climatic factors contributing to changes in the incidence of brown and yellow rust in soft wheat have been identified, and mathematical models for predicting their development have been developed. The study was based on constructing a factor model that reflects the causal relationships between the susceptibility of Sudarynya and Trizo wheat cultivars to rust species, phytometric characteristics of wheat, and meteorological indicators. The dynamics of the rust species development was modeled, and their dependence of the meteorological parameters was analyzed using correlation-regression analysis. In order to verify the revealed cause-effect relationships between the indicators, the study results were compared with our previously obtained data on other wheat cultivars (Leningradskaya 6, Leningradka). There was an increase in the spread of brown rust (measured by the disease development, the pustules number on the flag leaf, the pustule area) when the sum of temperatures and precipitation in May were growing. Increased pustules number on the flag leaf was also found when the sum of temperatures in July or the average temperature of September of the previous year was increasing. The increase in yellow rust development, the stripes number, the pustules number on the flag leaf was revealed when the sum of temperatures increased in June and decreased in July. The sun activity, calculated using the Wolf number, the sunspot numbers in July and August and the average annual sunspot number, caused an increase in brown and yellow rust incidence of the Trizo and Sudarynya cultivars. The developed models of rust species dynamics are appropriate for predicting the occurrence of epiphytotics, assessing their spread and potential consequences. These models can be applied in regions with similar agroecological characteristics as well as when cultivating wheat cultivars with comparable disease resistance. When using these models in regions where growing conditions differ from those of the Northwestern region of Russia, mandatory adaptation of the models is required.

Keywords: meteopathological forecasting, soft wheat (*Triticum aestivum* L.), wheat productivity, *Puccinia triticina*, *Puccinia striiformis*, environmental and climatic factors, modelling of pathogenesis.

ВВЕДЕНИЕ

Использование интенсивных технологий возделывания зерновых культур исключительно с целью повышения урожайности приводит к значительному ухудшению фитосанитарного состояния посевов, в том числе и на Северо-Западе Российской Федерации (Ивашенко, Павлюшин, 2017; Санин и др., 2020). Негативно сказываются на продуктивности агробиоценозов процессы глобального изменения климата на Земле. В частности, в Северо-Западном регионе России с 2006 по 2015 гг. (в период вегетации пшеницы яровой) выявлена тенденция роста температуры воздуха на 1,6–2,3°C и кроме того прогнозируется ее дальнейшее повышение каждое десятилетие на 3% (Павлова, Карачёнок, 2020).

Возбудители болезней очень чувствительны к изменениям факторов внешней среды, которые могут повысить вероятность появления новых и усиления вредоносности часто встречающихся болезней зерновых культур и в том числе видов ржавчины (Левитин, 2012, 2015; Игнатов и др., 2020). Возбудители бурой ржавчины *Puccinia triticina* Erikss и желтой ржавчины *Puccinia striiformis* West. относят к особо опасным болезням пшеницы (Баранова и др., 2016). Урожай пшеницы может снизиться из-за

поражения бурой ржавчиной в среднем за год на 20–30%, желтой ржавчиной – более чем на 30%, а в годы эпифитотий – более чем на 50%. В последнее десятилетие частота эпифитотийного развития бурой ржавчины существенно снизилась, а желтой ржавчины, наоборот, усилилась, что связано с генетической изменчивостью структуры популяций возбудителей, уровнем устойчивости к ним возделываемых сортов, их сортосменой и т. п. (Гуляева, Шайдаюк, 2020, 2021; Гуляева и др., 2021).

Особенно важен для эффективного проведения защитных мероприятий всесторонний анализ и прогноз развития болезней растений (Гричанов, Саулич, 2012; Усков И. Б., Усков А. О., 2015; Нижарадзе, 2018; Захаренко, 2018). Математические модели патогенеза позволяют проводить вычислительные эксперименты для оценки рисков возникновения эпифитотий при различных сценариях изменения природно-климатических факторов (Николаев и др., 2019; Ибрагимов, 2023; Shirin et al., 2024).

Цель работы – моделирование динамики развития бурой и желтой ржавчины пшеницы и выявление основных природно-климатических факторов, влияющих на интенсивность поражения мягкой пшеницы болезнями.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Место проведения исследований: кафедра защиты и карантина растений Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, экспериментальное поле ФГБНУ «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова» (ВИР). Исследование проведено в период 1995–2022 гг.

Объекты исследования: сорта яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.): Сударыня (к-66407, оригинаторы: РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию», «ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ») и Тризо (к-64981, оригинатор: Deutsche Saatveredelung AG), Ленинградка (к-47882, оригинатор: ФГБНУ Ленинградский НИИСХ «Белогорка»), Ленинградская 6 (к-64900, оригинатор: ФГБНУ Ленинградский НИИСХ «Белогорка»). Указанные сорта были предоставлены для изучения отделом генетических ресурсов пшениц ФГБНУ «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова» (ВИР). В отношении бурой и желтой ржавчины сорт Сударыня обладает умеренной устойчивостью, сорт Тризо – умеренной восприимчивостью, сорта Ленинградка и Ленинградская 6 восприимчивы к болезням. Сорта Ленинградка и Ленинградская 6 широко используются в качестве модельных сортов в исследованиях пшеницы в Северо-Западном регионе России (Зуев, Брыкова, Кудрявцева, 2020).

В опытах использована общепринятая агротехника возделывания мягкой пшеницы яровой. Изучение образцов по основным селекционным признакам проведено согласно методическим указаниям ВИР (Мережко, 1999). Посев образцов проводили в оптимальные сроки на делянках 1 м². Пшеницу высевали после картофеля в четырехкратной повторности. Размещение вариантов в опыте было рандомизированное.

Описание метеорологических условий эксперимента приведено согласно данным отдела агрометеорологии ВИР. Влияние активности Солнца определено по среднегодовым и среднемесячным значениям числа пятен на Солнце Королевской обсерватории Бельгии, по числу Вольфа – ФГБНУ «Дальневосточного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», по УФ-индексу – ФГБУН Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (ГАО РАН). Тепловлагообеспеченность вегетационных периодов возделывания мягкой пшеницы определяли с помощью гидротермического коэффициента ГТК (Селянинов, 1928).

При отборе метеорологических факторов, влияющих на поражение пшеницы видами ржавчины, были использованы метеорологические показатели, характеризующие многолетние периоды её вегетации (с 11 мая по 31 августа), а также данные предшествующего периода (с сентября по апрель). Учитывали значения суммы температур, суммы осадков, относительной влажности, гидротермического коэффициента, обуславливающих вероятность возникновения и скорость нарастания эпифитотий (Lahlali et al., 2024).

Кроме того, анализировали активность Солнца, оказывающего прямое и косвенное влияние на функционирование патосистемы пшеница - ржавчина (Bornman et al., 2015; Mmbando, 2023). В нашем исследовании ее характеризовали количеством пятен на Солнце, УФ-индексом, а также значениями числа Вольфа, который широко используется для мониторинга циклов солнечной активности.

При построении моделей патогенеза выбор ключевых метеофакторов, влияющих на интенсивность развития бурой и желтой ржавчины, был основан на результатах факторного анализа и корреляционно-регрессионного моделирования (Койшибаев, 2007; Двоерядкина, Чалкина, 2011).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Бурая ржавчина (возбудитель *Puccinia triticea* Erikss) – наиболее распространенная болезнь пшеницы во всем мире. Однако ее вредоносность относительно снизилась в последние годы, в том числе и в Северо-Западном регионе (Гультяева, Шайдаюк, 2021).

Динамика развития бурой ржавчины на сортах Сударыня и Тризо отражена на рис. 1. Сильное поражение пшеницы сорта Сударыня бурой ржавчиной выявлено в 2021 г. (развитие болезни $R_6=18,5\pm3,7\%$; число пустул на лист $N_n=455,2\pm91,2$ шт.; площадь пустулы $S_n=0,098\pm0,009$ мм²), а сорта Тризо – в 2018 г. ($R_6=20,6\pm7,0\%$; $N_n=164,2\pm66,5$ шт.; $S_n=0,089\pm0,010$ мм²) и 2019 г. ($R_6=22,9\pm5,7\%$; $N_n=233,9\pm100,1$ шт.; $S_n=0,109\pm0,010$ мм²). При этом в 2021 г. сорт Сударыня отличался крайне низкой продуктивностью $Y_p=0,7\pm0,09$ г растение⁻¹ (урожайность $Y_n=1,4\pm0,2$ т га⁻¹). В 2021 г. были отмечены: в мае сумма температур (в диапазоне выше 10°C) – 289°C, сумма осадков – 68 мм; в июне и июле максимальная сумма температур – 590°C и – 838°C соответственно и минимальная сумма осадков – 11 мм и 6 мм соответственно. Согласно значениям ГТК (2,0 – в июле, 3,0 – в августе), влагообеспеченность растений в указанном году была избыточной.

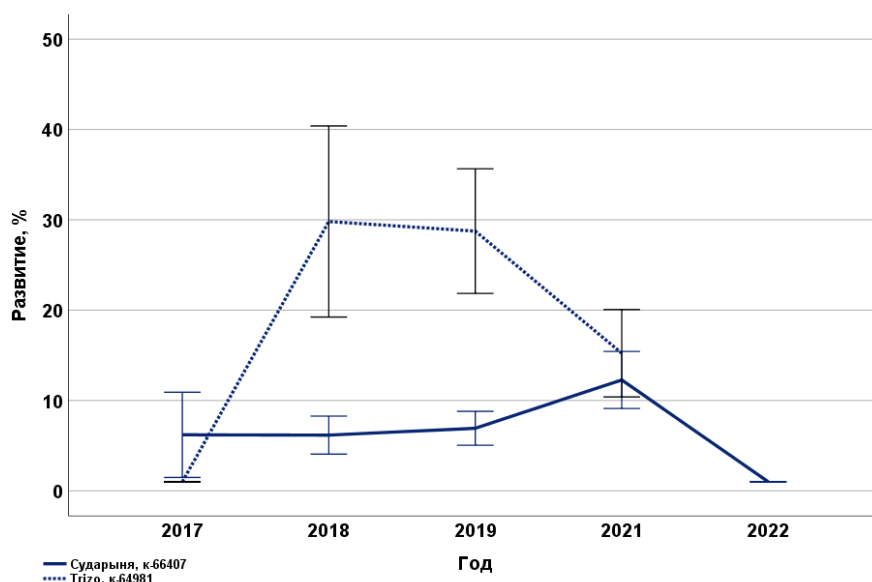


Рис. 1. Развитие бурой ржавчины на сортах пшеницы Сударыня и Тризо (2017–2022 гг.)

В таблице представлена факторная модель, отражающая структуру выявленных взаимосвязей между фитометрическими характеристиками, продуктивностью мягкой пшеницы, её пораженностью болезнями, метеорологическими факторами, солнечной активностью относительно факторов F_1 и F_2 , выделенных методом главных компонент.

В столбце F_1 отражена зависимость развития бурой ржавчины на сортах Сударыня и Тризо от

метеорологических факторов за период 2017–2022 гг. Увеличение в мае суммы осадков ($V = 0,76$), относительной влажности ($V = 0,75$), суммы температур выше 10°C ($V = 0,73$) способствовало повышению интенсивности развития ($V = 0,98$), числа пустул ($V = 0,95$) и площади пустулы ($V = 0,95$) бурой ржавчины.

Таблица. Факторный анализ зависимости фитометрических и фитопатологических параметров сортов Сударыня и Тризо от метеорологических факторов, активности Солнца (2017–2022 гг.)

Показатели	Факторные нагрузки (V)	
	F_1	F_2
Всхожесть полевая, %	0,97*	0,23
Фаза растения, балл	-0,74*	0,67
Высота растения, см	-0,72*	0,69
Масса вегетативной части, г	0,64	-0,76*
Длина первичных корней, мм	-0,88*	0,48
Длина узловых корней, мм	0,98*	0,2
Число первичных корней, шт.	-0,84*	0,54
Число узловых корней, шт.	-0,60	0,8*
Масса корня, г	-0,61	0,79*
Общая кустистость, шт.	0,06	0,93*
Продуктивная кустистость, шт.	-0,46	0,89*
Площадь флагового листа, см^2	0,78*	-0,63
Длина колоса, см	0,78*	0,63
Число колосков в колосе, шт.	0,89*	0,46
Масса 1000 зерен, г	0,98*	0,21
Масса зерен одного колоса, г	0,91*	0,42
Урожайность одного растения, г	0,90*	0,43
Развитие бурой ржавчины, %	0,98*	-0,19
Число пустул бурой ржавчины, шт.	0,95*	0,54
Площадь пустулы бурой ржавчины, мм^2	0,99*	-0,15
Развитие желтой ржавчины, %	0,08	0,97*
Длина полосы с пустулами желтой ржавчины, мм	0,87*	0,49

Показатели	Факторные нагрузки (V)	
	F ₁	F ₂
Число полос желтой ржавчины, шт.	–0,41	0,91*
Число пустул в полосе желтой ржавчины, шт.	0,87*	0,49
Суммарное число пустул желтой ржавчины, шт.	0,48	0,88*
Развитие мучнистой росы, %	0,16	–0,99*
Число пятен с налетом мучнистой росы, шт.	–0,95*	0,08
Развитие корневой гнили, %	–0,16	0,99*
Развитие септориоза, %	0,93*	–0,36
Сумма температур выше 10 °C (май, с 11 числа), °C	0,73*	–0,68
Сумма температур (июнь), °C	0,25	0,97*
Сумма температур (июль), °C	–0,42	–0,91*
Сумма температур (август), °C	–0,99*	–0,1
Сумма осадков (май, с 11 числа), °C	0,76*	0,65
Сумма осадков (июнь), °C	–0,17	0,98*
Сумма осадков (июль), °C	–0,71*	–0,71*
Сумма осадков (август), °C	–0,99*	0,12
Относительная влажность (май), %	0,75*	0,66
Относительная влажность (июнь), %	0,33	–0,94*
Относительная влажность (июль), %	–0,18	–0,98*
Относительная влажность (август), %	–0,77	0,64*
ГТК (июль), ед.	–0,94	0,33
ГТК (август), ед.	–0,96	0,29
УФ-индекс (май), ед.	0,23	–0,97*
УФ-индекс (июнь), ед.	–0,48	0,88*
УФ-индекс (июль), ед.	–0,17	–0,99*
УФ-индекс (август), ед.	–0,97*	–0,07
Число Вольфа (июль), балл	–0,94*	0,35
Число Вольфа (август), балл	–0,96*	0,29
Число пятен на Солнце (в июле), шт.	–0,94*	0,34
Число пятен на Солнце (в августе), шт.	–0,97*	0,26
Число пятен на Солнце (среднее за год), шт.	–0,95*	0,32

Примечание: * – высокие факторные нагрузки (> 0,7)

Тенденцию усиления пораженности сортов Сударыня и Тризо бурой ржавчиной R_6 с ростом суммы температур в мае $T_{\text{май}}$ ($R_6 = -8,22 + 0,081T_{\text{май}}$, $r^2 = 0,82$), а также суммы осадков в мае подтверждают аналогичные зависимости, выявленные нами на других сортах пшеницы. Согласно данным рис. 2, максимальные значения развития болезни на сорте Ленинградская 6 были выявлены в 2010 г. ($R_6 = 40,1 \pm 1,1\%$) и 2014 г. ($R_6 = 44,7 \pm 1,1\%$). В эти годы были зарегистрированы высокие значения суммы температур в мае $T_{\text{май}}$ (выше 10°C с 11 мая – даты посева пшеницы) и суммы осадков $W_{\text{май}}$ в 2010 г. –

$T_{\text{май}} = 304,4^\circ\text{C}$ ($W_{\text{май}} = 74,4$ мм), а в 2014 г. – $T_{\text{май}} = 355,9^\circ\text{C}$ ($W_{\text{май}} = 86,9$ мм). Незначительная пораженность пшеницы сорта Ленинградская 6 бурой ржавчиной в 2011 г., 2016 г. и 2021 г. отмечалась при преимущественно засушливых условиях мая, характеризуемых суммой осадков – $W_{\text{май}} = 19,9$ мм ($T_{\text{май}} = 242,1^\circ\text{C}$), $W_{\text{май}} = 17,8$ мм ($T_{\text{май}} = 362,5^\circ\text{C}$) и $W_{\text{май}} = 4,4$ мм ($T_{\text{май}} = 120,4^\circ\text{C}$), соответственно. Наибольшее поражение сорта Ленинградка бурой ржавчиной пшеницы, характеризуемое числом пустул на флаговом листе, зарегистрировано в 2010 г. (рис. 3).

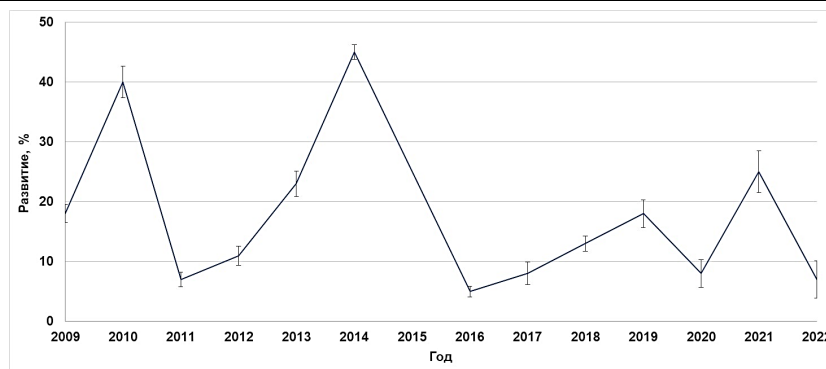


Рис. 2. Развитие бурой ржавчины на сорте пшеницы Ленинградская 6 (2009–2022 гг.)

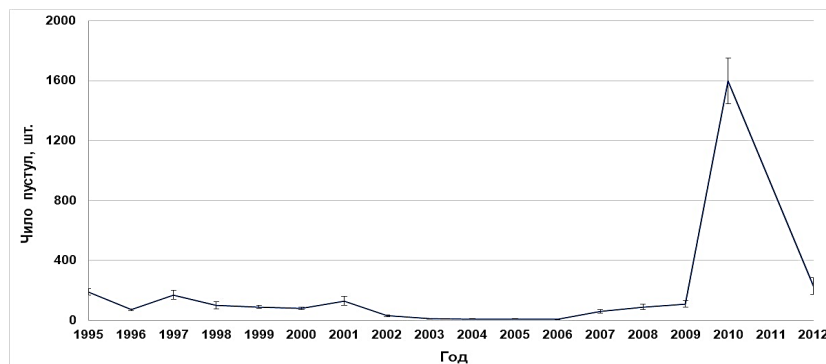


Рис. 3. Число пустул возбудителя бурой ржавчины на флаговом листе сорта пшеницы Ленинградка (1995–2012 гг.)

По литературным данным известно, что уредомицелий возбудителя сохраняется на сорных злаковых травах и озимой пшенице, и весной, при оптимальных температурных условиях, дает начало новой генерации фитопатогена (Гуляева и др., 2021). При этом развитие уредопустул бурой ржавчины, как правило, начинается со второй декады мая. В работах В. В. Чекмарева (2015, 2020) было предложено учитывать погодные условия мая как основные для прогнозирования развития бурой ржавчины пшеницы.

С ростом суммы температур в июле $T_{\text{июль}}$ выявлена тенденция увеличения пустул бурой ржавчины $N_{\text{п.б.}}$ на флаговой листовой поверхности у сортов Тризо и Сударыня: $N_{\text{п.б.}} = 437 + 0,95T_{\text{июль}}$ ($r^2 = 0,85$). Аналогичная тенденция также выявлена при анализе метеобусловленности развития болезни на коллекции мягкой пшеницы ВИР (Колесников и др., 2020).

Теплая погода осенью усиливает развитие и накопление инфекционного потенциала популяции возбудителя бурой ржавчины на озимых зерновых культурах и дикорастущих злаках. На основании определения достоверных коэффициентов ранговой корреляции Спирмена r при $P < 0,05$ было установлено, что рост значений средней температуры сентября года, предшествующего году проведения учетов патогенеза ($r = 0,7$), приводил к усилению развития бурой ржавчины на сортах Сударыня и Тризо, что также подтверждается ранее полученными данными о корреляционных взаимосвязях между значениями среднемесячной температуры в указанном месяце и развитием болезни на сорте Ленинградская 6 (Колесников и др., 2022), а также результатами фитосанитарного коллекция мягкой пшеницы ВИР (Колесников и др., 2009).

Прямое биологическое обоснование связи между солнечной активностью и пораженностью растений видами ржавчины в настоящее время отсутствует. Возможно, они могут быть обусловлены опосредованным влиянием солнечной активности на патогенез через климатические факторы. Согласно данным факторного анализа (табл.) уменьшение солнечной активности (по показателям: число Вольфа W_c в июле / августе $V = -0,94$ / $V = -0,96$; число пятен на Солнце в июле / августе: $V = -0,94$ / $V = -0,97$; среднее число пятен на Солнце: $V = -0,95$) привело к увеличению поражаемости сортов Тризо и Сударыня возбудителем бурой ржавчины (развитие болезни $V = 0,98$, число пустул $V = 0,95$, площадь пустулы $V = 0,99$). Ранее аналогичные зависимости были выявлены нами и на других сортах пшеницы (Колесников Л. Е., Колесников Е. К. и др., 2022; Колесников, Павлюшин и др., 2022). В ряде научных работ отмечено ингибирующее действие солнечной радиации и УФ-излучения на прорастание уредоспор ржавчины (Мединец, 2014; Young et al., 2012).

Желтая ржавчина (возбудитель *Puccinia striiformis* Westend.) с 2000-х годов стала доминировать среди других видов ржавчины пшеницы во многих странах мира (Mahmoodi et al., 2024). Расширяется ее ареал значимости и в РФ, в том числе в Северо-Западном регионе. Вредоносность желтой ржавчины существенно выше, чем у бурой ржавчины. Для Северо-Западного региона это может быть обусловлено более ранним проявлением болезни, чем других видов *Puccinia* (Гуляева, Шайдаюк, 2020).

Динамика развития желтой ржавчины пшеницы на сортах Сударыня и Тризо приведена на рис. 4. Метеобусловленность большинства фитопатологических показателей, отражающих

интенсивность поражения сортов пшеницы желтой ржавчиной, описана в F_2 факторной модели (табл.).

Согласно данным таблицы, развитие желтой ржавчины ($V=0,97$), число полос с пустулами ($V=0,91$) и суммарное число пустул на флаговом листе ($V=0,88$) у сортов Сударыня и Тризо увеличивалось с ростом суммы температур ($V=0,97$) и суммы осадков ($V=0,98$) в июне и снижалось с ростом суммы температур ($V=-0,91$) и суммы осадков в июле ($V=-0,91$), относительной влажности воздуха в июне ($V=-0,94$) и июле ($V=-0,98$). Аналогичные тенденции были выявлены на других сортах пшеницы. Наибольшая пораженность сорта Ленинградская 6 желтой

ржавчиной была выявлена в 2019 г. (рис. 5) в условиях прохладного июля, характеризующегося средней температурой $16,6^{\circ}\text{C}$. Этому, вероятно, способствовала достаточно теплая погода предшествующего июня (сумма температур $529,7^{\circ}\text{C}$), создавшая благоприятные предпосылки для развития патогена.

Максимальная интенсивность развития желтой ржавчины на сорте Ленинградка (рис. 6) была выявлена в 2009 г., когда средняя температура в июле была незначительна и составила $18,2^{\circ}\text{C}$ при сумме осадков 29,3 мм.

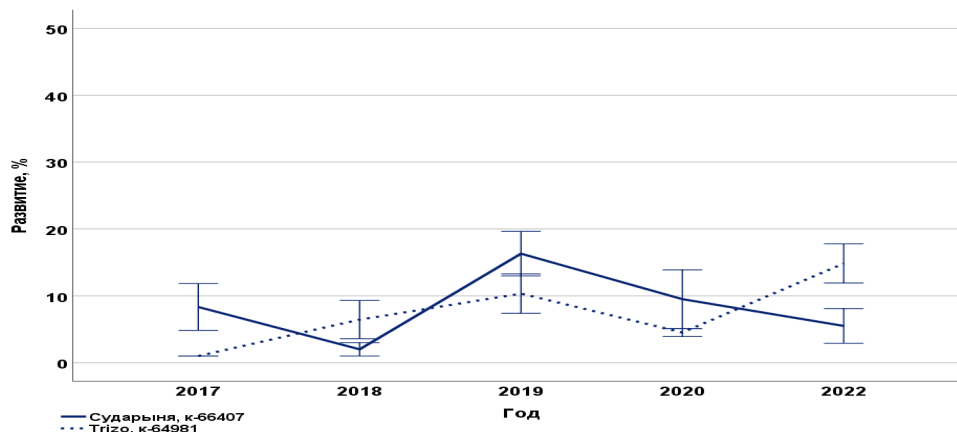


Рис. 4. Интенсивность развития желтой ржавчины на сортах Сударыня и Тризо. 2017–2022 гг.

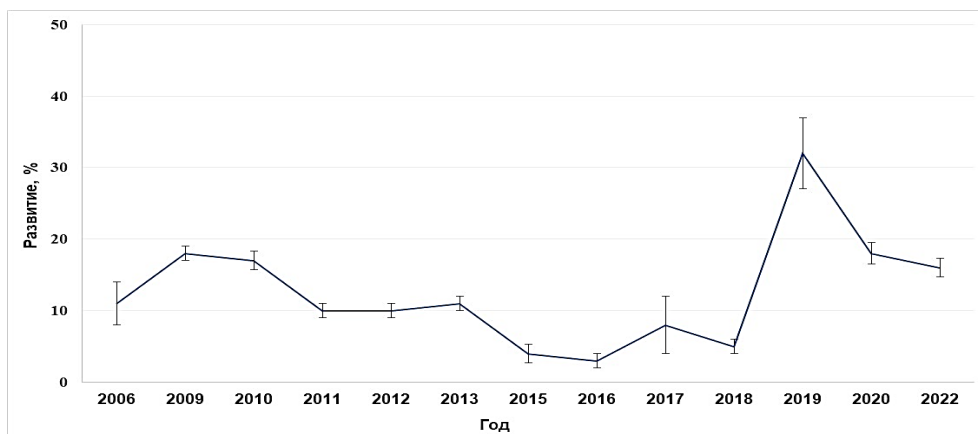


Рис. 5. Интенсивность развития желтой ржавчины на сорте Ленинградская 6. 2006–2022 гг.

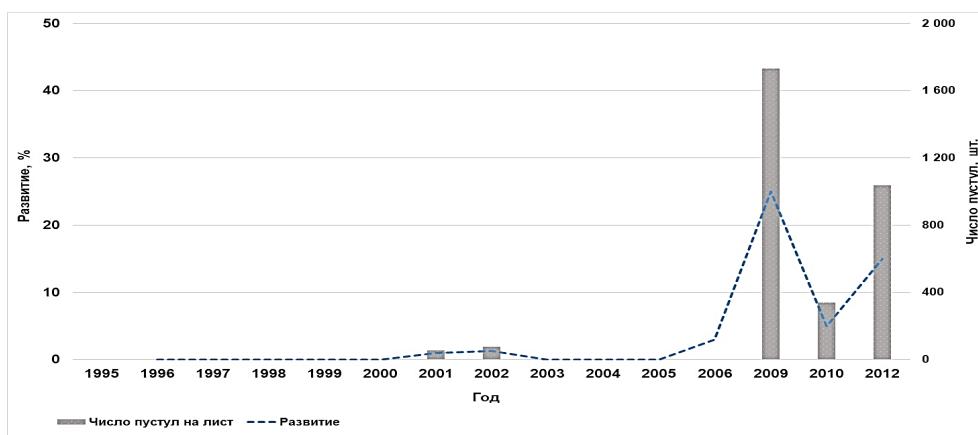


Рис. 6. Интенсивность развития желтой ржавчины на сорте Ленинградка. 1995–2012 гг.

Ранее мы отмечали усиление интенсивности развития желтой ржавчины пшеницы с ростом среднемесячной температуры в июне (Колесников и др., 2009) и снижением – в июле (Колесников и др., 2020; Госзадание Министерства сельского хозяйства РФ, 2021). Полученные нами зависимости подтверждаются результатами работы И. П. Матвеевой, Г. В. Волковой (2019), в которой показано, что для активного распространения желтой ржавчины требуются условия прохладного климата с регулярными выпадениями росы или чередующимися осадками.

С ростом суммы осадков ($V=0,76$) и суммы температур ($V=0,73$) в мае $T_{\text{май}}$ зарегистрировано увеличение числа пустул в полосе ($V=0,87$) и длины полосы с пустулами ($V=0,87$) микромицета на листьях пшеницы сортов Сударыня и Тризо. Аналогичная тенденция отмечена на сорте Ленинградская 6, когда максимальное развитие желтой ржавчины на нем в 2019 г. совпало с наибольшим значением суммы выпавших осадков в мае – 72 мм при $T_{\text{май}} - 228,1^{\circ}\text{C}$. Наибольшее развитие желтой ржавчины на сорте Ленинградка было отмечено в 2009 г. на фоне высоких значений $T_{\text{май}} - 263,6^{\circ}\text{C}$.

Для прогнозирования поражения пшеницы желтой ржавчиной на сорте Тризо нами была построена многофакторная регрессионная зависимость изменения числа пустул возбудителя на флаговом листе ($N_{\text{п.ж}}$) от суммы осадков в мае ($W_{\text{май}}$), суммы температур в июне ($T_{\text{июнь}}$), суммы осадков в июне ($W_{\text{июнь}}$), суммы температур в июле ($T_{\text{июль}}$): $N_{\text{п.ж}} = -163,69 - 4,96W_{\text{май}} + 2,64T_{\text{июнь}} - 1,70W_{\text{июнь}} - 1,24T_{\text{июль}}$ (множественный коэффициент корреляции $R=0,98$; $F=99,5$ при $P<0,044$). Наибольший статистически

достоверный вклад в усиление развития болезни вносит снижение величины суммы температур в июле ($\beta = -1,34$, $p = 0,03$). Зависимость изменения числа пустул желтой ржавчины на флаговой листовой поверхности сорта Ленинградская 6 от суммы температур выше 10°C в мае ($T_{\text{май}}$) и суммы осадков в мае $W_{\text{май}}$, описывается выражением:

$$N_{\text{п.ж}} = 1446,82 - 4,21 T_{\text{май}} + 0,80 W_{\text{май}}$$

$$(R = 0,61; F = 17,5 \text{ при } P < 0,03).$$

Согласно значению β определено, что наибольшее влияние на усиление развития болезни на сорте Ленинградская 6 оказало снижение суммы температур в мае ($\beta = -0,61$, $p = 0,03$).

Метеорологические условия весеннего периода играют важную роль в возникновении эпифитотий желтой ржавчины, что связано с накоплением инфекционного потенциала микромицета на озимых посевах и падалице. Методом корреляционного анализа установлено, что при увеличении суммы осадков в апреле выявлено снижение числа полос с пустулами желтой ржавчины на флаговой листовой поверхности у сортов Тризо и Сударыня ($r = -0,89$), а также – интенсивности ее развития на пшенице, определенной по шкале Маннерса ($r = -0,97$): рис. 7. Максимальное развитие желтой ржавчины на сорте Ленинградская 6 в 2019 г. было связано с незначительной суммой осадков в апреле – 16,5 мм, а на сорте Ленинградка в 2009 г. – при минимальной сумме осадков в апреле – 2,8 мм. Ранее нами была выявлена обратная корреляционная связь между числом пустул желтой ржавчины на флаговой листовой поверхности и указанным метеофактором на 51,2% образцов из коллекции ВИР (Госзадание Министерства сельского хозяйства РФ, 2021).

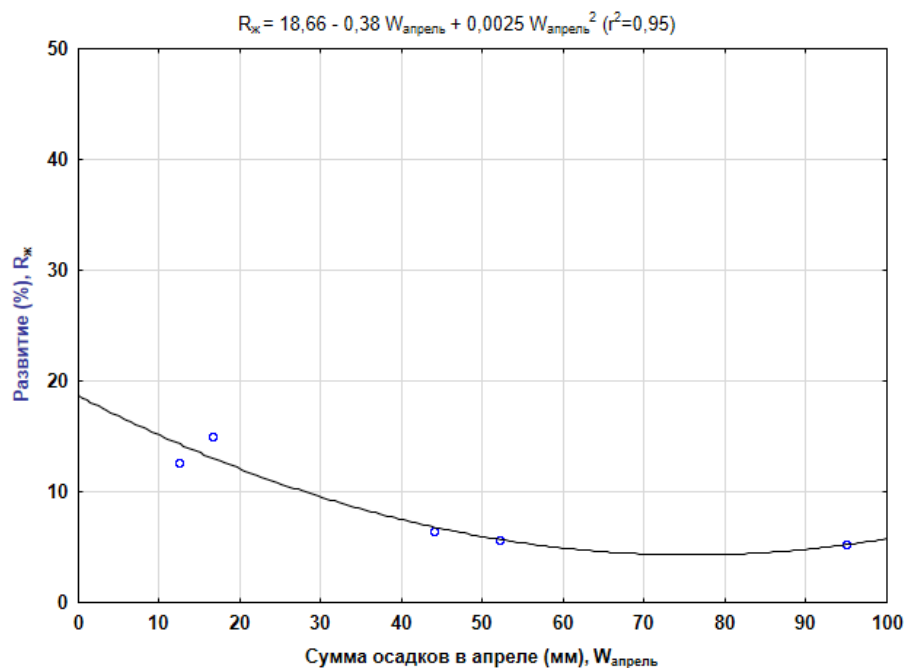


Рис. 7. Зависимость развития желтой ржавчины на флаговой листовой поверхности сортов Тризо и Сударыня от суммы осадков в апреле. 2017–2022 гг.

Согласно факторной модели (табл.) в F_1 зарегистрировано усиленное развитие желтой ржавчины (по показателям: длина полосы с пустулами, $V=0,87$ и число пустул в полосе, $V=0,87$) на сортах Сударыня и Тризо при снижении солнечной активности (по показателям: числа Вольфа в июле: $V=-0,94$ и августе: $V=-0,96$; числа пятен в июле: $V=-0,94$ и августе: $V=-0,97$; среднего числа пятен: $V=-0,95$). Ранее, согласно данным Л. Е. Колесникова, Е. К. Колесникова и др. (2022); Л. Е. Колесникова, В. А. Павлюшина и др. (2022), на сорте Ленинградская 6 нами была отмечена аналогичная тенденция снижения развития желтой ржавчины при усилении активности Солнца за период в 2009–2021 гг. Пик развития желтой ржавчины на сорте Ленинградская 6 в 2019 г. совпал с минимальными значениями количества пятен на Солнце (в среднем за год – 3,6 шт., в июле – 0,9 шт.). Максимальное поражение сорта Ленинградка в 2009 г. наблюдалось также на фоне минимальной активности Солнца (по числу Вольфа в мае – 2,9).

Как было отмечено выше, пораженность растений видами ржавчины отмечается в годы, характеризующиеся пониженной солнечной активностью (Мединец, 2014; Young et al., 2012). В условиях теплицы эффективность заражения проростков пшеницы возбудителем желтой ржавчины была непосредственно связана с интенсивностью освещения и качеством света (Zanella et al., 2024).

Рост УФ-индекса в мае ($V=-0,97$) и июле ($V=-0,99$) способствовал снижению развития болезни на сортах Сударыня и Тризо (по комплексу фитопатологических показателей), однако с его ростом в июне ($V=0,88$) поражение растений болезнью усиливалось. Относительная скорость прорастания уредоспор возбудителя желтой ржавчины крайне отрицательно коррелирует с продолжительностью воздействия на них УФ-В-излучения (Li et al., 2024).

В целом, согласно новым экспериментальным данным, представленным работе, а также данным, опубликованным ранее за период 2009–2019 гг. (Колесников Л. Е., Колесников Е. К. и др., 2022; Колесников, Павлюшин и др., 2022), в ближайшие годы возможно будет происходить усиление развития болезни, что может быть связано с глобальными климатическими изменениями, появлением новых более агрессивных рас патогенов и ограниченным числом эффективных генов устойчивости.

ВЫВОДЫ

Выявление зависимостей между многолетними природно-климатическими факторами и комплексом

фитопатологических показателей поражения мягкой пшеницы бурой и желтой ржавчиной позволяет определить метеопоказатели – важнейшие предикторы эпифитотий. Отмечены ключевые метеофакторы, которые, в частности, оказывают значительное влияние на развитие бурой и желтой ржавчины пшеницы на сортах Сударыня и Тризо в исследуемых условиях. Так, установлено усиление пораженности сортов Сударыня и Тризо бурой ржавчиной в зависимости от: интенсивности роста средней температуры в сентябре прошлого года (по показателю развития болезни); влияния роста суммы осадков и суммы температур в мае (по развитию болезни, площади пустулы, количество пустул на флаговом листе); роста суммы температур в июле (по числу пустул на флаговом листе). При увеличении суммы выпавших осадков в апреле снижалось развитие желтой ржавчины и число полос с пустулами. С ростом суммы температур в июне пораженность сортов пшеницы желтой ржавчиной возрастала; с ростом метеопоказателя в июле (по развитию болезни, числу полос с пустулами, числу пустул на флаговом листе) – снижалась. Отмечено усиление развития на сортах пшеницы Тризо и Сударыня бурой и желтой ржавчины с уменьшением показателей активности Солнца: числа солнечных пятен и числа Вольфа в июле и августе и среднегодового числа пятен. Выявленные корреляционные связи требуют дальнейшего изучения. Следует учитывать, что метеоусловия могут варьироваться по годам и регионам, а также возможны иные, неучтенные в работе факторы, которые могут влиять на развитие болезней. Разработанные модели динамики развития видов ржавчины целесообразно использовать при построении прогноза возникновения эпифитотий, оценке их распространения и возможных последствий. Модели позволяют повысить информированность и эффективность управления фитосанитарными рисками, но требуют постоянной актуализации и обновления с новыми данными. При этом необходима адаптация моделей при их применении в других агроклиматических условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

**Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве»*

Список литературы

- Баранова О. А., Коваленко Н. М., Хакимова А. Г., Митрофанова О. П. Характеристика по устойчивости к особо опасным листовым болезням образцов пшеницы из коллекции ВИР // Вестник защиты растений. 2016. № 3(89). С. 22–23.
- 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. URL: <https://gisnauka.ru>
- Гричанов И. Я., Саулич М. И. Современные информационные технологии фитосанитарного мониторинга // Защита и карантин растений. 2012. № 7. С. 13–16

- Гультияева Е. И., Беспалова Л. А., Аблова И. Б., Шайдаюк Е. Л., Худокормова Ж. Н., Яковлева Д. Р., Титова Ю. А. Злаковые травы – резерваторы инфекции видов ржавчины для озимой мягкой пшеницы на Северном Кавказе России // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021. № 25(6). С. 638–646. DOI: 10.18699/VJ21.072
- Гультияева Е. И., Шайдаюк Е. Л. Вирулентность российских популяций возбудителя желтой ржавчины пшеницы // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. № 4. С. 299–304. DOI: 10.31857/S0026364820040042
- Гультияева Е. И., Шайдаюк Е. Л. Идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине у новых российских сортов мягкой пшеницы // Биотехнология и селекция растений. 2021. № 4(2). С. 15–27. DOI: 10.30901/2658-6266-2021-2-02
- Двоерядкина Н. Н., Чалкина Н. А. Факторный анализ при исследовании структуры данных // Вестник АмГУ. Вып. 53, 2011. С. 1–5.
- Захаренко В. А. Мониторинг фитосанитарного состояния агроэкосистем в связи с прогнозированием площадей обработок пестицидами в Российской Федерации // Агрохимия. № 12. 2018. С. 3–21
- Зуев Е. В., Брыкова А. Н., Кудрявцева Е. Ю. Яровая мягкая пшеница. Результаты многолетнего полевого изучения образцов яровой мягкой пшеницы в условиях Ленинградской области. Каталог ВИР. Санкт-Петербург. Издательство: ВИР, 2020. Вып. 917. 71 с. DOI: 10.30901.978–5–907145–25–2
- Ибрагимов Т. З. Интеллектуальный анализ в фитосанитарии: визуализация и кластеризация // Защита и карантин растений. 2023. № 12. С. 3–6. DOI: 10.47528/1026-8634 2023 12 3
- Иващенко В. Г., Павлюшин В. А. Интенсификация растениеводства и эколого-продукционный баланс агроэкосистем: снижение плодородия почв и фитосанитарная дестабилизация // Вестник защиты растений. № 3(93). 2017. С. 5–16
- Игнатов А. Н., Кошкин Е. И., Андреева И. В., Гусейнов Г. Г., Гусейнов К. Г., Джалилов Ф. С.-У. Влияние глобальных изменений климата на фитопатогены и развитие болезней растений // Агрохимия. 2020. № 12. С. 81–96. DOI: 10.31857/S0002188120120042
- Койшибаев М. Зависимость динамики развития бурой ржавчины на яровой пшенице в Казахстане от частных и суммарных индексов погоды // Микология и фитопатология. 2007. Т. 41. № 4. С. 347–356.
- Колесников Л. Е., Власова Э. А., Колесникова Ю. Р. Влияние природно-климатических факторов на динамику патогенеза возбудителей болезней пшеницы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2009. № 2. С. 19–22.
- Колесников Л. Е., Колесников Е. К., Павлюшин В. А., Чернов С. В., Колесникова Ю. Р. Фенотипическое проявление устойчивости пшеницы к бурой ржавчине: элементы и моделирование // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 1. С. 38–46. DOI: 10.31857/S2500262722010070
- Колесников Л. Е., Колесникова Ю. Р., Кеслина А. А. Влияние метеорологических факторов и солнечной активности на развитие возбудителей болезней мягкой пшеницы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2020. № 61. С. 9–59. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-14049
- Колесников Л. Е., Павлюшин В. А., Архипов М. В., Прияткин Н. С., Колесникова Ю. Р. Агроэкологическое варьирование продуктивности и поражаемости пшеницы болезнями: элементы и моделирование // Агрофизика. 2022. № 3. С. 40–52. DOI: 10.25695/AGRPH.2022.03.06
- Левитин М. М. Защита растений от болезней при глобальном потеплении // Защита и карантин растений. 2012. № 8. С. 16–17.
- Левитин М. М. Микроорганизмы в условиях глобального изменения климата // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. № 5. С. 641–647.
- Матвеева И. П., Волкова Г. В. Желтая ржавчина пшеницы. распространение, вредоносность, меры борьбы (обзор) // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 2 (46). С. 102–116. DOI: 10.18286/1816-4501-2019-2-102-116
- Мединец О. Э. Экологические предпосылки эпифитотий бурой ржавчины пшеницы // Защита и карантин растений. 2014. № 7. С. 12–15.
- Мережко А. Ф., Удачин Р. А., Зуев Е. В., Филатенко А. А., Сербин А. А., Ляпунова О. А., Косов В. Ю., Куркиев У. К., Охотникова Т. В., Наврузбеков Н. А., Богуславский Р. Л., Абдулаева А. К., Чикида Н. Н., Митрофанова О. П., Потокина С. А. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение в мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале. Методические указания. Санкт-Петербург. ВИР, 1999. 82 с.
- Нижарадзе Т. С. Видовой состав, распространённость и вредоносность опасных болезней зерновых культур в самарской области и прогноз их развития // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 9–16.
- Николаев С. В., Зубаирова У. С., Сколотнева Е. С., Орлова Е. А., Афонников Д. А. Системный подход к моделированию развития листостебельных грибных инфекций пшеницы // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019. 23(1). С. 100–109. DOI: 10.18699/VJ19.468
- Павлова В. Н., Карачёнова А. А. Оценка изменении климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России // Фундаментальная и прикладная климатология. № 4. 2020. С. 68–87. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-4-68-87
- Санин С. С. Защита растений и устойчивое земледелие в XXI столетии // Защита и карантин растений. 2020. № 4. С. 9–16.

- Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата / Г. Т. Селянинов // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.
- Усков И. Б., Усков А. О. Применение математики нечетких множеств к проблеме управления агроклиматическими рисками // Агрофизика. 2015. № 1. С. 18–25.
- Чекмарев В. В. Зависимость развития бурой ржавчины озимых пшеницы и ржи от количества дней с определёнными факторами погоды // Зерновое хозяйство России. 2015. С. 14–18.
- Чекмарев В. В. Погодные условия и особенности развития ржавчины пшеницы в Тамбовской области // Наука без границ. № 8(48). 2020. С. 35–39.
- Bornman J.F., Barnes P.W., Robinson S.A., Ballaré C.L., Flint S.D., Caldwell M. M. Solar ultraviolet radiation and ozone depletion-driven climate change: effects on terrestrial ecosystems // Photochem. Photobiol. Sci. 2015. 14. P. 88–107.
- Lahlali R., Taoussi M., Laasli S.-E., Gachara G., Ezzouggar R., Belabess Z., Aberkani K., Assouguem A., Meddich A., Jarroudi M. El, Barka E. Ait. Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions // Crop and Environment. 2024. V. 3, Issue 3. 2024. P. 159–170. DOI: 10.1016/j.crope.2024.05.003.
- Li T., Zhao Y., Jin S., Yao Q., Wang H. Investigation of UV-B sensitivity of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* isolates from Gansu and Qinghai provinces, China[J] // Acta Phytopathologica Sinica. 2024. V. 4(3). P. 591–606. DOI: 10.13926/j.cnki.apps.000929
- Mahmoodi S., Ganje M.B. Ahmadi K., Dalvand Y., Naghibi A., Newlandsf N.K. Modeling spatiotemporal distribution of yellow rust wheat pathogen using machine learning algorithms: Insights from environmental assessment // Environmental Technology & Innovation. V.36. 2024. 103865. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103865
- Mmbando G.S. The recent relationship between ultraviolet-B radiation and biotic resistance in plants: a novel non-chemical strategy for managing biotic stresses // Plant signaling & Behavior. 2023. Vol. 18. No. 01. e2191463. DOI: 10.1080/15592324.2023.2191463
- Shirin M., Meysam B.G., Kourosh A., Yadollah D., Amir N., Nathaniel K.N. Modeling spatiotemporal distribution of yellow rust wheat pathogen using machine learning algorithms: Insights from environmental assessment // Environmental Technology & Innovation. 2024. Vol. 36. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103865.
- Young H.M., George S., Narváez D.F., Srivastava P., Schuerger A.C., Wright D. L., Marois J. J. 2012. Effect of solar radiation on disease severity of soybean rust //Phytopathology. V. 102. P. 794-803. DOI: 10.1094 / PHYTO-10-11-0294
- Zanella C.M., MacCormack R., Caulfield J., Gordon A., Jones H., Hubbard A., Boyd L.A. Yellow rust infection of wheat: How the quantity of light received by wheat seedlings before inoculation affects infection efficiency // Plant Pathology. 2024. V. 73. P. 2359–2371. DOI: 10.1111/ppa.13977

References

- Baranova O.A., Kovalenko N.M., Khakimova A.G., Mitrofanova O.P. *Kharakteristika po ustoichivosti k osobo opasnym listovym bolezniam obratstov pshenitsy iz kolleksii VIR*. [Characteristics of resistance to especially dangerous leaf diseases of wheat samples from the VIR
- Goszadanie Ministerstva sel'skogo khoziaistva Rossiiskoi Federatsii po teme: «*Modelirovanie vliianiia agroekologicheskikh faktorov na razvitie vozbuditelei boleznei zernovykh kul'tur i opredelenie vozmozhnosti povysheniia urozhainosti miagkoi pshenitsy v izmeniaiushchikhsia usloviakh Severo-Zapada Rossiiskoi Federatsii*». [State assignment of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation on the topic: “Modeling the influence of agroecological factors on the development of pathogens of grain crops and determining the possibility of increasing the yield of soft wheat in the changing conditions of the North-West of the Russian Federation”], nomer gosudarstvennogo ucheta NIOKTR 122011300483-3, 2021. URL: <https://gisnauka.ru>
- Grichanov I.Ia., Saulich M.I. Sovremennye informatsionnye tekhnologii fitosanitarnogo monitoringa. [Modern information technologies of the phytosanitary monitoring]. *Zashchita i karantin rastenii*, 2012, no. 7, pp. 13–16.
- Gul'tiaeva E.I., Shaidaiuk E.L. Virulentnost' rossiiskikh populiatsii vozbuditelia zheltoi rzhavchiny pshenitsy. [Virulence of Russian populations of the stripe rust causal agent]. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2020, V. 54, no. 4, pp. 299–304. DOI: 10.31857/S0026364820040042
- Gul'tiaeva E.I., Shajdayuk E.L. Identifikaciya genov ustojchivosti k buroj rzhavchine u novykh rossijskikh sortov myagkoi pshenitsy [Identification of leaf rust resistance genes in the new Russian varieties of common wheat]. *Biotekhnologiya i selekciya rastenij*. 2021. no. 4(2). pp. 15–27. DOI: 10.30901/2658-6266-2021-2-o2
- Gul'tiaeva E.I., Bepalova L.A., Ablova I.B., E.L. Shaidaiuk, Khudokormova Zh.N., Iakovleva D.R., Titova Iu.A. Zlakovyie travy – rezervatory infektsii vidov rzhavchiny dlia ozimoi miagkoi pshenitsy na Severnom Kavkaze Rossii [Wild grasses as the reservoirs of infection of rust species for winter soft wheat in the Northern Caucasus]. *Vavilovskii zhurnal genetiki i seleksii*. 2021, no. 25(6), pp. 638–646. DOI: 10.18699/VJ21.072
- Dvoeriadkina N.N., Chalkina N.A. Faktornyj analiz pri issledovanii struktury dannykh [Factor analysis in the study of data structure]. *Vestnik AmGU*, 2011, V. 53, pp. 1–5.
- Zakharenko V.A. Monitoring fitosanitarnogo sostoianiia agroekosistem v sviazi s prognozirovaniem ploshchadei obrabotok pestitsidami v Rossiiskoi Federatsii [Monitoring of phytosanitary condition of agroecosystems in connection with forecasting of pesticide treatment areas in the Russian Federation]. *Agrokimiia*, no. 12, 2018, pp. 3–21.

- Zuev E.V., Brykova A.N., Kudriavtseva E.Iu. *Iarovaia miagkaia pshenitsa. Rezul'taty mnogoletnego polevogo izucheniia obraztsov iarovoi miagkoi pshenitsy v usloviiakh Leningradskoi oblasti. Katalog VIR*. [Spring bread wheat: results of field studies performed for many years on spring bread wheat accessions in Leningrad province. VIR World Collection Catalog]. Sankt- Peterburg: VIR Publishing, 2020, Vyp. 917, 71 p. DOI: 10.30901.978–5–907145–25–2.
- Ibragimov T.Z. Intel'ktual'nyi analiz v fitosanitarii: vizualizatsiia i klasterizatsiia [Intellectual analysis in the phytosanitary: visualization and clusterization]. *Zashchita i karantin rastenii*, 2023, no. 12, pp. 3–6. DOI: 10.47528/1026-8634 2023 12 3
- Ivashchenko V.G., Pavliushin V.A. Intensifikatsiia rastenievodstva i ekologo-produktsionnyi balans agroekosistem: snizhenie plodorodiia pochv i fitosanitarnaia destabilizatsiia. [Crop production intensification and ecological production balance of agricultural ecosystems: the decline in soil fertility and phytosanitary destabilization]. *Vestnik zashchity rastenii*, no. 3(93), 2017, pp. 5–16.
- Ignatov A.N., Koshkin E.I., Andreeva I.V., Guseinov G.G., Guseinov K.G., Dzhalilov F. S.-U. Vliianie global'nykh izmenenii klimata na fitopatogeny i razvitie boleznei rastenii [Impact of global climate change on plant pathogens occurrence]. *Agrokimiia*, 2020, no. 12, pp. 81–96. DOI: 10.31857/S0002188120120042
- Koishibaev M. Zavisimost' dinamiki razvitiia vuroi rzhavchiny na iarovoi pshenitse v Kazakhstane ot chastykh ii summarnykh indeksov pogody. [Dependence of dynamics of leaf rust development on a spring wheat in Kazakhstan from individual and total indexes of weather]. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2007. V.41, no. 4, pp. 347–356.
- Kolesnikov L.E., Vlasova E.A., Kolesnikova Yu.R. Vliianie prirodno-klimaticheskikh faktorov na dinamiku patogeneza vzbuditelei boleznei pshenitsy. [Effect of natural climatic factors on the dynamics of pathogenesis of wheat disease pathogens]. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhoziaistvennykh nauk*, 2009, no. 2, pp. 19–22.
- Kolesnikov L.E., Kolesnikov E.K., Pavliushin V.A., Chernov S.V., Kolesnikova Yu.R. Fenotipicheskoe proiavlenie ustoichivosti pshenitsy k buroi rzhavchine: elementy i modelirovanie. [Phenotypic expression of wheat resistance to brown rust: elements and modeling]. *Rossiiskaia sel'skokhoziaistvennaia nauka*, 2022, no. 1, pp. 38–46. DOI: 10.31857/S2500262722010070
- Kolesnikov L.E., Kolesnikova Yu.R., Keslina A.A. Vliianie meteorologicheskikh faktorov i solnechnoi aktivnosti na razvitie vzbuditelei boleznei miagkoi pshenitsy. [The influence of meteorological factors and solar activity on the development of soft wheat diseases pathogens]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2020, no. 61, pp. 49–59. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-14049
- Kolesnikov L.E., Pavliushin V.A., Arkhipov M.V., Priiatkin N.S., Kolesnikova Iu.R. Agroekologicheskoe var'irovanie produktivnosti i porazhaemosti pshenitsy bolezniami: elementy i modelirovanie [Agroecological variation of wheat productivity and disease resistance: elements and modeling]. *Agrofizika*, 2022, no. 3, pp. 40–52. DOI: 10.25695/AGRP.2022.03.06
- Levitin M.M. Zashchita rastenii ot boleznei pri global'nom poteplenii. [Protection of plants from diseases under the conditions of global warming]. *Zashchita i karantin rastenii*, 2012, no. 8, pp. 16–17.
- Levitin M.M. Mikroorganizmy v usloviiakh global'nogo izmeneniia klimata. [Microorganisms and global climate change]. *Sel'skokhoziaistvennaia biologiya*, 2015, V. 50, no 5, pp. 641–647.
- Matveeva I.P., Volkova G.V. Zheltaia rzhavchina pshenitsy. Rasprostranenie, vredonosnost', mery bor'by (obzor). [Yellow rust of wheat. Expansion, harm, control measures (review)]. *Vestnik Ul'ianovskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii*, 2019, no. 2(46), pp. 102–116. DOI: 10.18286/1816-4501-2019-2-102-116
- Medinets O.E. Ekologicheskie predposylki epifitotii buroi rzhavchiny pshenitsy. [Environmental prerequisites for epiphytoses of brown rust of wheat]. *Zashchita i karantin rastenii*, 2014, no. 7, pp. 12–15.
- Merezhko A.F., Udachin R.A., Zuev E.V., Filatenko A.A., Serbin A.A., Liapunova O.A., Kosov V.Iu., Kurkiev U.K., Okhotnikova T.V., Navruzbekov N.A., Boguslavskii R.L., Abdulaeva A.K., Chikida N.N., Mitrofanova O.P., Potokina S.A. *Popolnenie, sokhranenie v zhivom vide i izuchenie v mirovoi kolleksii pshenitsy, egilopsa i tritikale. Metodicheskie ukazaniia*. [Replenishment, preservation in a living form and study in the world collection of wheat, aegilops and triticales. Methodological guidelines]. Sankt-Peterburg: VIR Publishing, 82 p.
- Nizharadze T.S. Vidovoi sostav, rasprostranennost' i vredonosnost' opasnykh boleznei zernovykh kul'tur v samarskoi oblasti i prognoz ikh razvitiia. [Species composition, prevalence and harmfulness of dangerous diseases of grain crops in the Samara region and forecast of their development]. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii*, 2018, no. 4. pp. 9–16.
- Nikolaev S.V., Zubairova U.S., Skolotneva E.S., Orlova E.A., Afonnikov D.A. Sistemnyj podhod k modelirovaniyu razvitiia listostebel'nykh gribnykh infektsii pshenitsy [A system approach to the modeling of fungal infections of the wheat leaf]. *Vavilovskij zhurnal genetiki i selektsii*. 2019. no. 23(1). pp. 100–109. DOI: 10.18699/VJ19.468
- Pavlova V.N., Karachenkova A.A. Otsenka izmenenii klimaticheskoi obuslovlennoi urozhainosti iarovoi pshenitsy v zemledel'cheskoi zone Rossii. [Assessment of changes in climate-based productivity of summer wheat in the main regions of its cultivation in Russia]. *Fundamental'naiia i prikladnaia klimatologiya*, 2020, no. 4, p. 68–87. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-4-68-87
- Sanin S.S. Zashchita rastenii i ustoichivoe zemledelie v XXI stoletii. [Plant protection and sustainable agriculture in the XXI century]. *Zashchita i karantin rastenii*, 2020, no. 4, pp. 9–16.
- Selanianov G.T. O sel'skokhoziaistvennoi otsenke klimata. [On agricultural climate assessment]. *Trudy po sel'skokhoziaistvennoi meteorologii*, 1928, V. 20, pp. 165–177.

- Uskov I.B., Uskov A.O. Primenenie matematiki nechetkikh mnozhestv k probleme upravleniya agroklimaticheskimi riskami. [Application of fuzzy set mathematics to the problem of agro-climatic risk management]. *Agrofizika*, 2015, no. 1, pp. 18–25.
- Chekmarev V.V. Zavisimost' razvitiia buroi rzhavchiny ozimnykh pshenitsy i rzhi ot kolichestva dnei s opredelennymi faktorami pogody. [Dependence of brown rust on winter wheat and rye on a number of days with definite weather factors]. *Zernovoe khoziaistvo Rossii*, 2015, pp.14–18.
- Chekmarev V.V. Pogodnye usloviia i osobennosti razvitiia rzhavchiny pshenitsy v Tambovskoi oblasti. [Weather conditions and features of wheat rust development in the Tambov region]. *Nauka bez granits*, 2020, no.8(48), pp. 35–39.
- Bornman J.F., Barnes P.W., Robinson S.A., Ballaré C.L., Flint S.D., Caldwell M. M. Solar ultraviolet radiation and ozone depletion-driven climate change: effects on terrestrial ecosystems // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2015. 14. P. 88–107.
- Lahlali R., Taoussi M., Laasli S.-E., Gachara G., Ezzouggar R., Belabess Z., Aberkani K., Assouguem A., Meddich A., Jarroudi M. El, Barka E. Ait. Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions // *Crop and Environment*. 2024. V. 3, Issue 3. 2024. P. 159–170. DOI: 10.1016/j.crope.2024.05.003.
- Li T., Zhao Y., Jin S., Yao Q., Wang H. Investigation of UV-B sensitivity of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* isolates from Gansu and Qinghai provinces, China[J] // *Acta Phytopathologica Sinica*. 2024. V. 4(3). P. 591–606. DOI: 10.13926/j.cnki.apps.000929
- Mahmoodi S., Ganje M.B. Ahmadi K., Dalvand Y., Naghibi A., Newlandsf N.K. Modeling spatiotemporal distribution of yellow rust wheat pathogen using machine learning algorithms: Insights from environmental assessment // *Environmental Technology & Innovation*. V.36. 2024. 103865. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103865
- Mmbando G.S. The recent relationship between ultraviolet-B radiation and biotic resistance in plants: a novel non-chemical strategy for managing biotic stresses // *Plant signaling & Behavior*. 2023. Vol. 18. No. 01. e2191463. DOI: 10.1080/15592324.2023.2191463
- Shirin M., Meysam B.G., Kourosh A., Yadollah D., Amir N., Nathaniel K.N. Modeling spatiotemporal distribution of yellow rust wheat pathogen using machine learning algorithms: Insights from environmental assessment // *Environmental Technology & Innovation*. 2024. Vol. 36. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103865.
- Young H.M., George S., Narváez D.F., Srivastava P., Schuerger A.C., Wright D. L., Marois J. J. 2012. Effect of solar radiation on disease severity of soybean rust // *Phytopathology*. V. 102. P. 794–803. DOI: 10.1094 / PHYTO-10-11-0294
- Zanella C.M., MacCormack R., Caulfield J., Gordon A., Jones H., Hubbard A., Boyd L.A. Yellow rust infection of wheat: How the quantity of light received by wheat seedlings before inoculation affects infection efficiency // *Plant Pathology*. 2024. V. 73. P. 2359–2371. DOI: 10.1111/ppa.13977

УДК 582.681:581.192

DOI: 10.25695/AGRPH.2025.03.04

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДИКОРАСТУЩИХ И СЕЛЕКЦИОННЫХ ОБРАЗЦОВ *HYPERICUM PERFORATUM* L. КОЛЛЕКЦИИ ВИР

А. Б. Курина^{ID}, А. А. Асланова^{ID}, А. Е. Соловьева^{ID}

ORCID

Курина А. Б. [0000-0002-3197-4751](https://orcid.org/0000-0002-3197-4751)Асланова А. А. [0009-0006-3429-0060](https://orcid.org/0009-0006-3429-0060)Соловьева А. Е. [0000-0002-6201-4294](https://orcid.org/0000-0002-6201-4294)

ФГБНУ «ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР)»,
190031, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44,
e-mail: nastya_n11@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2025 г., принята к печати 28.08.2025 г.

Зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.) – ценное лекарственное растение, широко применяемое в терапии депрессивных состояний и обладающее комплексным тонизирующим действием. Несмотря на природную распространенность, его производственное выращивание остается ограниченным. Растение содержит уникальный комплекс биологически активных соединений, включая нафтодиантроны (гиперицин, псевдогиперицин), флороглюцины (гиперфорин), флавоноиды и фенольные кислоты, состав которых варьирует в зависимости от генетических и экологических факторов. В исследовании проведен сравнительный анализ 12 образцов *H. perforatum* (дикорастущие формы и селекционные сорта) из коллекции ВИР по содержанию пигментов, биологически активных веществ и антиоксидантной активности. Установлены значительные межсортные различия по содержанию пигментов, фенольных соединений и антиоксидантной активности. Селекционные сорта Янтарный лекарь (к-7) и