

Исследования изменения спектральных характеристик сортов озимой пшеницы в зависимости от степени инфицирования возбудителями болезней

О. Ю. Кремнева¹, О. В. Тутубалина², И. И. Середа²,
Р. Ю. Данилов¹, М. В. Зимин², А. А. Курилов¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений, Краснодар, 350039, Россия*
E-mail: kremenoks@mail.ru

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия*
E-mail: olgatut@mail.ru

Исследования проводились в 2018–2019 гг. на опытном поле Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений в Краснодаре и были направлены на выявление информативных признаков распознавания экономически значимых возбудителей болезней озимой пшеницы на ранних стадиях их развития. Объектами исследований стали посевы четырёх сортов озимой пшеницы, которые характеризуются разной степенью устойчивости к листовым болезням. На участках с посевами пшеницы были созданы искусственный и естественный инфекционные фоны развития основных патогенов. Начиная с момента прохождения патогенами прогнозируемого периода инкубации выполнялись серии ежедневных спектрометрических измерений посевов озимой пшеницы в диапазоне электромагнитного излучения от 350 до 2500 нм со спектральным разрешением 3–10 нм с помощью спектрометра ASD FieldSpec 3 Hi-Res. Первые видимые изменения спектральных характеристик исследуемых растительных фонов, которые проявились в виде снижения показателей коэффициента спектральной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, были отмечены по результатам анализа данных на момент проявления первых признаков болезней. Установлено, что по многовременным данным наземного спектрометрирования возможно детектировать изменения состояния посевов озимой пшеницы на ранних стадиях развития патогенов. Предложено использование временных рядов значений коэффициента спектральной яркости на длине волны 800 нм как репрезентативной и часто используемой воздушными и космическими съёмочными аппаратами.

Ключевые слова: наземное спектрометрирование, пшеница озимая, болезни пшеницы, спектральные характеристики

Одобрена к печати: 13.05.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-149-161

Введение

Озимая пшеница — одна из ведущих культур по площади возделывания во всём мире, и в том числе в России. К комплексу экономически значимых патогенов пшеницы относятся: возбудители бурой и жёлтой ржавчины (*Puccinia triticina* Erikss., *Puccinia striiformis* West.), жёлтой пятнистости (*Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechsler), септориоза (*Septoria spp.*), мучнистой росы (*Blumeria graminis* (DC.) Speer). Эти болезни очень вредоносны и широко распространены как в мире (Kokhmetova et al., 2017; Kolmer, Hughes, 2014), так и на территории Российской Федерации, особенно в её южном регионе (Волкова и др., 2018; Кремнева и др., 2019). Согласно данным ФАО (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН, *англ.* FAO — Food and Agriculture Organization), потери урожая от воздействия фитопатогенов составляют в развитых странах 10 %, в развивающихся — 20–50 %. В России потери до 25–35 % зерновых культур вызывают ржавчинные грибы, септориозная и пиренофорозная пятнистости, мучнистая роса, фузариоз, корневые гнили, болезни зимней гибели (Федоренко и др., 2018).

Традиционные методы фитосанитарного мониторинга основаны на проведении визуальной диагностики развития и распространения болезней пшеницы осмотром растений в 10–15 точках по диагонали обследуемого поля. При этом подсчитывается количество просмотренных растений (Ченкин, 1993).

В современных реалиях интенсивного сельского хозяйства проведение фитосанитарного мониторинга по классическим методикам затруднено наличием больших посевных площадей, вследствие чего отсутствует должный контроль со стороны специалистов.

Наиболее перспективным способом решения данной проблемы стала разработка дистанционных методов диагностики состояния посевов сельскохозяйственных культур, основанных на возможности детектирования изменений состояния растительности в результате регистрации отражённого от них электромагнитного излучения (Исмаилов и др., 2012).

В настоящее время в мире сельское хозяйство — ведущая сфера использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Кравцов и др., 2013). Согласно данным ряда исследований (Бекмухамедов, Карабкина, 2013; Митрофанов и др., 2012), изучение и оценка спектральной яркости объекта в конкретных узкополосных спектральных каналах позволяет выделять скрытые аномальные изменения, которые невозможно заметить на местности без применения специальных методик или приборов.

Известны результаты исследований по разработке дистанционных методов обнаружения ржавчинных болезней на посевах озимой пшеницы (Данилов и др., 2018). Авторам удалось диагностировать поражение растений и оценить его интенсивность, однако они отмечали невозможность установления причины поражения, объясняя это тем, что стрессы биотического и абиотического происхождения вызывают сходные изменения спектральных характеристик исследуемых объектов. Проведены успешные работы по моделированию экологической ниши септориоза пшеницы с помощью ДЗЗ (Малахов и др., 2017).

Изучены спектральные характеристики растений озимой пшеницы, поражённой возбудителем корневой гнили (*Bipolaris sorokineana* Syn.) (Гурова и др., 2019). Кравцовым С.Л. с коллегами (2013) проведён анализ информативности спектральных каналов для дистанционного мониторинга сельскохозяйственных культур. Выполнены исследования по изучению спектральных характеристик сорной растительности, наиболее часто встречаемой в посевах сельскохозяйственных культур Краснодарского края (Шумилов и др., 2018).

Проведение эффективных и экономически обоснованных защитных мероприятий против болезней пшеницы во многом определяется возможностью раннего обнаружения инфекции и источников её происхождения (Соколов и др., 2018).

Целью исследований было выявление информационных признаков для распознавания экономически значимых возбудителей болезней на основе анализа данных наземного спектрометрирования с учётом генотипов разных сортов озимой пшеницы.

Сведения об особенностях спектральных характеристик растений, поражённых патогенами на раннем развитии, полученные методами наземного спектрометрирования, имеют особую ценность, так как позволяют сформулировать требования к съёмочным системам аппаратов дистанционного зондирования Земли при необходимости их использования для фитопатогенного мониторинга.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2018–2019 гг. на опытном поле Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений в Краснодаре. Объектами стали посевы четырёх сортов озимой пшеницы селекции Национального центра зерна им. П. П. Лукьяненко (Краснодар) и Научного центра «Донской» (Зерноград, Ростовская обл.), которые характеризуются разной степенью устойчивости к листовостебельным болезням (Волкова и др., 2016; Жуковский и др., 2012) (табл. 1): сорт Курень устойчив к жёлтой (*P. striiformis* West.) и бурой (*P. triticina* Erikss.) ржавчинам, среднеустойчив к мучнистой росе (*B. graminis* (DC.) Speer) и средневосприимчив к септориозной (*Septoria spp.*) и пиренофорозной (*P. tritici-repentis* (Died.)

Drechsler) пятнистостям; сорт Бонус устойчив к бурой ржавчине и мучнистой росе, восприимчив к жёлтой ржавчине и пиренофорозу и средневосприимчив к септориозной пятнистости; сорт Аксинья устойчив к жёлтой ржавчине, среднеустойчив к бурой ржавчине, восприимчив к пиренофорозу и средневосприимчив к мучнистой росе и септориозу; сорт Краснодарская 99 устойчив к жёлтой ржавчине, среднеустойчив к мучнистой росе и септориозу, восприимчив к бурой ржавчине и средневосприимчив к пиренофорозу.

Таблица 1. Характеристика исследуемых сортов озимой пшеницы по степени устойчивости к листовостебельным болезням (Волкова и др., 2016; Жуковский и др., 2012)

Болезни пшеницы	Устойчивость сорта			
	Курень	Бонус	Аксинья	Краснодарская 99
Бурая ржавчина	Устойчив	Устойчив	Устойчив	Восприимчив
Жёлтая ржавчина	Устойчив	Восприимчив	Среднеустойчив	Устойчив
Мучнистая роса	Среднеустойчив	Устойчив	Средневосприимчив	Среднеустойчив
Септориоз	Средневосприимчив	Средневосприимчив	Средневосприимчив	Среднеустойчив
Пиренофороз	Средневосприимчив	Восприимчив	Восприимчив	Средневосприимчив

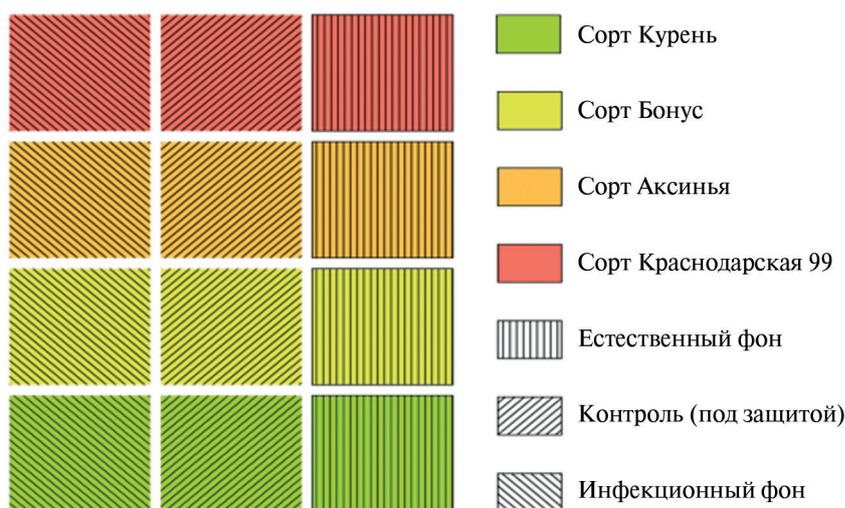


Рис. 1. Схема опыта

Каждый участок был разделён на три зоны: 1 — защищённая от болезней фунгицидами (чистый фон); 2 — с искусственным инфекционным фоном бурой ржавчины (инфицированный); 3 — с естественным развитием болезней (рис. 1). Для развития бурой и жёлтой ржавчины на экспериментальном участке применяли метод искусственного заражения растений озимой пшеницы спорами данных фитопатогенов (Анпилогова, Волкова, 2000). С целью создания инфекционного фона ржавчинных заболеваний были собраны споры возбудителей в результате маршрутных обследований в 2018 г. с производственных и селекционных посевов озимой пшеницы в районах Краснодарского края, Ростовской обл. и Ставрополья. Инфекционный материал (споры) был прижизнён на восприимчивом сорте Мичиган Амбер в условиях теплицы и затем размножен для получения необходимого количества. Для инокуляции растений использовали смесь урединоспор с тальком в соотношении 1:100 при нагрузке 5 мг спор/м². Заражение растений озимой пшеницы осуществляли 16 апреля в фазу

«начало выхода в трубку» (фаза Z 30–32). Развитие возбудителей жёлтой пятнистости, септориоза и мучнистой росы происходило на естественном инфекционном фоне. Создание чистого фона (без болезней) осуществлялось двукратной обработкой выделенной зоны системным фунгицидом Фалькон, КС: первая обработка — 25.04.2019 (фаза «флаг-лист»), вторая — 09.05.2019 (фаза «начало цветения» Z 61). Учёт болезней проводили начиная с момента первичных проявлений развития болезней, которые были отмечены 30.04.2019 в фазу «флаг-лист» (Z 40–47), и в последующие до фазы «молочно-восковая спелость зерна» (Z 58) с интервалом 10–12 сут. Степень поражения растений болезнями оценивали в процентах по международным методикам (Peterson et al., 1948). Также была оценена урожайность посевов исследуемых сортов на разных инфекционных фонах по общепринятой методике (Федин, 1985).

Первая серия гиперспектральных измерений посевов пшеницы на тестовых участках осуществлялась ежедневно с 26.04.2019 по 02.05.2019 после прохождения ржавчинными патогенами прогнозируемого периода инкубации, т.е. спустя 10 сут с момента проведения искусственного заражения растений их спорами (период инкубации ржавчинных болезней составляет 7–14 сут в зависимости от лимитирующих факторов). В период первой серии измерений рост растений озимой пшеницы характеризовался прохождением последних стадий фазы «стеблевание» (Z 37–39). Последующие измерения проводились в отдельные даты до появления и усиления видимых симптомов заболеваний с учётом основных фаз роста растений озимой пшеницы (Санин и др., 2010): 10.05.2019 (фаза «колошение» Z 51–59; период интенсивного развития всех листостебельных инфекций), 26.05.2019 (фаза «молочно-восковая спелость» Z 71–82; период, позволяющий прогнозировать урожайность посевов озимой пшеницы в зависимости от степени развития болезней) и 02.06.2019 (фаза «восковая спелость» Z 85; момент возможного проявления заболеваний репродуктивных органов).

Спектрометрирование проводилось в диапазоне электромагнитного излучения от 350 до 2500 нм со спектральным разрешением 1–10 нм и включало два вида измерений: бесконтактное наземное спектрометрирование (измерение спектральной яркости на определённой высоте перпендикулярно к поверхности Земли) и контактное спектрометрирование листьев растений (сенсор прибора измеряет значения яркости растений при непосредственном контакте с ними).

Приборная база наземных полевых исследований была представлена спектрорадиометром ASD FieldSpec 3 Hi-Res, который предназначен для измерения абсолютных и относительных значений энергетической яркости в спектральном диапазоне 350–2500 нм (FieldSpec..., 2010).

Бесконтактное спектрометрирование проводилось для каждого участка опытного поля. Оно выполнялось в две серии по пять измерений растительного покрова, прерываемые измерениями калибровочной белой панели с известными значениями коэффициента спектральной яркости (КСЯ). Данная тактика использовалась для снижения влияния фактора неравномерности освещения во время проведения работ. Сенсор располагался на выносной штанге на высоте 120–140 см относительно уровня грунта. Подобная мера необходима для минимизации влияния отражённой радиации от поверхности посторонних объектов.

Для того чтобы лучше учесть изменения освещённости во время проведения бесконтактных измерений, проводилась синхронизированная по времени съёмка спектральной яркости растительности и небесного свода четырёхканальным спектрометром SkyeSpectroSense2. Измерения этим прибором проходили в режиме логгера (каждые 20 с), и он также калибровался относительно белой панели с известными значениями коэффициента спектральной яркости. В дальнейшем полученные данные использовались для дополнительной калибровки бесконтактных измерений.

Контактное спектрометрирование проводилось для флаговых листов пяти случайно выбранных растений каждого участка опытного поля с использованием специального прибора ASD Leaf Clip, являющегося съёмной деталью спектрорадиометра ASD FieldSpec 3 Hi-Res. Так как площадь сенсора прибора (круг диаметром 20 см) превышала средний размер флагового листа, был использован трафарет — плотный картон с измеренными значениями спектральной яркости и отверстием площадью 1 см².

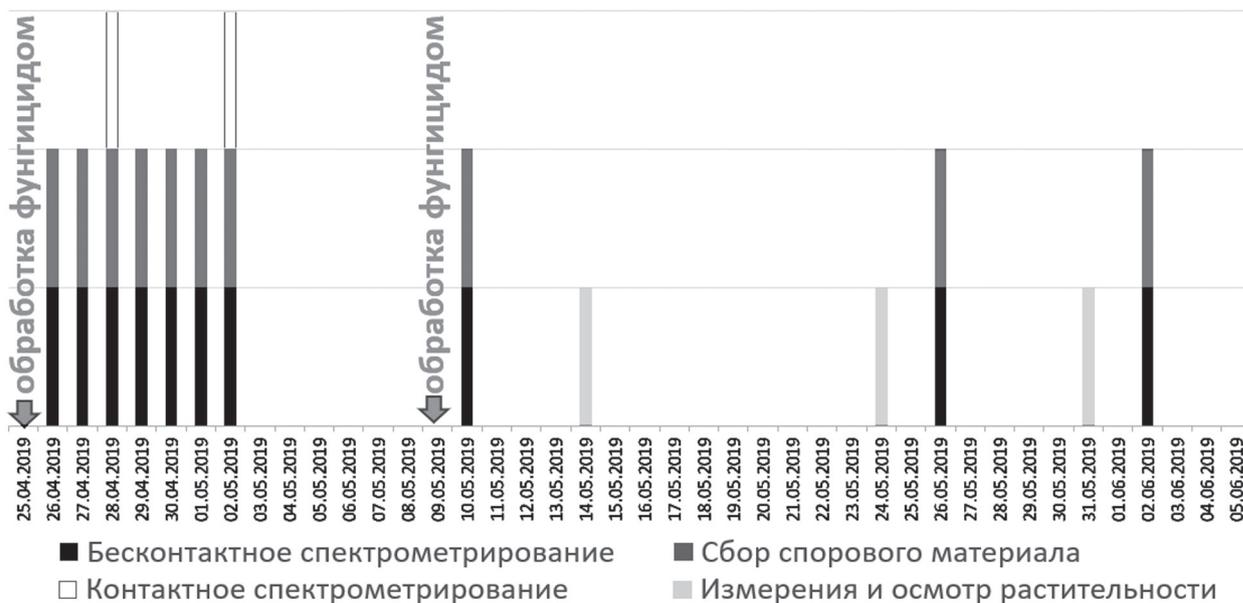


Рис. 2. Даты проведения полевых исследований в апреле – июне 2019 г.

Порядок и количество проведённых работ представлены на рис. 2.

Результаты исследований

На рис. 3 представлены показатели урожайности для всех сортов пшеницы озимой. На рисунке видна явная закономерность: наибольшую массу зёрен на площадь произрастания показали посевы, обработанные фунгицидом, а наименьшую — с искусственно создаваемым инфекционным фоном. Также менее устойчивые к листовостебельным болезням сорта пшеницы озимой показали меньшую урожайность по сравнению с более устойчивыми.

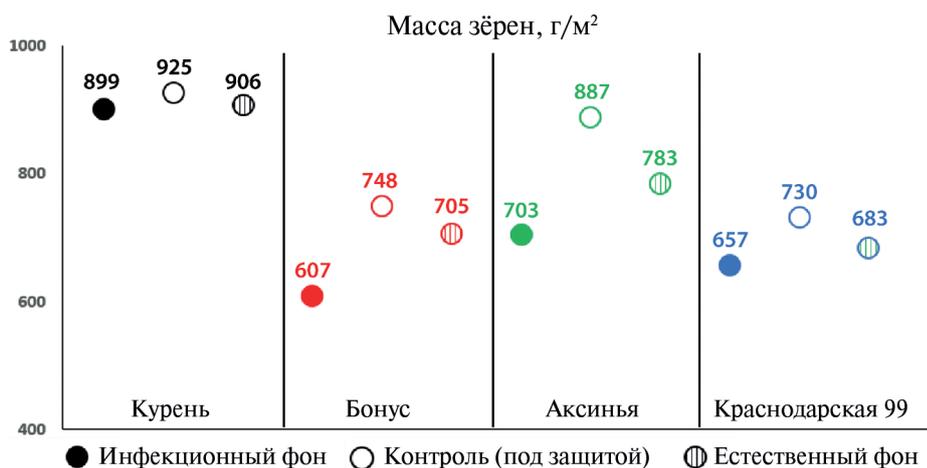


Рис. 3. Масса зёрен посевов исследуемых сортов озимой пшеницы по разным вариантам

Это позволяет сделать вывод, что, несмотря на сложность соблюдения чистоты опыта в условиях произрастания на открытых участках поля, одно из ключевых условий эксперимента (создание инфекционного, естественного и защищённого фонов) было успешно соблюдено.

С целью выявления специфических спектральных диапазонов, свидетельствующих о проявлении изменений, вызванных воздействием вредных объектов, был проведён анализ изменения морфологии спектральных сигнатур коэффициента спектральной яркости растительных объектов в зависимости от их фактического состояния, учтённого во время полевых обследований.

В рамках настоящей работы была осуществлена статистическая обработка данных полевой спектрометрии с расчётом среднего арифметического, дисперсии и стандартного отклонения. На основе полученных значений проведена оценка различий спектральных характеристик растительных объектов в видимой и инфракрасной областях спектра. Было выявлено, что в видимом диапазоне спектра среднее квадратическое отклонение (СКО) при проведении измерений тестовых участков принимает значения 0,01–0,03, что сопоставимо с различиями коэффициента спектральной яркости (рис. 4). В то же время в ближнем инфракрасном (БИК) диапазоне спектра значения среднее квадратическое отклонения измерений КСЯ составляют порядка 10–15 % и не более 30 % от значений измерений КСЯ (табл. 2). Это позволяет рассматривать различия в данном диапазоне спектра как значимые.

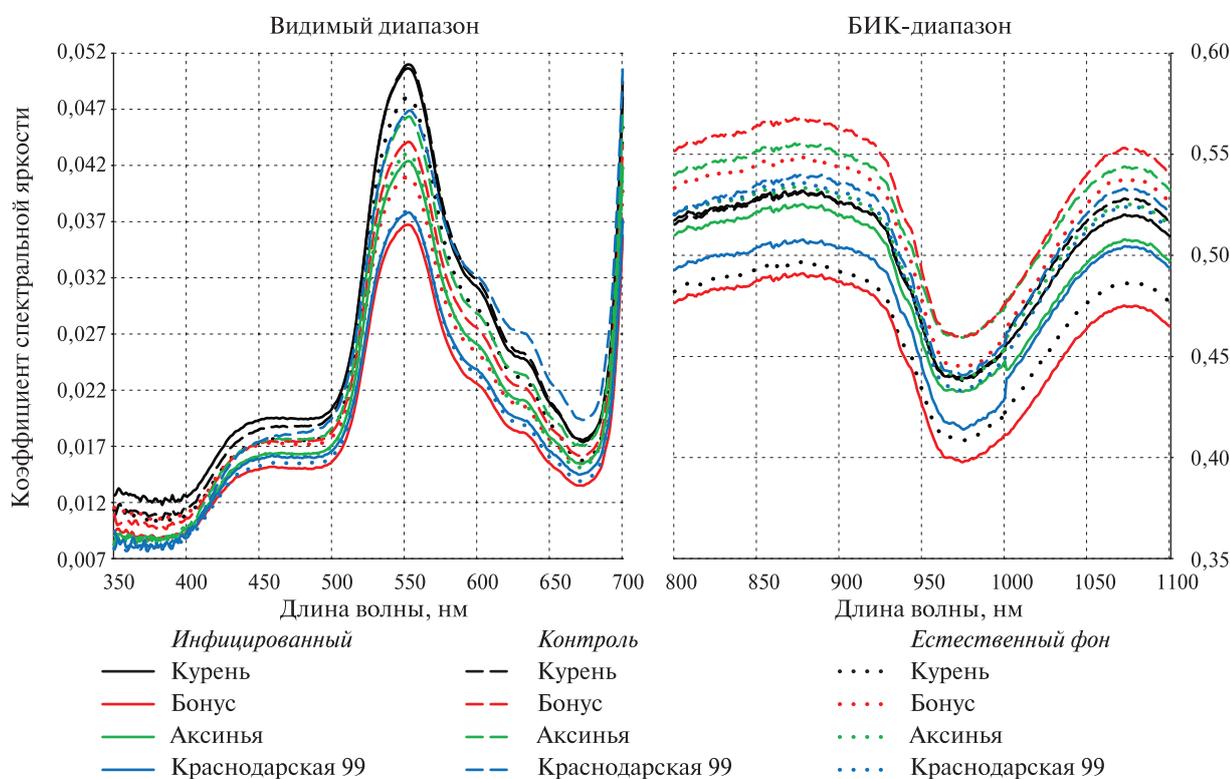


Рис. 4. Графики средних значений КСЯ инфицированного, контрольного и естественного растительных фонов разных сортов озимой пшеницы на момент проявления первых признаков болезней (01.05.2019)

По результатам анализа графического материала в период с 26 по 29 апреля 2019 г. не выявлено существенных изменений отражательной способности растений озимой пшеницы, свидетельствующих о влиянии развития бурой ржавчины или других патогенов. Средние графики спектров отражения сравниваемых растительных фонов не имели существенных различий.

Первые видимые изменения спектральных характеристик исследуемых растительных фонов, которые проявились в виде снижения показателей коэффициента спектральной яркости на инфицированных делянках всех сортов, были отмечены по результатам анализа данных, полученных в период с 30 апреля по 2 мая 2019 г. (см. рис. 4). В этот момент времени были зафиксированы первые единичные проявления жёлтой ржавчины на сорте Курень, а также единичные проявления септориозной пятнистости на делянках остальных сортов.

Таблица 2. Временные изменения значений КСЯ на длине волны 800 нм и СКО их измерений в пределах тестовых участков

Сорт	Название тестового участка	26.04.2019		29.04.2019		10.05.2019		02.06.2019	
		КСЯ	СКО	КСЯ	СКО	КСЯ	СКО	КСЯ	СКО
Курень	Инфицированный	0,473	0,072	0,506	0,081	0,574	0,041	0,274	0,072
	Контроль	0,457	0,044	0,515	0,043	0,352	0,026	0,335	0,037
	Естественный фон	0,456	0,053	0,467	0,061	0,499	0,044	0,354	0,043
Бонус	Инфицированный	0,455	0,050	0,468	0,055	0,426	0,048	0,287	0,033
	Контроль	0,466	0,042	0,485	0,065	0,445	0,046	0,310	0,065
	Естественный фон	0,441	0,052	0,502	0,048	0,417	0,064	0,285	0,043
Аксинья	Инфицированный	0,444	0,037	0,521	0,042	0,527	0,047	0,286	0,034
	Контроль	0,440	0,055	0,484	0,057	0,453	0,027	0,297	0,054
	Естественный фон	0,457	0,054	0,491	0,048	0,468	0,056	0,422	0,053
Краснодарская 99	Инфицированный	0,451	0,035	0,457	0,062	0,486	0,039	0,264	0,034
	Контроль	0,444	0,038	0,464	0,068	0,487	0,058	0,326	0,049
	Естественный фон	0,468	0,017	0,466	0,017	0,512	0,043	0,322	0,046

В ходе анализа полученных данных было установлено, что наиболее значимые различия отражательной способности изучаемых объектов проявляются в БИК-диапазоне, поэтому был проведён анализ изменения значений КСЯ для всех делянок за весь период измерений (26 апреля – 2 июня 2019 г.) в канале 800 нм (рис. 5, см. с. 156). Выбор данного канала был обусловлен тем, что во всём БИК-диапазоне выбранной временной серии значение КСЯ для всех длин волн изменялось практически синхронно (см. рис. 4). Поэтому выбор какой-либо определённой длины волны для анализа не имел принципиального значения. В то же время каналы с центральным значением 800 нм используются различными современными съёмочными системами.

При анализе графиков, полученных с 26 по 30 апреля, заметно, что патогенный фон сорта Курень характеризовался наиболее низким показателем значения КСЯ в канале 800 нм по сравнению с контролем и естественным фоном. С 1 мая у инфицированного фона происходит резкий подъём, и тенденция к снижению наблюдается только после 10 мая, что может быть вызвано физиологией развития растений. Также отмечено резкое снижение значений КСЯ контрольного фона после 10 мая, что может быть связано с ингибирующими свойствами фунгицида. Естественный фон сохранял более стабильную тенденцию без резких скачков показателей КСЯ.

Значения КСЯ инфицированного фона сорта Бонус характеризовались меньшими показателями по сравнению с контролем и естественным фоном, которые в период с 26 по 30 апреля находились на одном уровне. 30 апреля наблюдалось максимальное значение отражательной способности этих двух фонов, после которого происходило снижение показателей КСЯ.

Показатели КСЯ инфицированного фона сорта Аксинья в период с 26 по 30 апреля были на одном уровне с естественным фоном, но значительно ниже контроля. Однако с 5 по 15 мая наблюдалось сильное возрастание КСЯ инфицированного фона и даже его превышение над контролем и естественным фоном. С 20 мая произошло резкое снижение значений КСЯ инфекционного фона, в то время как у контроля и естественного фона наблюдалось более гладкое снижение показателей КСЯ.

Инфицированный фон сорта Краснодарская 99 до 30 апреля показывал более низкие значения КСЯ, чем обработанный и естественный фоны. С 1 по 24 мая показатели КСЯ инфицированного фона и контроля находились на одном уровне. В этот промежуток времени естественный фон превосходил их по показателям КСЯ.

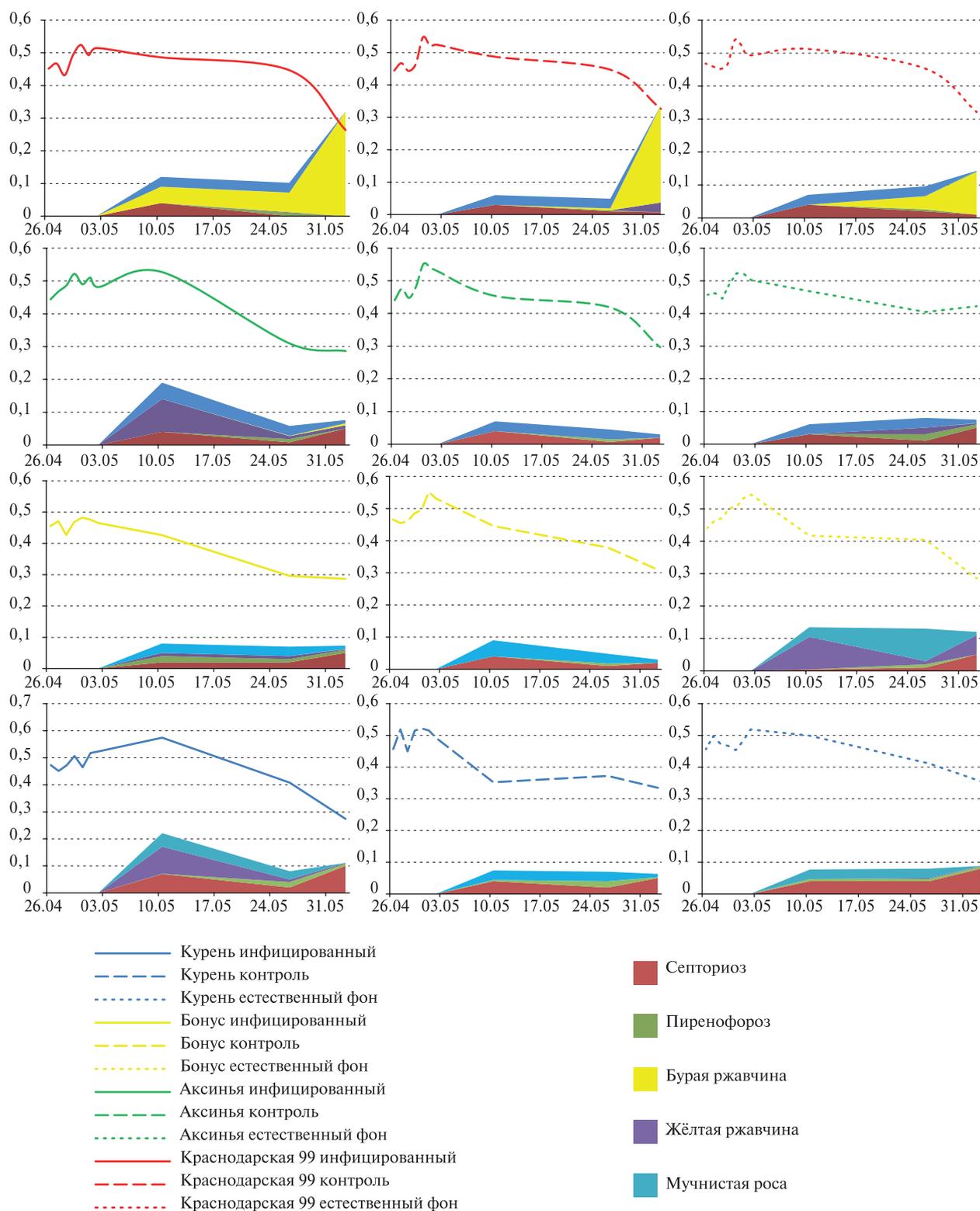


Рис. 5. Графики временного изменения значений КСЯ в канале 800 нм в сравнении со степенью развития болезней на исследуемых сортах озимой пшеницы

По результатам анализа полученных графиков можно сделать следующие заключения:

- несмотря на инфицирование участков спорами бурой ржавчины, её развитие было замечено только на посевах наиболее восприимчивого к этому патогену сорта пшеницы озимой — Краснодарской 99;

- временной ход КСЯ на длине волны 800 нм контрольных участков имеет более плавный вид и к моменту последней серии измерений принимает более высокие значения относительно инфицированных;
- динамика КСЯ естественного фона имеет более стабильный вид и высокие значения относительно остальных участков. Предположительно, это связано с тем, что он был подвержен меньшему стрессу от фунгицида или искусственно созданного патогенного фона.

По результатам обработки данных контактных измерений (рис. 6) установлено большее расхождение в значениях коэффициента спектральной яркости в видимом диапазоне спектра относительно бесконтактных измерений, что позволяет лучше идентифицировать особенности разных сортов.

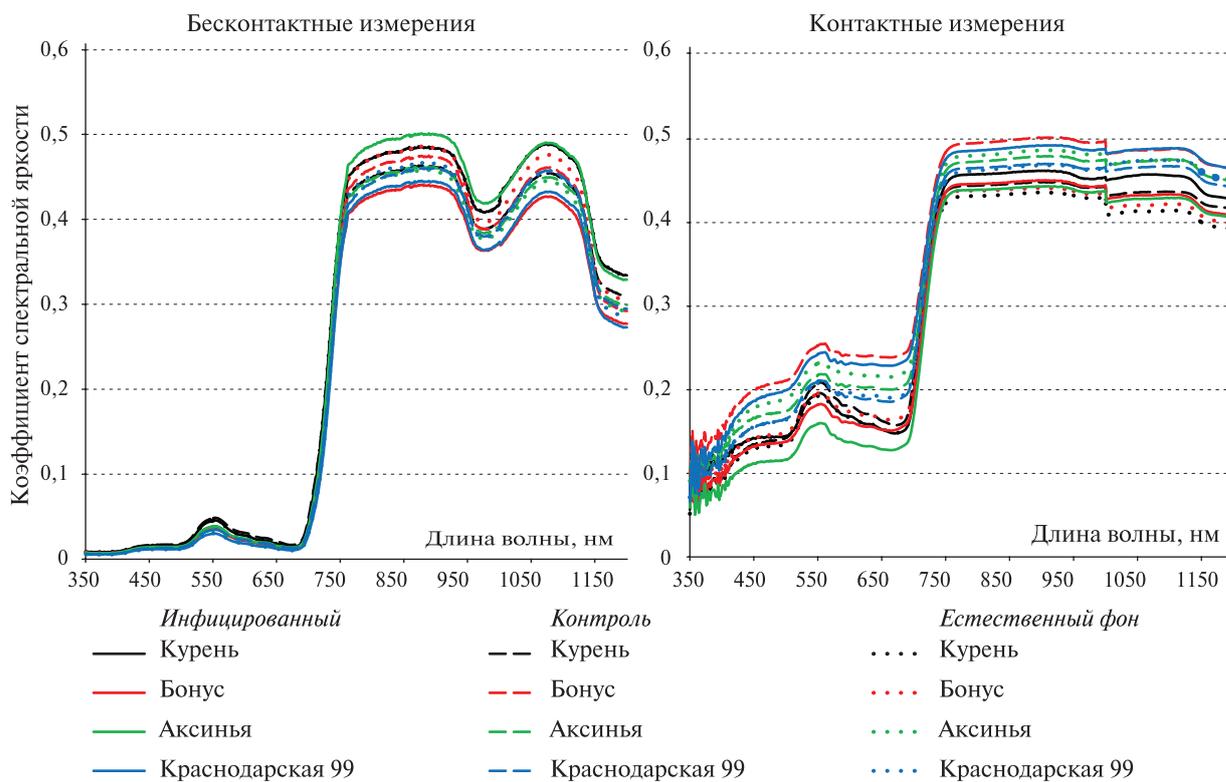


Рис. 6. Сравнение графиков средних значений КСЯ разных сортов озимой пшеницы, полученных по результатам контактного и бесконтактного спектрометрирования

Спектральные образы различных сортов пшеницы озимой, полученные с помощью контактных и бесконтактных измерений, значительно отличаются друг от друга, что может быть вызвано как особенностями геометрии растений, так и недостаточным количеством измерений, техническими условиями съёмки.

Контактные измерения являлись опытными работами, результаты которых были признаны заслуживающими более подробного исследования. Однако вследствие недостаточности собранных экспериментальных данных сложно делать однозначные выводы о спектральных особенностях исследуемых посевов. В этой связи принято решение увеличить количество контактных измерений при продолжении текущего исследования.

Заключение

С помощью современного гиперспектрального оборудования получены новые фундаментальные данные по диагностике раннего развития экономически значимых болезней озимой пшеницы на юге России.

Изучены особенности изменения спектральных характеристик четырёх различных по устойчивости к болезням сортов озимой пшеницы на разных стадиях развития патогенов в сопоставлении с данными наземных фитосанитарных обследований посевов и действием факторов, определявших рост пшеницы на тестовых участках весной 2019 г.

По результатам анализа данных наиболее значимые изменения спектральных характеристик исследуемых растительных фонов были отмечены на момент проявления первых признаков болезней в виде снижения показателей коэффициента спектральной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Предложено использование временных рядов значений коэффициента спектральной яркости на длине волны 800 нм как часто используемой воздушными и космическими съёмочными аппаратами.

Коэффициент спектральной яркости для всех сортов пшеницы на длине волны 800 нм в первой серии измерений принимал значения около 0,45. К последней серии измерений инфицированные тестовые участки имели более низкие значения КСЯ (менее 0,3). При этом для тестовых участков, более остальных пострадавших от патогенов, график временного изменения КСЯ имеет менее резкий спад значений в серии измерений 10 мая.

Установлено, что по многовременным данным наземного спектрометрирования можно детектировать изменения состояния посевов озимой пшеницы на ранних стадиях развития патогенов. При этом предоставляется возможность оценить разницу в динамике спектров для посевов, развивающихся в разных условиях.

В ходе исследований были отмечены различные факторы, вносящие неточности в измерения: неравномерность высева, влияние сторонних патогенов, плановая обработка полей, неточности в соблюдении техники спектрометрирования. Определена необходимость разработки методики, позволяющей минимизировать эти факторы для повышения достоверности получаемых результатов.

Данное исследование предполагается продолжить в 2020 г. В нём необходимо учесть замечания и опыт 2019 г. Проведённые и предстоящие работы способствуют определению возможностей использования методов дистанционного зондирования в диагностике патогенов культурных растений на ранних стадиях их развития в естественной среде.

Исследования спектральных характеристик растительных фонов проведены в рамках проекта, поддержанного грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 19-416-230043 р_а и администрацией Краснодарского края.

Исследования по сбору биоматериала в различных районах Краснодарского края и созданию искусственного фона ржавчинных заболеваний выполнены согласно государственному заданию № 075-00376-19-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научно-исследовательской работы по теме № 0686-2019-0012.

Литература

1. Анпилогова Л. К., Волкова Г. В. Методы создания искусственных инфекционных фонов и оценки сортообразцов пшеницы на устойчивость к вредоносным болезням (фузариозу колоса, ржавчинам, мучнистой росе). Краснодар: ВНИИБЗР РАСХН, 2000. 28 с.
2. Бекмухамедов Н. Э., Карабкина Н. Н. Изменение спектральных характеристик растений яровой пшеницы, зараженных грибковыми болезнями // Сельское, лесное и водное хоз-во. 2013. № 10. URL: <http://agro.snauka.ru/2013/10/1169> (дата обращения 21.01.2014).
3. Волкова Г. В., Ваганова О. Ф., Долбилова Т. А. Характеристика устойчивости к бурой ржавчине сортов мягкой озимой пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2016. № 4. С. 62–67.

4. Волкова Г. В., Шуляковская Л. Н., Кудинова О. А., Матвеева И. П. Желтая ржавчина пшеницы на Кубани // Защита и карантин растений. 2018. № 4. С. 22.
5. Гурова Т. А., Клименко Д. Н., Луговская О. С., Елкин О. В., Козик В. И. Спектральные характеристики сортов пшеницы при биотическом стрессе // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 10. С. 71–75.
6. Данилов Р. Ю., Исмаилов В. Я., Третьяков В. А., Кремнева О. Ю., Шумилов Ю. В., Ризванов А. А., Кривошеин В. В., Костенко И. А. Разработка прецизионных технологий фитосанитарного мониторинга агроэкосистем на основе использования данных дистанционного гиперспектрального зондирования Земли // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 82–86.
7. Жуковский А. Г., Ильюк А. Г., Буга С. Ф., Склименок Н. А., Кремнева О. Ю., Волкова Г. В., Гудошникова Е. С. Поражаемость сортов озимой пшеницы септориозом (*Septoria spp.*) и желтой пятнистостью (*Pyronophora tritici-repentis*) в условиях Республики Беларусь и Северо-Кавказского региона России // Политемат. сетевой электрон. науч. журн. Кубанского гос. аграр. ун-та. 2012. № 80. С. 252–263. URL: <http://ej.kubagro.ru/a/viewaut.asp?id=973> (дата обращения 11.08.2019).
8. Исмаилов Э. Я., Надыкта В. Д., Исмаилов В. Я., Костенко И. А., Швец А. А. Гиперспектральные исследования поражения сельскохозяйственных культур фитопатогенами // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 3(68). С. 98–103.
9. Кравцов С. Л., Голубцов Д. В., Лисова Е. Н. Анализ спектральных каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности (по зарубежным публикациям) // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 1. С. 79–91.
10. Кремнева О. Ю., Волкова Г. В., Коваленко Н. М. Динамика расового состава *Pyronophora tritici-repentis* в Северо-Кавказском регионе // Микология и фитопатология. 2019. Т. 53. № 4. С. 246–253.
11. Малахов Д. В., Цычуева Н. Ю., Витковская И. С. Моделирование экологической ниши септориоза пшеницы с применением данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 113–124.
12. Митрофанов Е. В., Шашнев И. В., Бубненко Д. И. О применении узкоспектральных вегетационных индексов для оценки состояния лесной растительности // Вестн. Московского гос. обл. ун-та. Сер. «Естественные науки». 2012. № 4. С. 118–122.
13. Санин С. С., Соколова Е. А., Черкашин В. И., Назарова Л. Н., Стрижекозин Ю. А., Ибрагимов Т. З., Неклеса Н. П. Болезни зерновых колосовых культур: М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 139 с.
14. Соколов Ю. Г., Садковский В. Т., Кремнева О. Ю., Данилов Р. Ю., Пачкин А. А., Зеленский Р. А., Курилов А. А. Разработка технологии обнаружения очагов ржавчинных болезней пшеницы // Международ. научно-исслед. журн. 2018. № 12-2(78). С. 29–33.
15. Федин М. А. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Министерство сельского хозяйства СССР, 1985. 285 с.
16. Федоренко В. Ф., Мишуров Н. П., Немушная Л. А. Перспективные технологии диагностики патогенов сельскохозяйственных растений: науч. аналит. обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 68 с.
17. Ченкин А. Ф. Методика по организации и учету вредных организмов: М.: Центр научно-техн. информации, 1993. 66 с.
18. Шумилов Ю. В., Ермоленко С. А., Савва А. П., Данилов Р. Ю., Мкртчян А. Г. Изучение возможности использования беспилотных летательных аппаратов для дистанционного мониторинга засоренности посевов сельскохозяйственных культур // Наука Кубани. 2018. № 1. С. 62–69.
19. FieldSpec 3 User Manual. ASD Document No. 600540. ASD. 2010. 110 p.
20. Kokhmetova A., Atishova M., Sapakhova Z., Kremneva O. Yu., Volkova G. V. Evaluation of wheat cultivars growing in Kazakhstan and Russia for resistance to tan spot // J. Plant Pathology. 2017. V. 99. No. 1. P. 161–167.
21. Kolmer J. A. Hughes M. E. Physiologic specialization of *Puccinia triticina* on wheat in the United States in 2012 // Plant Disease. 2014. V. 98. P. 1145–1150.
22. Peterson R. F., Cempbell A. B., Hannah A. E. Diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals // Canadian J. Research. Section A. 1948. No. 26. P. 495–500.

Studies of changes in the spectral characteristics of winter wheat varieties depending on the degree of infection with pathogens

O. Yu. Kremneva¹, O. V. Tutubalina², I. I. Sereda²,
R. Yu. Danilov¹, M. V. Zimin², A. A. Kurilov¹

¹ All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection, Krasnodar 350039, Russia
E-mail: daniloff.roman2011@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: olgatut@mail.ru

The studies were conducted in 2018–2019 in the experimental field of the All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection in Krasnodar and were aimed at identifying information signs of recognizing economically significant pathogens of winter wheat diseases in the early stages of their development. The objects of research were crops of four varieties of winter wheat, which are characterized by varying degrees of resistance to leaf-stem diseases. In areas with wheat crops, artificial and natural infectious backgrounds for the development of the main pathogens were created. Starting with the passage of the predicted incubation period by pathogens, series of daily spectrometric measurements of winter wheat crops were carried out in the electromagnetic radiation range from 350 to 2500 nm with a spectral resolution of 3–10 nm using an ASD FieldSpec 3 Hi-Res spectroradiometer. The first visible changes in the spectral characteristics of the studied plant backgrounds, which manifested themselves in the form of a decrease in the spectral brightness coefficient (CLE) in the near infrared range of the spectrum, were noted by the results of the analysis of the data at the time of the onset of the first signs of disease. It was established that according to the multimodal data of ground-based spectrometry it is possible to detect changes in the state of winter wheat crops in the early stages of pathogen development. The use of time series of the values of the spectral brightness coefficient at a wavelength of 800 nm is proposed, as representative and often used by air and space imaging equipment.

Keywords: spectrometer, ground-based spectrometry, winter wheat, wheat diseases, spectral characteristics

Accepted: 13.05.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-149-161

References

1. Anpilogova L. K., Volkova G. V., *Metody sozdaniya iskusstvennykh infektsionnykh fonov i otsenki ustoichivosti rastenii k opasnym boleznyam (fuzariozu kolosa, rzhavchiny, muchnistoi rose)* (Methods for creating artificial infectious backgrounds and assessing wheat varieties for resistance to harmful diseases (spike fusarium, rust, powdery mildew)), Krasnodar: VNIIBZR RASKHN, 2000, 28 p.
2. Bekmukhamedov N. E., Karabkina N. N., *Izmenenie spektral'nykh kharakteristik rastenii yarovoi pshenitsy, zarazhennykh gribkovymi boleznyami* (Changes in the spectral characteristics of spring wheat plants infected with fungal diseases), *Sel'skoe, lesnoe i vodnoe khozyaystvo*, 2013, No. 10, URL: <http://agro.snauka.ru/2013/10/1169> (accessed 21.01.2014).
3. Volkova G. V., Vaganova O. F., Dolbilova T. A., *Kharakteristika ustoichivosti k buroi rzhavchine sortov myagkoi ozimoi pshenitsy* (The characteristics of winter soft wheat resistance to brown rust), *Zernovoe khozyaystvo Rossii*, 2016, No. 4, pp. 62–67.
4. Volkova G. V., Shulyakovskaya L. N., Kudinova O. A., Matveeva I. P., Zheltaya rzhavchina pshenitsy na Kubani (Yellow rust of wheat in the Kuban), *Zashchita i karantin rastenii*, 2018, No. 4, p. 22.
5. Gurova T. A., Klimenko D. N., Lugovskaya O. S., Elkin O. V., Kozik V. I., *Spektral'nye kharakteristiki sortov pshenitsy pri bioticheskom stresse* (Spectral Characteristics of Wheat Varieties under Biotic Stress), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2019, Vol. 33, No. 10, pp. 71–75.
6. Danilov R. Yu., Ismailov V. Ya., Tret'yakov V. A., Kremneva O. Yu., Shumilov Yu. V., Rizvanov A. A., Krivoshein V. V., Kostenko I. A., *Razrabotka pretsizionnykh tekhnologii fitosanitarnogo monitoringa agroekosistem na osnove ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo giperspektral'nogo zondirovaniya Zemli* (Development of precision technologies of agroecosystems phytosanitary monitoring based on the use of data of remote hyperspectral sensing of the Earth), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2018, Vol. 32, No. 10, pp. 82–86.

7. Zhukovskiy A. G., Il'yuk A. G., Buga S. F., Sklimenok N. A., Kremneva O. Yu., Volkova G. V., Gudoshnikova E. S., Porazhaemost' sortov ozimoi pshenitsy septoriozom (*Septoria spp.*) i zheltoi pyatnistost'yu (*Pyrenophora tritici-repentis*) v usloviyakh Respubliki Belarus' i Severo-Kavkazskogo regiona Rossii (Septoria spot (*Septoria spp.*) and yellow leaf spot (*Pyrenophora tritici-repentis*) affection of winter wheat cultivars in Belarus and north caucasian region of Russia), *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, No. 80, pp. 252–263, URL: <http://agro.snauka.ru/2013/10/1169> (accessed 21.01.2014).
8. Ismailov E. Ya., Nadykta V. D., Ismailov V. Ya., Kostenko I. A., Shvets A. A., Giperspektral'nye issledovaniya porazheniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur fitopatogenami (Hyperspectral Monitoring of Arable Crop Phytopathogen Infestation), *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2012, No. 3(68), pp. 98–103.
9. Kravtsov S. L., Golubtsov D. V., Lisova A. M., Analiz spektral'nykh kanalov dlya distantsionnogo monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti (po zarubezhnym publikatsiyam) (Optimal Spectral Channels of Aerospace Equipment for Vegetation Remote Sensing Monitoring (Foreign Publications Review by the Problem)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 1, pp. 79–91.
10. Kremneva O. Yu., Volkova G. V., Kovalenko N. M., Dinamika rasovogo sostava *Pyrenophora tritici-repentis* v Severo-Kavkazskom regione (The dynamics of the racial composition of *Pyrenophora tritici-repentis* in the North Caucasus region), *Mikologiya i fitopatologiya*, 2019, Vol. 53, No. 4, pp. 246–253.
11. Malakhov D. V., Tsyhuyeva N. Yu., Vitkovskaya I. S., Modelirovanie ekologicheskoi nishi septorioza pshe-nitsy s primeneniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Modelling the ecological niche of wheat septoriososis using remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 113–124.
12. Mitrofanov E. V., Shashnev I. V., Bubnenkov D. I., O primeneniі uzkospektral'nykh vegetatsionnykh indeksov dlya otsenki sostoyaniya lesnoi rastitel'nosti (On the use of narrow-spectrum vegetation indices for assessing the state of forest vegetation), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya "Estestvennyye nauki"*, 2012, No. 4, pp. 118–122.
13. Sanin S. S., Sokolova E. A., Cherkashin V. I., Nazarova L. N., Strizhekozin Yu. A., Ibragimov T. Z., Neklesa N. P., *Bolezni zernovykh kolosovykh kul'tur* (Diseases of cereal crops), Moscow: Rosinformagrotekh, 2010, 139 p.
14. Sokolov Yu. G., Sadkovskiy V. T., Kremneva O. Yu., Danilov R. Yu., Pachkin A. A., Zelenskiy R. A., Kuri-lov A. A., Razrabotka tekhnologii obnaruzheniya ochagov rzhavchinnnykh boleznei pshe-nitsy (Development of technology for detecting foci of wheat rust diseases), *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2018, No. 12-2(78), pp. 29–33.
15. Fedin M. A., *Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* (Methodology of state variety testing of agricultural crops), Moscow: Ministerstvo sel'skogo khozyaistva SSSR, 1985, 285 p.
16. Fedorenko V. F., Mishurov N. P., Nemenushchaya L. A., *Perspektivnyye tekhnologii diagnostiki patogenov sel'skokhozyaistvennykh rastenii: nauchnyi analiticheskii obzor* (Promising technologies for the diagnosis of pathogens of agricultural plants: scientific ed.), Moscow: Rosinformagrotekh, 2018, 68 p.
17. Chenkin A. F., *Metodika po organizatsii i uchetu vrednykh organizmov* (Methodology for organizing and recording pests), Moscow: Tsentr nauchno-tekhnicheskoi informatsii, 1993, 66 p.
18. Shumilov Yu. V., Ermolenko S. A., Savva A. P., Danilov R. Yu., Mkrtchyan A. G., Izuchenie vozmozhnosti ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya distantsionnogo monitoringa zasorennosti posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (The study of the possibility of using unmanned aerial vehicles for remote monitoring of weeds of agricultural crops), *Nauka Kubani*, 2018, No. 1, pp. 62–69.
19. *FieldSpec 3 User Manual*, ASD Document No. 600540, ASD, 2010, 110 p.
20. Kokhmetova A., Atishova M., Sapakhova Z., Kremneva O. Yu., Volkova G. V., Evaluation of wheat cultivars growing in Kazakhstan and Russia for resistance to tan spot, *J. Plant Pathology*, 2017, Vol. 99, No. 1, pp. 161–167.
21. Kolmer J. A., Hughes M. E., Physiologic specialization of *Puccinia triticina* on wheat in the United States in 2012, *Plant Disease*, 2014, Vol. 98, pp. 1145–1150.
22. Peterson R. F., Cempbell A. B., Hannah A. E., Diagrammatic scale for stimating rust intensity on leaves and stems of cereals, *Canadian J. Research, Section A*, 1948, No. 26, pp. 495–500.