



DOI: 10.26898/0370-8799-2018-6-11

УДК: 632.38:633.1: 528.8

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ БОЛЕЗНЕЙ НА ПОСЕВАХ ПШЕНИЦЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (ОБЗОР)

¹Дубровская О.А., ²Гурова Т.А., ¹Пестунов И.А., ³Котов К.Ю.

¹Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

²Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Сибирского отделения
Российской академии наук

Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

³Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

Для цитирования: Дубровская О.А., Гурова Т.А., Пестунов И.А., Котов К.Ю. Методы обнаружения болезней на посевах пшеницы по данным дистанционного зондирования (обзор) // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48. № 6. С. 76–89. DOI: 10.26898/0370-8799-2018-6-11

For citation: Dubrovskaya O.A., Gurova T.A., Pestunov I.A., Kotov K.Yu. Metody obnaruzheniya boleznei na posevakh pshenitsy po dannym distantsionnogo izobrazheniya (obzor) [Methods of detection of diseases on wheat crops according to remote sensing (overview)] *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* [Siberian Herald of Agricultural Science], 2018, vol. 48, no. 6, pp. 76–89. DOI: 10.26898/0370-8799-2018-6-11

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

В настоящее время для мониторинга сельскохозяйственных угодий во многих странах мира широко используются мульти- и гиперспектральные данные дистанционного зондирования. Вопрос их применения для обнаружения и оценки поражений сельскохозяйственных культур вредителями, болезнями и сорняками слабо изучен как в России, так и за рубежом. Выявление на ранних стадиях и точная диагностика различных болезней пшеницы – ключевые факторы в растениеводстве, способствующие снижению качественных и количественных потерь урожая, а также повышению эффективности проведения защитных мероприятий. Представлен обзор современных методов обнаружения болезней и оценки степени поражения культуры по данным дистанционного зондирования посевов пшеницы с использованием оптических съемочных систем, среди которых наиболее перспективной является гиперспектральная съемочная аппаратура. Приведены идентификационные спектры

METHODS OF DETECTION OF DISEASES ON WHEAT CROPS ACCORDING TO REMOTE SENSING (overview)

¹Dubrovskaya O.A., ²Gurova T.A.,
¹Pestunov I.A., ³Kotov K.Yu.

¹Institute of Computational Technologies
of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences

Novosibirsk, Russia

²Siberian Federal Scientific Centre of Agro-
BioTechnologies of the Russian Academy
of Sciences

Krasnoobsk, Novosibirsk, Russia

³Institute of Automation and Electrometry
of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences

Novosibirsk, Russia

Nowadays multi- and hyperspectral data of remote sensing is widely used in many countries worldwide for agricultural lands monitoring. The issue of their application for detection and assessment of infestation of agricultural crops, damage from diseases and weeds is understudied both in Russia and abroad. Early detection and accurate diagnosis of various wheat diseases are key factors in crop production, contributing to the reduction of qualitative and quantitative crop losses, as well as improving the effectiveness of protective measures. The paper presents a review of up-to-date methods for detecting diseases and assessing the

здоровых растений и растений с признаками поражения основными грибными болезнями. Показана взаимосвязь спектров со степенью поражения растений. Для возможности эффективного использования результатов диагностики и выявления заболеваний показана информативность спектральных индексов растительности при выявлении заболеваний. Представлена таблица вегетационных индексов, рассчитанных по значениям коэффициентов отражения в широких и узких спектральных диапазонах при определении болезней пшеницы. Применение оптических методов в мониторинге основных грибных болезней пшеницы позволит точно выявлять очаги поражения посевов, достоверно диагностировать заболевания и степень поражения растений болезнями и обеспечить поддержку принятия решений товаропроизводителями по своевременным и эффективным мерам защиты урожая. Результаты проведенного обзора будут применены для разработки цифровой технологии раннего обнаружения и локализации поражений посевов яровой пшеницы и других сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: болезни пшеницы, дистанционное зондирование, гиперспектральные данные, вегетационные индексы

extent of crop damage by remote sensing of wheat using optical imaging systems, the most promising of which is hyperspectral imaging equipment. The identification spectra of healthy plants and the ones with signs of damage from the main fungal diseases as well as the correlation of spectra with the degree of damage are shown. To be able to effectively use the results of diagnostics and detection of diseases, the informational value of the spectral indices of vegetation in the detection of diseases is presented. A table of vegetation indices is given, calculated from the values of reflection coefficients in wide and narrow spectral ranges when determining wheat diseases. The use of optical methods in the monitoring of the main fungal diseases of wheat will accurately identify lesions of crops, reliably diagnose diseases and the extent of plant damage from diseases, and thereby provide support to agricultural producers in decision-making on timely and effective crop protection measures. The results of the review will be used to develop digital technology of early detection and lesion focalization of spring wheat and other agricultural crops.

Keywords: wheat diseases, remote sensing, hyperspectral data, vegetation indices

ВВЕДЕНИЕ

Болезни наносят серьезный ущерб урожайности и качеству сельскохозяйственных культур во всем мире. По данным ФАО ООН, мировые потери урожая сельскохозяйственных культур составляют 35%, в том числе от болезней – 9,2%, сорняков – 12,0, вредителей – 13,8%. Мировой ежегодный экономический ущерб от вредных организмов оценивается в 300 млрд дол. США¹ [1]. В Российской Федерации потери зерна пшеницы от фитопатогенов составляют в среднем 12,4%, вредителей – 9,3, сорняков – 12,3%, что в сумме означает недополучение одной трети урожая (34%)² [2]. Выявление на ранних стадиях и точная диагностика различных болезней пшеницы будут способствовать снижению качественных и количест-

венных потерь урожая, а также повышению эффективности проведения защитных мероприятий [3, 4].

В настоящее время существуют различные методы выявления болезней на посевах, которые включают не только визуальную оценку степени поражения растений, но и методы дистанционного зондирования с использованием сенсорных датчиков. Прогресс в области создания средств и технологий дистанционного зондирования, а также широкое применение геоинформационных систем открывают новые возможности для принятия правильных и эффективных решений по защите урожая.

Существует большое число неинвазивных датчиков, которые позволяют диагностировать и выявлять заболевания растений.

¹Ажбенов В.К., Костюченков Н.В. Инновация фитосанитарного мониторинга особо опасных вредителей зерновых культур Северного Казахстана на основе геоинформационных и GLONAS / GPS-технологий // Защита растений в современных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур: материалы междунар. науч.-практ. конф. Краснообск, 2013. С. 3–6.

²Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2017 году и прогноз развития вредных объектов в 2018 году / сост. Д.Н. Говоров, А.В. Живых и др.; МСХ РФ; Россельхозцентр. М.: Щелково Агрохим, 2018. 970 с.

При этом для успешного фитосанитарного мониторинга измерения, получаемые с помощью этих датчиков, должны обеспечивать возможность решить следующие задачи [5, 6]:

- обнаружение заболеваний в ранние моменты времени;
- дифференциацию различных заболеваний;
- разделение болезней, вызванных абиотическими стрессами;
- количественное определение тяжести заболевания.

В настоящее время принципиально новые технологические возможности для идентификации различных заболеваний могут быть обеспечены благодаря использованию гиперспектральной съемочной аппаратуры.

В статье представлен обзор работ, в которых рассматриваются возможности использования данных дистанционного зондирования для обнаружения и идентификации болезней на посевах пшеницы.

В работах [7, 8] показана применимость гиперспектральных данных для идентифи-

кации полосатой и листовой ржавчины на различных стадиях заболевания (инкубационный период, стадия болезни). Исследования проведены на опытных полигонах экспериментальной станции Кайфэн Китайского сельскохозяйственного университета провинции Хэнань. Спектральные характеристики листьев пшеницы регистрировали в диапазоне длин волн 325–1075 нм с использованием спектрорадиометра ASD FieldSpec HandHeld 2.

Наибольшие различия между спектрами разных стадий развития полосатой и листовой ржавчины пшеницы наблюдали в диапазоне 720–1075 нм (см. рис. 1). Отражательная способность для полосатой и листовой ржавчины пшеницы в инкубационный период и период появления симптомов болезни значительно возрастала по сравнению со здоровыми растениями. Установлено увеличение спектральной отражательной способности колосьев пшеницы, инфицированных полосатой ржавчиной по сравнению с листовой как в период инкубации, так и в период появления симптомов болезни.

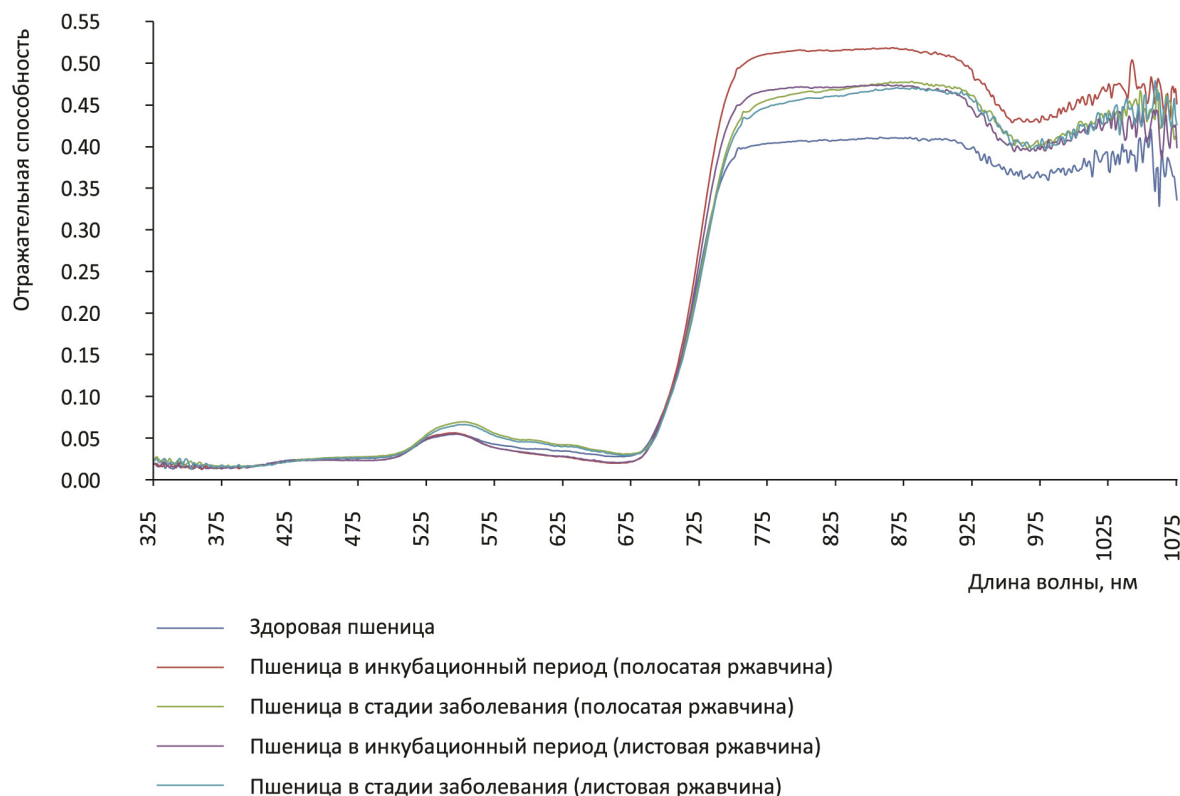


Рис. 1. Спектральные кривые в различных стадиях развития полосатой и листовой ржавчины пшеницы

Fig. 1. Spectral curves in different stages of wheat stripe rust and wheat leaf rust

В работе [9] отмечены различия спектральных характеристик здоровой и пораженной листовой ржавчиной пшеницы, полученные с высоким спектральным разрешением около 1,5 нм на Краснодарском полигоне ВНИИБЗР в 2010 г. Установлены информативные области спектра 600–700 нм и 1000–1100 нм, в которых яркость отраженного излучения здоровой и пораженной пшеницы (с разной степенью поражения) значительно различается, в то время как в области 750 нм этот параметр одинаков. Указанные особенности спектральных сигнатур возможно выявить только с использованием гиперспектрометров. Кроме этого, показана дополнительная возможность определения важного параметра – содержания влаги в растениях по полосам H_2O – 723 и 944 нм.

В работе³ проведены исследования деланочных посевов яровой пшеницы, пораженных септориозом, гельминтоспориозом, бурой, желтой и стеблевой ржавчиной, пятнистостью, в ходе которых получены спектральные характеристики заболеваний на максимальной стадии развития болез-

ни (см. рис. 2). В ней представлены также результаты мониторинга бурой листовой ржавчины пшеницы в течение полевого сезона (см. рис. 3). Для указанных исследований отобраны спектральные образцы на начальной, средней и максимальной стадиях развития грибковых болезней яровой пшеницы. Для проведения полевых спектрометрических измерений использован портативный спектрорадиометр модели ASD FieldSpec HandHeld 2, который позволяет получать спектры отражения солнечного света от наблюдаемой площадки в диапазоне 325–1075 нм.

Согласно работам [10–12], чтобы определить тяжесть заболевания (степень поражения) с высокой точностью, необходимо независимо от симптома болезни найти отношение площади зараженной части листа к неинфицированной его части с использованием данных дистанционного зондирования. Область листа, пораженная листовой ржавчиной, проявляется в виде пятен различных оттенков (симптомов). Обнаружено,

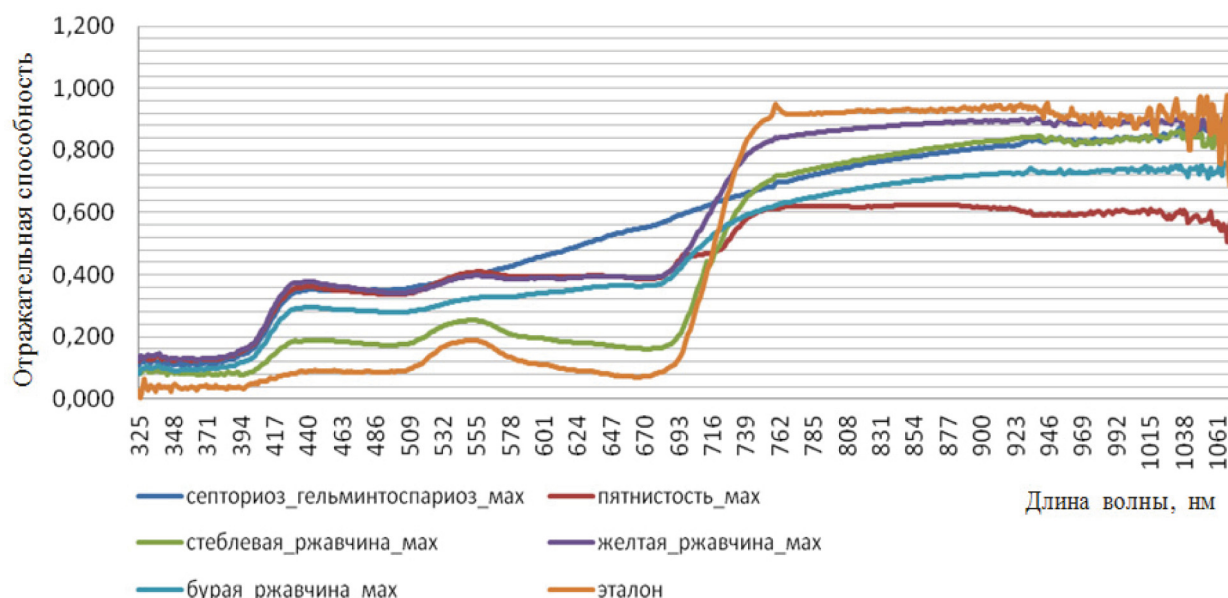


Рис. 2. Спектральные кривые посевов яровой пшеницы, пораженных различными болезнями на максимальной стадии развития

Fig. 2. Spectral curves of spring wheat crops affected by different diseases in the maximum stage of development

³Бекмухамедов Н.Э., Карабкина Н.Н. Изменение спектральных характеристик растений яровой пшеницы пораженных грибковыми болезнями // Сельское, лесное и водное хозяйство. 2013. № 10. URL: <http://agro.snauka.ru/2013/10/1169>

что разным симптомам болезни соответствуют определенные спектры [11]. На рис. 4 представлены спектральные характеристики здорового листа и листьев с различными симптомами при заболевании листовой ржавчиной пшеницы [11, 12]. Образцы проб

с различной степенью поражения снимали двумя камерами. Для измерения спектральной отражательной способности зараженных листьев ржавчины использовали спектрорадиометр компании ASD (Boulder, CO, USA). Спектры получены в диапазоне

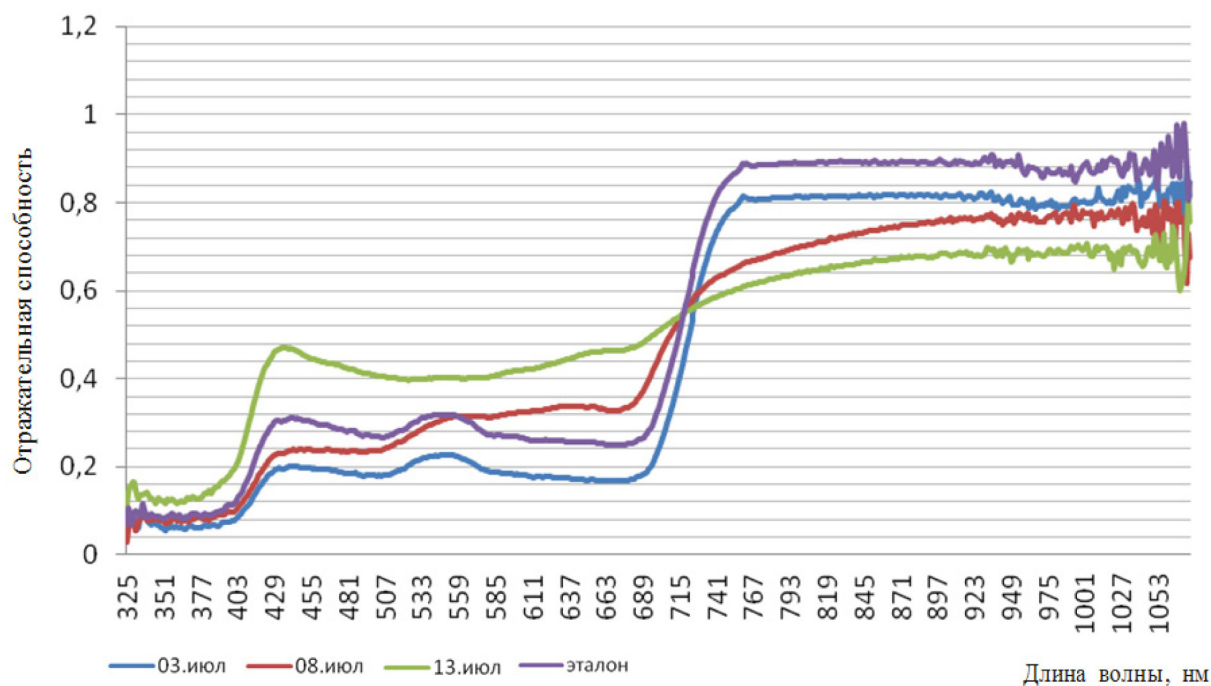


Рис. 3. Спектральные кривые посевов яровой пшеницы, зараженных бурой ржавчиной, в разные периоды съемки

Fig. 3. Spectral curves of spring wheat crops affected by brown rust in different periods of imaging

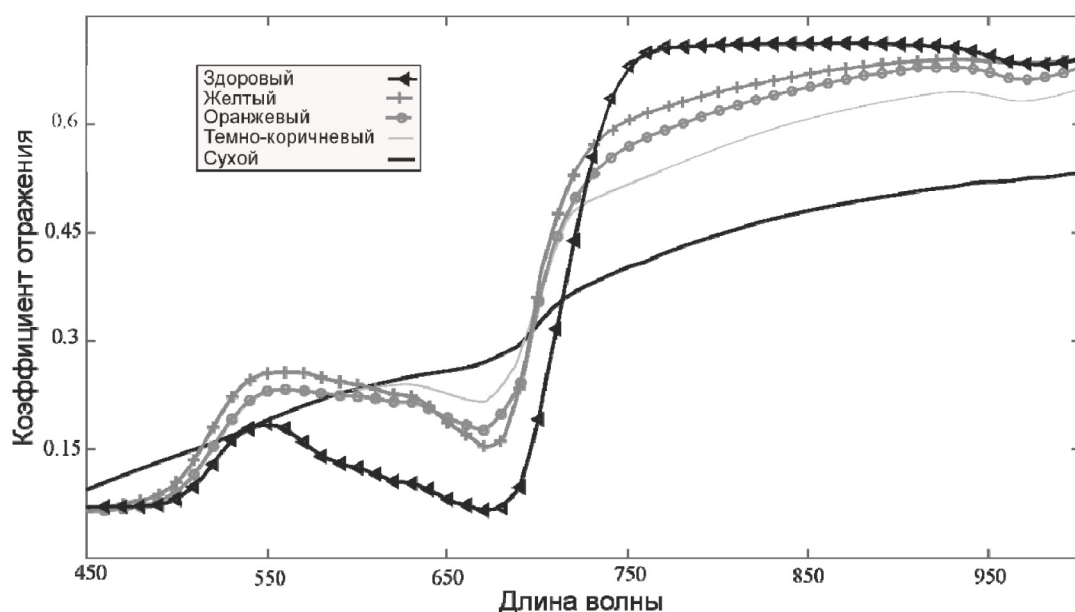


Рис. 4. Спектральные кривые здорового листа и листьев с различными симптомами при заболевании листовой ржавчиной пшеницы

Fig. 4. Spectral curves of a healthy wheat leaf and leaves with different symptoms of leaf rust

350–2500 нм. Использована также цифровая RGB-камера Canon DIGITAL IXUS 85 IS.

В лабораторных и полевых условиях получены результаты измерений спектральных характеристик отдельно взятых листьев пшеницы, пораженных желтой ржавчиной, а также исследованы симптомы этого заболевания на листьях разных ярусов [13, 14]. Полевые измерения проводили на четырех разных участках фермы «Duck End farm» (Уилстед, Бедфордшир, Великобритания) с использованием спектрографа (спектральная камера HS, модель Gilden Photonics Ltd., Великобритания), установленном на тракторе с помощью металлической рамы. Для выявления степени поражения листовой ржавчиной листьев разных ярусов в онлайн режиме использована регрессионная модель на основе метода наименьших квадратов (PLSR), позволяющая исследовать пространственные изменения степени поражения пшеницы и ячменя для эффективного применения фунгицида, а также в случае заболевания фузариозом для картирования мест здоровых и зараженных культур.

В работе [15] установлено, что спектральная яркость постепенно может увеличиваться в видимой и коротковолновой инфракрасной области спектра (SWIR), а в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR) уменьшаться. Предложен спектральный индекс YRSI (индекс желтой ржавчины) для количественной оценки заболевания с использованием наиболее чувствительных полос в областях видимого спектра (704 нм), NIR (1423 нм) и SWIR (1926 нм). Данные получены с помощью переносного полевого спектрорадиометра ASD FieldSpec Pro FR.

Успешный опыт использования хлорофилл-флуоресцентного и гиперспектрального анализа для прогнозирования и оценки поражения колоса пшеницы фузариозом описан авторами в работе [16]. При фузариозе колоса очень важно распознавать зараженные зерна в колосе при созревании, поскольку попадание больных зерен в соб-

ранный урожай приведет к непригодности использования большей его части. Для определения фузариоза на ранних стадиях использованы два спектральных диапазона шириной по 10 нм (665–675 и 550–560). Данные диапазоны отражают изменения основных фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) и позволяют идентифицировать пораженные инфекцией места. Предложенный подход при анализе хлорофилл-флуоресцентных и многоспектральных изображений повышает эффективность обнаружения фузариозной инфекции на посевах пшеницы.

Различия отражательных характеристик здоровых и пораженных болезнями зерновых культур в определенных зонах спектра послужили основой для распознавания их особенностей с помощью вегетационных индексов.

К настоящему времени в ряде работ [7, 8, 11, 17–29] предложено несколько десятков различных вегетационных индексов для обнаружения и диагностики болезней на посевах зерновых культур. В таблице представлены вегетационные индексы, рассчитываемые по значениям спектральной яркости в широких и узких спектральных диапазонах для идентификации различных заболеваний посевов пшеницы и определения степени поражения.

В работе⁴ рассмотрен нормализованный вегетационный индекс $NDVI_{705}$, который является модификацией традиционного вегетационного индекса NDVI широкополосного доступа для выявления стресса, изменения содержания хлорофилла и каротина. На начальной стадии развития грибковых болезней яровой пшеницы (бурой, желтой, стеблевой ржавчины, пятнистости) значения индекса находятся в пределах 0,35–0,45, на максимальной – приближается к 0,2 и ниже, что указывает на полное отмирание растений. Для учета края красного участка спектра предложен индекс mSR_{705} , представляющий собой модификацию традиционного SR

⁴Бекмухамедов Н.Э., Карабкина Н.Н. Определение изменений содержания пигментов в посевах яровой пшеницы, зараженных грибковыми болезнями по гиперспектральным данным // Сельское, лесное и водное хозяйство. 2013. № 11. [Электронный ресурс]. URL: <http://agro.snauka.ru/2013/11/1205>

Вегетационные индексы, используемые при идентификации болезней пшеницы
Vegetation indices used for identification of wheat diseases

Индекс	Название индекса	Формула*	Болезни и вредители
1	2	3	4
DVI (Difference Vegetation Index)	Разностный вегетационный индекс	$R_{NIR} - R_R$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, желтая ржавчина [8, 18, 23, 26]
RV1 (Ratio Vegetation Index)	Относительный вегетационный индекс	$\frac{R_{NIR}}{R_R}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, желтая ржавчина [8, 18, 22, 23, 26]
mSR ₇₀₅ (Modified Red Edge Simple Ratio Index)	Модифицированный относительный индекс в крайнем красном спектре	$\frac{R_{750} - R_{445}}{R_{750} + R_{445}}$	Желтая ржавчина, листовая ржавчина, стеблевая ржавчина, пятнистость, септориоз [20, 4]
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	Нормализованный разностный вегетационный индекс	$\frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}, \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670}}$	Универсальный индикатор наличия зеленой зрелой растительности [8, 11, 17, 18, 22-24, 26, 27]
NDVI ₇₀₅ (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	Нормализованный разностный вегетационный индекс в крайнем красном спектре	$\frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705}}$	Желтая ржавчина, листовая ржавчина, стеблевая ржавчина, пятнистость, септориоз [20, 4]
mNDVI ₇₀₅ (Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index)	Модифицированный нормализованный разностный вегетационный индекс	$\frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705} - 2R_{445}}$	Желтая ржавчина, листовая ржавчина, стеблевая ржавчина, пятнистость, септориоз [20, 4]
GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	Нормализованный разностный вегетационный индекс зелени	$\frac{R_{NIR} - R_G}{R_{NIR} + R_G}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина [18, 23, 26, 29]
NBNDVI (Narrow-Band Normalized Difference Vegetation Index)	Узкополосный нормализованный разностный вегетационный индекс	$\frac{R_{850} - R_{680}}{R_{850} + R_{680}}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина [11, 26, 29]
NRI (Nitrogen Reflectance Index)	Азотный отражательный индекс	$\frac{R_{570} - R_{670}}{R_{570} + R_{670}}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина [11, 26, 29]
RV/SI (Red-Edge Vegetation Stress Index)	Вегетационный индекс состояния в крайнем красном спектре	$\frac{R_{712} + R_{752} - R_{732}}{2}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, желтая ржавчина [8, 26, 29]
PSRI (Plant Senescence Reflectance Index)	Индекс отражения опрубевшего углерода в растительных тканях	$\frac{R_R - R_G}{R_{NIR}}, \frac{R_{678} - R_{500}}{R_{730}}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина [7, 20, 23, 24, 26, 29]
ARI (Anthocyanin Reflectance Index)	Антоциановый отражательный индекс	$\frac{1}{R_{550}} - \frac{1}{R_{700}}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, тля [7, 11, 26, 29]

PRI (Photochemical/Physiological Reflectance Index)	Фотохимический индекс отражения	$\frac{R_{31} - R_{70}}{R_{31} + R_{70}}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, тля, желтая ржавчина, стеблевая ржавчина, пятнистость, септориоз [7, 8, 11, 20, 23, 24, 29]
SIP1 (Structural Independent Pigment Index)	Структурный индекс интенсивности пигментов	$\frac{R_{800} - R_{445}}{R_{800} + R_{680}}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, желтая ржавчина, стеблевая ржавчина, пятнистость, септориоз [8, 11, 20, 24, 29]
PhRI (Physiological Reflectance Index)	Индекс физиологического отражения	$\frac{R_{530} - R_{531}}{R_{530} + R_{531}}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, желтая ржавчина [8, 11, 26, 29]
NPCI (Normalized Pigment Chlorophyll Index)	Нормализованный индекс поглощения хлорофиллом	$\frac{R_{680} - R_{430}}{R_{680} + R_{430}}$	Листовая ржавчина, желтая ржавчина [8, 11, 29]
MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index)	Модифицированный относительный индекс поглощения хлорофиллом	$3 \left[(R_{701} - R_{671}) - 0,2(R_{701} - R_{549}) \frac{R_{701}}{R_{671}} \right]$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, желтая ржавчина [8, 22, 26, 29]
TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption And Reflectance Index)	Трансформированный относительный индекс поглощения хлорофиллом	$3 \left[(R_{700} - R_{670}) - 0,2(R_{700} - R_{550}) \frac{R_{700}}{R_{670}} \right]$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, желтая ржавчина [11, 22, 23, 26, 29]
GI (Green Index)	Индекс зелени	$\frac{R_{554}}{R_{667}}$	Листовая ржавчина [4, 5]
TVI (Triangular Vegetation Index)	Треугольный вегетационный индекс	$0,5[120(R_{NIR} - R_G) - 200(R_R - R_G)];$ $0,5[120(R_{750} - R_{550}) - 200(R_{670} - R_{550})]$	Листовая ржавчина, желтая ржавчина [7, 11, 22, 29]
TCI (Triangular Chlorophyll Index)	Треугольный индекс поглощения хлорофиллом	$1,2(R_{700} - R_{550}) - 1,5(R_{670} - R_{550}) \sqrt{\frac{R_{700}}{R_{670}}}$	Листовая ржавчина, желтая ржавчина [7, 11, 22, 29]
TGI (Triangular Greenness Index)	Треугольный индекс зелени	$0,5[(\lambda_R - \lambda_B)(R_R - R_G) - (\lambda_R - \lambda_G)(R_R - R_B)]$	Листовая ржавчина, желтая ржавчина [7, 11, 22, 29]
MTVI1 (Modified Triangular Vegetation Index 1)	Модифицированный треугольный вегетационный индекс (1)	$1,2[1,2(R_{800} - R_{550}) - 2,5(R_{670} - R_{550})]$	Листовая ржавчина, желтая ржавчина [7, 18, 22]
MTVI2 (Modified Triangular Vegetation Index 2)	Модифицированный треугольный вегетационный индекс (2)	$\frac{1,2(R_{800} - R_{550}) - 2,5(R_{670} - R_{550})}{\sqrt{(2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5\sqrt{R_{670} - 0,5})}}$	Листовая ржавчина, желтая ржавчина [7, 18, 22]

Окончание таблицы

1	2	3	4
OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	Оптимизированный почвенно-вегетационный индекс	$1,16 \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 1,6}$	Мучнистая роса, листовая ржавчина, желтая ржавчина, стеблевая ржавчина, пятнистость, септориоз [18, 22, 23]
NDREI (Normalized Difference Red Edge Index)	Нормализованный разностный индекс в крайнем красном спектре	$\frac{R_{NIR} - R_{RE}}{R_{NIR} + R_{RE}}$	Листовая ржавчина, желтая ржавчина [22]
HI (Health Index)	Индекс здоровой растительности	$\frac{R_{739} - R_{402}}{R_{739} + R_{402}} - 0,5R_{403}$	Здоровые растения [28]
PMI (Powdery Mildew Index)	Индекс мучнистой росы	$\frac{R_{515} - R_{698}}{R_{515} + R_{698}} - 0,5R_{738}$	Мучнистая роса [28]
YRI (Yellow Rust Index)	Индекс желтой ржавчины	$\frac{R_{730} - R_{419}}{R_{730} + R_{419}} - 0,5R_{736}$	Желтая ржавчина [28]
AI (Aphids Index)	Индекс тли	$\frac{R_{400} - R_{735}}{R_{400} + R_{735}} - 0,5R_{403}$	Тля [28]
LRDSI_1 (Leaf Rust Disease Severity Index 1)	Индекс поражения листовой ржавчиной (1)	$6,9 \frac{R_{605}}{R_{455}} - 1,2$	Листовая ржавчина [11, 24]
LRDSI_2 (Leaf Rust Disease Severity Index 2)	Индекс поражения листовой ржавчиной (2)	$4,2 \frac{R_{695}}{R_{455}} - 0,38$	Листовая ржавчина [11]

широкополосного доступа. Значения mSR_{705} находятся в диапазоне от 0 до 30. Изменение предложенного индекса на начальной стадии развития болезней колеблется в пределах 3,7–7,1. При максимальной стадии развития болезней значения индекса менее 3,5. Также предложен вегетационный индекс $mNDVI_{705}$, который представляет модификацию индекса $NDVI_{705}$ и при его расчете использован край синего участка спектра. Значения индекса находятся в пределах 0,59–0,75. На начальной стадии развития болезней особых изменений не отмечено, с увеличением степени поражения болезнями происходят резкие изменения индекса, которые во многом зависят от вида фитопатогена. Установлено, что $NDVI_{705}$ на максимальной стадии развития болезней посевов хорошо коррелирует со значениями фотохимического индекса отражения PRI. На максимальной и средней стадиях развития болезней отмечена прямая зависимость индекса mSR_{705} от эффективности использования световой энергии PRI, а также от вида фитопатогена и характера протекания болезней. Зависимость фотохимического индекса отражения PRI от вегетационного индекса $mNDVI_{705}$ на начальной стадии развития болезней дает возможность выявить заражение без визуальных признаков болезней. Индекс $mNDVI_{705}$ в сочетании с индексом отражения SIPI также позволяет определить заражение на ранней стадии развития болезней.

В работе [21] представлен набор вегетационных гиперспектральных индексов, который позволяет установить состояние сельскохозяйственных угодий. Он сформирован в исследованиях Агрофизического института РАН^{5,6} и адаптирован для использования в погоднo-климатических условиях Северо-Западного региона. Представленные индексы широко используются сервисами для расширения функциональности средств информационных систем «Созвездие-Вега» ИКИ РАН.

В работе [28] предложено несколько индексов для идентификации заболеваний: ин-

декс PMI для обнаружения мучнистой росы, индекс YRI – желтой ржавчины, индекс AI – тли, индекс HI использовался для оценки состояния здоровой растительности. Точность классификации по предложенным индексам здоровых листьев и листьев, инфицированных мучнистой росой, желтой ржавчиной и поврежденных тлей, составила 86,5; 85,2; 91,6 и 93,5% соответственно. Опыты проводили с использованием гиперспектрометра ASD FieldSpec на сельскохозяйственной экспериментальной базе Хяотангшан (Xiaotangshan) в районе Чанпин (Пекин, Китай).

В работе [29] получена оценка влияния различных симптомов листовой ржавчины на значения спектральных индексов растительности и предложена их классификация для выявления различных стадий заболевания. Всего исследовано 22 спектральных индекса, которые были разделены на три группы в зависимости от их точности при выявлении заболеваний. Первая группа индексов (NBNDVI, NDVI, PRI, GI и RVSI) при классификации показала точность более 60%, вторая и третья – около 40 и 20% соответственно. Для определения степени поражения листовой ржавчиной предложены индексы LRDSI_1 и LRDSI_2 и проведено их сравнение с другими распространенными спектральными вегетационными индексами. Эти индексы разработаны на основе коэффициента отражения на длинах волн 605, 695 и 455 нм. Для индексов LRDSI_1 и LRDSI_2 критерий Фишера (R^2) между оцениваемым и наблюдаемым результатами равен 0,94.

Проведенный анализ работ показывает, что в настоящее время наряду с методами визуальной идентификации болезней и оценки степени поражения зерновых культур применяются методы дистанционного зондирования с помощью оптических датчиков, среди которых наиболее перспективными являются гиперспектральные.

В обзоре представлены идентификационные спектры здоровых растений, а также спектры растений с признаками поражения

⁵Yakushev V.P., Kanash E.V., Osipov Yu.A. Optical Criteria in Estimating Deficiency of Basic Macroelements and Plant Fertilizer Requirements // EFITA-WCCA-CIGR Conference “Sustainable Agriculture through ICT Innovation”. Turin, 2013. <http://www.cigr.org/Proceedings/uploads/2013/0217.pdf>

⁶Канаши Е.В. Основные характеристики агрофитоценозов для дешифрования спектральных данных дистанционного зондирования // Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве: материалы Всерос. науч. конф. СПб.: АФИ, 2015. С. 25–28.

основными грибными болезнями, их взаимосвязь со степенью поражения. Показана информативность спектральных характеристик и вегетационных индексов при диагностике и выявлении заболеваний растений. Представлена таблица вегетационных индексов, рассчитанных по значениям коэффициентов отражения в широких и узких спектральных диапазонах для определения болезней пшеницы.

Применение оптических методов в мониторинге болезней пшеницы позволит точно выявлять очаги поражения посевов, достоверно диагностировать заболевания и степень поражения растений и обеспечить поддержку принятия управленческих решений по своевременным и эффективным мерам защиты урожая.

Результаты проведенного обзора будут применены для разработки цифровой технологии раннего обнаружения и локализации поражений посевов яровой пшеницы и других сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Койшыбаев М. Болезни пшеницы: монография. Анкара: ФАО, 2018. 365 с.
2. Кекало А.Ю., Немченко В.В., Заргарян Н.Ю., Цыпышева М.Ю. Защита зерновых культур от болезней. Куртамыш: ООО «Куртамышская типография», 2017. 172 с.
3. Методы фитосанитарного мониторинга и прогноза / под ред. И.Я. Гричанова. 2-е изд. СПб.: ВИЗР РАСХН, 2013. 128 с.
4. Попова Л.И. Своевременный мониторинг – основа успешной защиты растений // Защита растений. 2018. № 4. С. 8–10.
5. Yang G., Liu J., Zhao C., Li Z., Huang Y., Yu H., Xu B., Yang X., Zhu D., Zhang X. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives // *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. 1111 p. DOI: 10.3389/fpls.2017.01111
6. Mahlein A.K. Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping // *Plant Disease*. 2016. Vol. 100. N 2. P. 241–251.
7. Wang H., Qin F., Liu Q., Ruan L., Wang R., Ma Z., Li X. Identification and disease index inversion of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on hyperspectral data at canopy level // *Journal of Spectroscopy*. 2015. Vol. 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/651810>
8. Wang H., Qin F., Ruan L., Wang R., Liu Q., Ma Z., Li X., Cheng P. Identification and Severity Determination of Wheat Stripe Rust and Wheat Leaf Rust Based on Hyperspectral Data Acquired Using a Black-Paper-Based Measuring Method // *PLOS ONE*. 2016. Vol. 11. N 4.
9. Исмаилов Э.Я., Надыкта В.Д. Гиперспектральные исследования поражения сельскохозяйственных культур фитопатогенами // *Космонавтика и ракетостроение*. 2012. № 3. С. 98–103.
10. Mahlein A.K., Steiner U., Hillnhütter C., Dehne H.W., Oerke E.C. Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases // *Plant Methods*. 2012. Vol. 8. N 1. P. 3.
11. Ashourloo D., Mobasheri M.R., Huete A. Developing two spectral disease indices for detection of wheat leaf rust (*Puccinia triticina*) // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. N 6. P. 4723–4740.
12. Ashourloo D., Matkan A.A., Huete A., Aghighi H., Mobasheri M.R. Developing an index for detection and identification of disease stages // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2016. Vol. 13. N 6. P. 851–855.
13. Whetton R.L., Hassall K.L., Waine T.W., Mouazen A.M. Hyperspectral measurements of yellow rust and fusarium head blight in cereal crops: Part 1: Laboratory study // *Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 166. P. 101–115.
14. Whetton R.L., Waine T.W., Mouazen A.M. Hyperspectral measurements of yellow rust and fusarium head blight in cereal crops: Part 2: On-line field measurement // *Biosystems engineering*. 2018. Vol. 167. P. 144–158.
15. Lin-Sheng H., Ju S.C., Jin-Ling Z., Dong-Yan Z., Teng L., Yang F. Hyperspectral measurements for estimating vertical infection of yellow rust on winter wheat plant // *International Journal of Agriculture and Biology*. 2015. Vol. 17. N 6.
16. Bauriegel E., Herppich W.B. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging for early detection of plant diseases, with special reference to Fusarium spec. infections on wheat // *Agriculture*. 2014. Vol. 4. N 1. P. 32–57.
17. Zheng Q., Cui X., Huang W., Shi Y. New Spectral Index for Detecting Wheat Yellow Rust Using Sentinel-2 Multispectral Imagery // *Sensors*. 2018. Vol. 18. N 3. P. 868.
18. Yao X., Wang N., Cheng T., Tian Y., Chen Q., Zhu Y. Estimation of wheat LAI at middle to high levels using unmanned aerial vehicle narrowband multispectral imagery // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. N 12. P. 1304.
19. Mashaba Z., Chirima G., Botai J., Combrinck L., Munghemezulu C. Evaluating spectral indices

- for winter wheat health status monitoring in Bloemfontein using Lsat 8 data // *South African Journal of Geomatics*. 2016. Vol. 5. N 2. P. 227–243.
20. Al-Gaadi K.A., Patil V., Tola E., Madugundu R., Marey S. In-season assessment of wheat crop health using vegetation indices based on ground measured hyper spectral data // *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2014. Vol. 9. N 2. P. 138–146.
21. Саворский В.П., Кашицкий А.В., Константинова А.М., Балаилов И.В., Крашенинникова Ю.С., Толтин В.А. Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 3. С. 28–45.
22. Hunt E.R., Eitel J., Daughtry C., Long D. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index // *Agronomy Journal*. 2011. Vol. 103. N 4. P. 1090–1099.
23. Yang G., Zhao C., Liu J. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives // *Frontiers in plant science*. 2017. Vol. 8. P. 1111.
24. Lowe A., Harrison N., French A.P. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress // *Plant methods*. 2017. Vol. 13. N 1. P. 80.
25. Yue J. A Comparison of Regression Techniques for Estimation of Above-Ground Winter Wheat Biomass Using Near-Surface Spectroscopy // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. N 1. P. 66.
26. Cao X., Luo Y., Yilin Z., Fan J., Xu X., West J.S., Duan X., Cheng D. Detection of powdery mildew in two winter wheat plant densities and prediction of grain yield using canopy hyperspectral reflectance // *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10. N 3.
27. Du M., Noguchi N. Monitoring of wheat growth status and mapping of wheat yield's within-field spatial variations using color images acquired from UAV-camera system // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. N 3. P. 289.
28. Huang W., Guan Q., Luo J., Zhang J., Zhao J., Liang D. New optimized spectral indices for identifying and monitoring winter wheat diseases // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. Vol. 7. N 6. P. 2516–2524.
29. Ashourloo D., Mobasheri M.R., Huete A. Evaluating the effect of different wheat rust disease symptoms on vegetation indices using hyperspectral measurements // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. N 6. P. 5107–5123.

REFERENCES

1. Koishybaev M. *Bolezni pshenitsy* [Diseases of wheat]. Ankara: FAO, 2018, 365 p. (In Russian).
2. Kekalo A.Yu., Nemchenko V.V., Zargaryan N.Yu., Tsypysheva M.Yu. *Zashchita zernovykh kul'tur ot boleznei* [Protection of crops from diseases]. Kurtamysh: OOO «Kurtamyshskaya tipografiya» Publ., 2017, 172 p. (In Russian).
3. *Metody fitosanitarnogo monitoringa i prognoza / pod red. I.Ya. Grichanova* [Methods of phytosanitary monitoring and forecast / edited by I.Ya. Grichanova], 2-e izd. SPb.: VIZR RASKhN Publ., 2013, 128 p. (In Russian).
4. Popova L.I. Svoevremennyy monitoring – osnova uspekhov zashchity rastenii [Timely monitoring – the basis of successful plant protection] *Zashchita rastenii* [Plant Protection], 2018, no. 4, pp. 8–10. (In Russian).
5. Yang G., Liu J., Zhao C., Li Z., Huang Y., Yu H., Xu B., Yang X., Zhu D., Zhang X. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2017. vol. 8, 1111 p. DOI: 10.3389/fpls.2017.01111
6. Mahlein A.K. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 2016, vol. 100, no. 2, pp. 241–251.
7. Wang H., Qin F., Liu Q., Ruan L., Wang R., Ma Z., Li X. Identification and disease index inversion of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on hyperspectral data at canopy level. *Journal of Spectroscopy*, 2015, vol. 2015, URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/651810>
8. Wang H., Qin F., Ruan L., Wang R., Liu Q., Ma Z., Li X., Cheng P. Identification and Severity Determination of Wheat Stripe Rust and Wheat Leaf Rust Based on Hyperspectral Data Acquired Using a Black-Paper-Based Measuring Method. *PLOS ONE*, 2016, vol. 11, no. 4.
9. Ismailov E.Ya., Nadykta V.D. Giperspektral'nye issledovaniya porazheniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur fitopatogenami [Hyperspectral studies of crop damage by phytopathogens]. [*Kosmonavtika i raketostroyeniye* [Astronautics and Rocket Science], 2012, vol. 3, no. 3, pp. 98–103.
10. Mahlein A.K., Steiner U., Hillnhütter C., Dehne H.W., Oerke E.C. Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. *Plant Methods*, 2012, vol. 8, no. 1, pp. 3.
11. Ashourloo D., Mobasheri M.R., Huete A. Developing two spectral disease indices for detec-

- tion of wheat leaf rust (*Puccinia triticina*). *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 4723–4740.
12. Ashourloo D., Matkan A.A., Huete A., Aghighi H., Mobasher M.R. Developing an index for detection and identification of disease stages. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, vol. 13, no. 6, pp. 851–855.
13. Whetton R.L., Hassall K.L., Waine T.W., Mouazen A.M. Hyperspectral measurements of yellow rust and fusarium head blight in cereal crops: Part 1: Laboratory study. *Biosystems Engineering*, 2018, vol. 166, pp. 101–115.
14. Whetton R.L., Waine T.W., Mouazen A.M. Hyperspectral measurements of yellow rust and fusarium head blight in cereal crops: Part 2: On-line field measurement. *Biosystems engineering*, 2018, vol. 167, pp. 144–158.
15. Lin-Sheng H., Ju S.C., Jin-Ling Z., Dong-Yan Z., Teng L., Yang F. Hyperspectral measurements for estimating vertical infection of yellow rust on winter wheat plant. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2015, vol. 17, no. 6.
16. Bauriegel E., Herppich W.B. Hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging for early detection of plant diseases, with special reference to Fusarium spec. infections on wheat. *Agriculture*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 32–57.
17. Zheng Q., Cui X., Huang W., Shi Y. New Spectral Index for Detecting Wheat Yellow Rust Using Sentinel-2 Multispectral Imagery. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 868.
18. Yao X., Wang N., Cheng T., Tian Y., Chen Q., Zhu Y. Estimation of wheat LAI at middle to high levels using unmanned aerial vehicle narrowband multispectral imagery. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 12, pp. 1304.
19. Mashaba Z., Chirima G., Botai J., Combrinck L., Munghemezulu C. Evaluating spectral indices for winter wheat health status monitoring in Bloemfontein using Lsat 8 data. *South African Journal of Geomatics*, 2016, vol. 5, no. 2, pp. 227–243.
20. Al-Gaadi K.A., Patil V., Tola E., Madugundu R., Marey S. In-season assessment of wheat crop health using vegetation indices based on ground measured hyper spectral data. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 138–146.
21. Savorskii V.P., Kashnitskii A.V., Konstantinova A.M., Balashov I.V., Krashenninnikova Yu.S., Tolpin V.A. Vozmozhnosti analiza giperspektral'nykh indeksov v informatsionnykh sistemakh distantsionnogo monitoringa semeistva «Sozvezdie-Vega» [Possibilities of analyzing hyperspectral indices in information systems of the remote monitoring of the «Constellation-Vega» family]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2016, vol. 13, no. 3, pp. 28–45.
22. Hunt E.R., Eitel J., Daughtry C., Long D. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy Journal*, 2011, vol. 103, no. 4, pp. 1090–1099.
23. Yang G., Zhao C., Liu J. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Frontiers in plant science*, 2017, vol. 8, pp. 1111.
24. Lowe A., Harrison N., French A.P. Hyperspectral image analysis techniques for the detection and classification of the early onset of plant disease and stress. *Plant methods*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 80.
25. Yue J. A Comparison of Regression Techniques for Estimation of Above-Ground Winter Wheat Biomass Using Near-Surface Spectroscopy. *Remote Sensing*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 66.
26. Cao X., Luo Y., Yilin Z., Fan J., Xu X., West J. S., Duan X., Cheng D. Detection of powdery mildew in two winter wheat plant densities and prediction of grain yield using canopy hyperspectral reflectance. *PIOS ONE*, 2015, vol. 10, no. 3.
27. Du M., Noguchi N. Monitoring of wheat growth status and mapping of wheat yield's within-field spatial variations using color images acquired from UAV-camera system. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 289.
28. Huang W., Guan Q., Luo J., Zhang J., Zhao J., Liang D. New optimized spectral indices for identifying and monitoring winter wheat diseases. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 2516–2524.
29. Ashourloo D., Mobasher M.R., Huete A. Evaluating the effect of different wheat rust disease symptoms on vegetation indices using hyperspectral measurements. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 5107–5123.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дубровская О.А., кандидат физико-математических наук; Институт вычислительных технологий СО РАН; Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, e-mail: dubrovskaya_oa@list.ru

(✉) **Гурова Т.А.**, кандидат сельскохозяйственных наук; Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий СО РАН; **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, СФНЦА РАН, а/я 463; e-mail: guro-tamara@yandex.ru

Пестунов И.А., кандидат физико-математических наук; Институт вычислительных технологий СО РАН; Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6

Котов К.Ю., кандидат технических наук, Институт автоматики и электрометрии СО РАН; Россия, 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1

Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке комплексной программы фундаментальных исследований Сибирского отделения Российской академии наук «Междисциплинарные интеграционные исследования» на 2018–2020 гг. по проекту «Разработка цифровых технологий раннего обнаружения и локализации поражений посевов сельскохозяйственных культур».

AUTHOR INFORMATION

Dubrovskaya O.A., Candidate of Science in Physics and Mathematics; Institute of Computational Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; **address:** 6, Academician M.A. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia e-mail: dubrovskaya_oa@list.ru

(✉) **Gurova T.A.**, Candidate of Science in Agriculture; Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences; **address:** PO Box 463, SFSCA RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: guro-tamara@yandex.ru

Pestunov I.A., Candidate of Science in Physics and Mathematics; Institute of computational technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; **address:** 6, Academician M.A. Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

Kotov K.Yu., Candidate of Science in Engineering; Institute of Automation and Electrometry; **address:** 1, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

Дата поступления статьи 10.09.2018
Received by the editors 10.09.2018