3. Suzuki N., Rivero R.M., Shulaev V., Blumwald E., Mittler R. Abiotic and biotic stress combinations // *New Phytologist*. – 2014. – Vol. 203(1). – P. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12797>
4. Zandalinas S.I., Mittler R., Balfagón D., Arbona V., Gómez-Cadenas A. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures // *Physiologia Plantarum*. – 2018. – Vol. 162. – P. 2–12. DOI: [10.1111/ppl.12540](https://doi.org/10.1111/ppl.12540).
5. Кузнецов В.В. Общие системы устойчивости и трансдукция стрессового сигнала при адаптации растений к абиотическим факторам // *Вестник Нижегородского университета*. – 2001. – Т. 48. – № 5. – С. 65–69.
6. Колупаев Ю.Е., Горелова Е.И., Ястреб Т.О. Механизмы адаптации растений к гипотермии: роль антиоксидантной системы // *Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія: Біологія*. – 2018. – Вип. 1. – С. 6–33.
7. Zhong-Guang L., Ming G. Mechanical stimulation-induced cross-adaptation in plants: An overview // *Journal Plant Biology*. – 2011. – Vol. 54. – P. 358–364. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12374-011-9178-3>
8. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: метод. рекомендации /под. ред. Г.В. Удовенко. – Л., 1988. – 228 с.
9. Пат. RU №2625027, 11.07.2017. Способ определения относительной устойчивости сортов мягкой яровой пшеницы к возбудителю обыкновенной корневой гнили злаков / Гурова Т.А., Альт В.В., Луговская О.С.
10. Гурова Т.А., Луговская О.С., Свежинцева Е.А. Адаптивные реакции проростков пшеницы, дифференцирующие сорта при гипертермии // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. – 2019. – Т.49. – №3. – С. 31-40. DOI: [10.26898/0370-8799-2019-3-4](https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-3-4)
11. Гурова Т.А., Денисюк С.Г., Луговская О.С., Свежинцева Е.А., Минеев В.В. Методические положения ранней диагностики устойчивости яровой пшеницы и ячменя к совокупному действию стрессоров. – Новосибирск: СФНЦА РАН, 2017. – 62 с.
12. Гурова Т.А., Свежинцева Е.А., Чесноченко Н.Е. Адаптация сортов пшеницы при гипертермии, хлоридном засолении и инфицировании *Bipolaris sorokiniana* Shoem. // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. – 2020. – № 6. – С. 12-25. DOI: [10.26898/0370-8799-2019-6-2](https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-6-2)
13. Ramegowda V, Senthil-Kumar M. The interactive effects of simultaneous biotic and abiotic stresses on plants: Mechanistic understanding from drought and pathogen combination // *Journal of Plant Physiology*. – 2015. – Vol. 176. – P. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.11.008>
14. Абрамчик Л.М., Сердюченко Е.В., Пашкевич Л.В., Макаров В.Н., Зеневич Л.А., Кабашникова Л.Ф. Стрессовые реакции зеленых проростков ячменя в условиях инфицирования патогенным грибом *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem и повышенной температуры // *Вісці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі*. – 2015. – №2. – С. 38–43.

УДК 632.4.01/.08:535.37

DOI: [10.26898/agroinfo-2021-64-69](https://doi.org/10.26898/agroinfo-2021-64-69)

Гурова Т.А.¹, Елкин О.В.¹, Дубровская О.А.²,
¹СибФТИ СФНЦА РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск
²ФИЦ ИВТ СО РАН, г. Новосибирск

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОРАЖЕНИЯ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ МУЧНИСТОЙ РОСОЙ

В лабораторных экспериментах с помощью гиперспектральной камеры были получены спектральные характеристики трех сортов яровой пшеницы сибирской селекции, пораженных мучнистой росой (*Blumeria graminis* (DC.) Speer) в полевых условиях. Установлена сортоспецифичность отражательной способности листьев пшеницы, инфицированных мучнистой росой при одинаковой степени поражения. Выявлено изменение отражательной способности листьев в зависимости от степени поражения болезнью. Определен наиболее информативный спектральный признак (вегетационный индекс) для обнаружения мучнистой росы.

Ключевые слова: болезни пшеницы, мучнистая роса, гиперспектральные данные, спектральные характеристики, вегетационные индексы.

Введение. Мучнистая роса пшеницы особо вредоносное заболевание, широко распространенное во всем мире, в России, а также в Западной Сибири [1, 2]. Возбудитель мучнистой росы *Blumeria graminis* (DC.) Speer. развивается преимущественно на молодых активно вегетирующих растениях. Признаки болезни проявляются на листьях, междоузлиях стебля и колосковых чешуйках в виде белого, рыхлого мучнистого налета, состоящего из конидиеносцев и конидий гриба [3].

Вредоносность болезни проявляется в уменьшении ассимиляционной поверхности листьев, что приводит к преждевременному их усыханию, задержке колошения, ослаблению

склеренхимы стеблей, уменьшению длины и озерненности колоса, щуплости зерна и разрушению колоса. В отдельные годы недобор урожая от мучнистой росы может составлять более 15-20 %, а в годы эпифитотий до 50 % и более [4, 5].

Существующие стандартные методы фитосанитарного мониторинга основаны на визуальной диагностике развития и распространения болезней посевов пшеницы. Обследование посевов на пораженность мучнистой росой приурочивают к периодам всходы–кущение и выход в трубку–колошение. Проводят осмотр растений в 10-15 точках по диагонали обследуемого поля. При этом подсчитывается количество просмотренных растений [6]. Степень развития болезни устанавливают, как средний показатель поражённости растений, в котором учтено число (процент) больных растений и степень (балл) поражения. В зависимости от культуры и размера посевной площади, которая зачастую очень велика, использование такого метода может быть достаточно трудоемким.

В настоящее время ведутся активные исследования по разработке методов и подходов дистанционной диагностики болезней растений, основанных на использовании гиперспектральной визуализации отражательной способности растений [7, 8]. Показано, что методы гиперспектральной визуализации могут применяться для обнаружения и диагностики мучнистой росы [9, 10]. Установлены различные спектральные особенности пораженных листьев растений. По гиперспектральным данным, полученным для одного сорта озимой пшеницы, определен вегетационный индекс (PMI), идентифицирующий мучнистую росу [11, 12].

Цель наших исследования – выявить информативность спектральных характеристик отражательной способности листьев яровой пшеницы сортов сибирской селекции для обнаружения (распознавания) их поражения мучнистой росой с учетом генотипов сортов и степени поражения растений.

Материалы и методы. Исследования проводились в лабораторных условиях. Использовались растения пшеницы, выращенные на естественном инфекционном фоне. Образцы растений пшеницы, здоровой и пораженной мучнистой росой (возбудитель *Blumeria graminis* (DC) Speer), отбирали на тестовых площадках СибНИИРС – филиала института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук и Сибирского физико-технического института (Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук). Местоположение: Новосибирская область, Новосибирский р-н, пос. Мичуринский и р.п. Краснообск. Исследуемые сорта яровой пшеницы – Сибирская 12, Сибирская 21, Новосибирская 44. Фазы вегетации культуры – кущение и выход в трубку-колошение.

Оценивали следующие варианты:

- 1) контроль (зеленый лист без видимых признаков поражения);
- 2) мучнистая роса с видимыми признаками поражения: слабое и среднее поражение 10-50 % и сильное поражение – 50-100 %.

Репрезентативная выборка – 20-25 растений в каждом варианте опыта.

Гиперспектральные изображения пшеницы для анализа были получены с помощью гиперспектральной камеры Photonfocus MV1-D2048x1088-HS05-96-G2-10 в диапазоне длин волн 475-900 нм. Спектральное разрешение камеры составляет 3 нм и включает 150 полос. Пространственное разрешение сенсора составляет 2048x1088 пикселей.

Предварительный визуальный контроль качества гиперспектральных изображений осуществлялся с помощью программы Photonfocus Studio software. Для массовой обработки изображений использовались библиотеки языка Python. Извлечение данных по интенсивности спектральных линий и их статистический анализ осуществляли с помощью пакета ENVI. Сглаживание спектров было выполнено при помощи фильтра Савицкого-Голая. При получении спектральных кривых проводили сегментацию изображений и использовали средние значения спектральных яркостей выделенных сегментов по нескольким изображениям.

При анализе растений для обнаружения мучнистой росы рассчитывали 11 вегетационных индексов, применяемых для обнаружения заболеваний: NBNDVI, RVSI, PSRI, NRI, PRI, SIPI, PhRI, TCARI, MTVI1, TVI, PMI, описанных ранее в [13].

Результаты и обсуждение. Специфичность кривых спектральной отражательной способности растительности, позволяющая с достаточной точностью распознавать болезни сельскохозяйственных культур, зависит от типа патогенеза как реакции растений на внедрение и развитие возбудителей болезней. Для растительных объектов характерна низкая отражательная способность в синей и красной областях спектра, некоторое увеличение ее в зеленой области, и резко выраженный максимум в ближнем инфракрасном диапазоне.

На рисунке 1 представлены полученные спектральные кривые листьев растений сортов пшеницы Сибирская 12 и Новосибирская 44, здоровых и инфицированных мучнистой росой (*Blumeria graminis*) с одинаковой степенью поражения.

Рисунок 1. Спектральные кривые здоровых листьев (зеленая кривая) и пораженных мучнистой росой (*Blumeria graminis*) со степенью поражения 50-100 % двух сортов пшеницы (красная кривая)

Формы спектральных кривых здоровых и больных листьев у всех исследованных сортов для нормализованных спектров похожи. В видимой части спектра (470-680 нм) значение коэффициента отражения здорового листа в красной крайней области имело минимум, что обусловлено поглощением света пигментами (хлорофилл).

В ближней инфракрасной области отражательная способность здоровых листьев повышалась, что связано с внутренним рассеянием света мезофиллом. На границе видимой красной и ближней инфракрасной части спектра в диапазоне 690-740 нм наблюдалось резкое увеличение значений спектральных характеристик у растений. Начиная с пиковых значений в районе 760 нм, при увеличении длин волн в диапазоне 760-880 нм во всех случаях наблюдалось небольшое снижение отражательной способности. Это может быть связано с содержанием влаги в растениях.

Пораженные мучнистой росой листья всех сортов пшеницы отличались от здоровых более высокими значениями отражательной способности в видимом диапазоне спектра (480-730 нм) и более низкими – в ближнем инфракрасном диапазоне спектра (740-880 нм), что свидетельствовало об ухудшении их физиологического состояния.

Нами установлена сортоспецифичность отражательной способности листьев пшеницы, пораженных мучнистой росой при одинаковой степени поражения. Так относительные изменения отражательной способности здоровых и пораженных листьев неустойчивого сорта Сибирская 12 более выражены по сравнению с устойчивым сортом Новосибирская 44 как в видимом, так и в ближнем инфракрасном диапазонах спектра. При этом относительные изменения коэффициентов отражения составляли у сорта Сибирская 12 в точках 513 нм, 685 нм и 781 нм (использовались для расчета индекса PMI) 176,0, 119,0 и 11,7 %, а у сорта Новосибирская 44 – 66,4, 85,4 и 4,9 %, соответственно. Защитные системы устойчивого сорта Новосибирская 44 обладают большей лабильностью, что снижает развитие деструктивных процессов у этого сорта при патогенезе мучнистой росы.

При анализе спектральных кривых листьев пшеницы с различной степенью поражения мучнистой росой установлено изменение отражательной способности листьев в зависимости от тяжести заболевания (рисунок 2). Чем сильнее степень поражения (50-100 %), тем выше

отражательная способность листьев в видимой области спектра. Противоположный результат наблюдали в ближней инфракрасной области: отражательная способность листьев тем выше, чем меньше степень поражения (10-50 %). Выделены участки с наибольшими различиями между здоровыми листьями и листьями в различной степени пораженными мучнистой росой. Это участки 550-680 нм и 760-880 нм. Аналогичные результаты получены при исследовании спектральных характеристик пшеницы – здоровой и пораженной бурой листовой, стеблевой и желтой ржавчиной, септориозом, гельминтоспориозом [14].

Рисунок 2. Спектральные кривые здоровых листьев пшеницы (зеленая кривая) и пораженных в различной степени мучнистой росой (*Blumeria graminis*) (10-50 % – желтая кривая, 50-100% – красная кривая)

Так как видимая и инфракрасная области электромагнитных спектров имеют тесную связь с уровнем физиологического стресса в растениях, появляется возможность использования некоторых диапазонов волн для обнаружения болезней растений даже до появления видимых симптомов.

В результате анализа различных вегетационных индексов, ранее используемых при диагностике и мониторинге развития других заболеваний пшеницы [13], а также на основе анализа спектральных характеристик, полученных в лабораторном эксперименте, было выбрано 11 вегетационных индексов для идентификации мучнистой росы (*Blumeria graminis*), представленных в таблице 1.

Таблица 1
Вегетационные индексы, используемые для идентификации мучнистой росы на листьях пшеницы

Индекс	Название индекса	Формула*
NRI	Nitrogen reflectance index	$\frac{R_{570} - R_{670}}{R_{570} + R_{670}}$
NBNDVI	Narrow-Band Normalized Difference Vegetation Index	$(R_{850} - R_{680}) / (R_{850} + R_{680})$
RVSI	Red-Edge Vegetation Stress Index	$[(R_{712} + R_{752}) / 2] - R_{732}$
PSRI	Plant Senescence Reflectance Index	$\frac{(R_{Red} - R_G) / R_{Nir}}{(R_{678} - R_{500}) / R_{750}}$
PMI	Powdery Mildew Index	$\frac{R_{515} - R_{698}}{R_{515} + R_{698}} - 0.5 R_{738}$
PRI	Photochemical/Physiological Reflectance Index	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$
SIPI	Structural Independent Pigment Index	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} + R_{680})$
PhRI	Physiological Reflectance Index	$(R_{550} - R_{531}) / (R_{550} + R_{531})$
MTVII	Modified Triangular Vegetation Index	$1.2 [1.2 (R_{800} - R_{550}) - 2.5 (R_{670} - R_{550})]$
TCARI	Transformed Chlorophyll Absorption And Reflectance Index	$3 [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 (R_{700} - R_{550}) \frac{R_{700}}{R_{670}}]$
TVI	Triangular Vegetation Index	$\frac{0.5 \cdot [120 \cdot (R_{Nir} - R_G) - 200 \cdot (R_{Red} - R_G)]}{0.5 \cdot [120 \cdot (R_{750} - R_{550}) - 200 \cdot (R_{670} - R_{550})]}$

* R_x – отражательная способность на соответствующей длине волны или в соответствующем диапазоне спектра: B (Blue – 450-520 нм), G (Green – 520-600 нм), Red (630-690 нм), RE (700-730 нм), Nir (760-900 нм)

Анализ гистограмм значений вегетационных индексов, показал (рисунок 3), что индекс PMI является наиболее информативным для обнаружения мучнистой росы на листьях яровой пшеницы по данным гиперспектральной съемки. Аналогичные результаты получены в работе [12] для идентификации мучнистой росы на озимой пшенице. Для определения информативных признаков нами использованы каналы 10 (513 нм), 67(685 нм) и 98 (781 нм) гиперспектральной камеры Photonfocus.

Рисунок 3. Гистограмма значений вегетационного индекса PMI (индекс мучнистой росы): здоровые листья пшеницы (зеленая кривая) и пораженные мучнистой росой (*Blumeria graminis*) (красная кривая)

Заключение. В результате проведенных лабораторных экспериментов, обработки и анализа гиперспектральных данных получены спектральные характеристики сортов пшеницы сибирской селекции (Новосибирская 44, Сибирская 21, Сибирская 12) – здоровых проростков и пораженных мучнистой росой (*Blumeria graminis* (DC) *Speer*). Установлена сортоспецифичность отражательной способности листьев пшеницы, инфицированных мучнистой росой при одинаковой степени поражения. Чем устойчивее сорт, тем меньше относительные изменения отражательной способности листьев. Выявлено изменение отражательной способности листьев в зависимости от тяжести заболевания. Чем сильнее степень поражения, тем выше отражательная способность листьев в видимой области спектра. Чем меньше степень поражения, тем выше отражательная способность листьев в ближней инфракрасной области. Анализ гистограмм 11 вегетационных индексов, которые широко используются при обнаружении различных болезней пшеницы, показал, что индекс PMI является наиболее информативным признаком при обнаружении мучнистой росы на листьях по данным гиперспектральной съемки.

Использованные источники:

1. Ray M., Ray A., Dash S., Mishra A., Achary K.G., Nayak S and Singh S. Fungal disease detection in plants: traditional assays, novel diagnostic techniques and biosensors. // Biosens Bioelectron. – 2017. – Vol. 87. – P. 708-723.
2. Койшыбаев М., Муминджанов Х. Методические указания по мониторингу болезней, вредителей и сорных растений на посевах зерновых культур. Анкара: Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, 2016. – 28 с.
3. Неклеса Н.П. Мучнистая роса зерновых культур // Защита и карантин растений. – 2002. – №5. – С. 46-47.
4. Долженко В.И., Власенко Н.Г., Власенко А.Н. и др. Зональные системы защиты яровой пшеницы от сорняков, болезней и вредителей в Западной Сибири. Новосибирск: ГНУ СибНИИЗиХ, 2014. – 124 с.
5. Аветисян Г.А., Аветисян Т.В. Влияние микроэлемента марганца на устойчивость растений мягкой пшеницы к возбудителю мучнистой росы // Бюллетень ГНБС. – 2021. – Вып. 138. – С.134-138.
6. Ченкин А.Ф., Захаренко В.А., Белозерова Г.С. Фитосанитарная диагностика. – М.: Колос, 1994. – 320 с.
7. Forster A., Behley J., Behmann J., Roscher R. Hyperspectral Plant Disease Forecasting Using Generative Adversarial Networks(Conference Paper) International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) July 2019, N. 8898749. – P. 1793–1796 DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898749

8. Mahlein A.-K., Kuska M.T., Behmann J., Polder G., Walter A. Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: State of the art (Review) // Annual Review of Phytopathology. – 2018. – Vol. 56. – P. 535–558. DOI: 10.1146/annurev-phyto-080417-050100
9. Abdulridha J., Ampatzidis Y., Roberts P., Kakarla S.C. Detecting powdery mildew disease in squash at different stages using UAV-based hyperspectral imaging and artificial intelligence // Biosystems Engineering. – 2020. – Vol. 197. – P. 135–148. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.07.001
10. Zhao J., Fang Y., Chu G., Yan H., Hu L., Huang L. Identification of leaf-scale wheat powdery mildew (*Blumeria graminis* F. sp. tritici) combining hyperspectral imaging and an SVM classifier // Plants. – 2020. – Vol. 9. – No. 936 – P. 1–13 DOI: 10.3390/plants9080936
11. Yao Z.-F., Lei Y., He D.-J. Identification of Powdery Mildew and Stripe Rust in Wheat Using Hyperspectral Imaging // Spectroscopy and Spectral Analysis. – 2019. – Vol. 39. – Issue 3. – P. 969–976 DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)03-0969-08
12. Lin F., Wang D., Zhang D., Yang X., Yin X. and Wang D. Evaluation of spectral disease index PMI to detect early wheat powdery mildew using hyperspectral imagery data // Int. J. Agric. Biol., 2018. – Vol. 20. – P. 1970-1978.
13. Дубровская О.А., Гурова Т.А., Пестунов И.А., Котов К.Ю. Обзор современных методов обнаружения болезней на посевах яровой пшеницы по данным дистанционного зондирования // Сибирский вестник сельскохозяйственных наук. – 2018. – Т. 48. – № 6. – С. 76-89.
14. Бекмухамедов Н. Э., Карабкина Н. Н. Изменение спектральных характеристик растений яровой пшеницы, зараженных грибковыми болезнями // Сельское, лесное и водное хоз-во. – 2013. – № 10. [Электронный ресурс]. URL: <http://agro.snauka.ru/2013/10/1169>. (дата обращения: 20.06.21).

УДК 338.462:338.431

DOI: 10.26898/agroinfo-2021-69-73

Епанчинцев В.Ю., Шумакова О.В.,

ФГБОУ ВО Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина

ИНФОРМАЦИОННО-КОНСУЛЬТАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В статье проанализированы особенности функционирования информационно-консультативных систем в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства. Раскрыты вопросы оптимизации бизнес-процессов за счет цифровых технологических агорешений. Экономический эффект в форме повышения прибыли достигается за счет улучшения качества прогнозирования и мониторинга тенденций, следствием чего является минимизация затрат и операционных потерь, а также улучшение качества принимаемых управленческих решений.

Ключевые слова: информационно-консультативные системы, цифровая трансформация, сельское хозяйство, умное растениеводство, умное животноводство, экономический эффект.

Предоставление хозяйствующему субъекту аграрного бизнеса комплекса необходимых взаимодополняющих сервисов с максимально возможным функционалом в едином комфортном для клиента пространстве становится «идеальной целью» создания цифровой экосистемы сельского хозяйства. В двадцатых годах XXI века цифровые сервисы в агропромышленном комплексе (далее АПК) по экономическому содержанию являются средствами труда, обеспечивающими при определенных условиях достижение высокого уровня маржинальности сельскохозяйственного производства [1]. Благодаря данному инструменту решается комплексная задача удовлетворения базовых потребностей пользователей цифровых сервисов в ключевых отраслях АПК (таблица 1).

Необходимо отметить, что понятия «зоотехническая служба» и «агрономическая служба» применимы к хозяйствующим субъектам, имеющим более 1000 условных голов скота и достаточное количество гектаров условной уборочной площади соответственно. Как правило, это крупные сельскохозяйственные организации и вертикально-интегрированные структуры (агрохолдинги). В иных случаях конечными пользователями цифровых сервисов будут зоотехники и агрономы, а также специалисты ИТ-службы, выполняющие трудовую функцию в отраслях животноводства и растениеводства [5].