UDK 664.7:004.932

BUG'DOY DONINING FUSARIUM BILAN ZARARLANISHINI GIPERSPEKTRAL TASVIRLASH ASOSIDA ANIQLASH VA UNING TURLARINI ANIQLASH

ОБНАРУЖЕНИЕ И ВИДОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНФЕКЦИИ «FUSARIUM» В ЗЕРНАХ ПШЕНИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

DETECTION AND SPECIES IDENTIFICATION OF FUSARIUM INFECTION IN WHEAT GRAINS USING HYPERSPECTRAL IMAGING

Negmatullayev Mirjaxon Asqar o'g'li
Qobilova Nilufar Xudoyshukurovna
Qarshi davlat texnika universiteti, magistrant; Oziq-ovqat texnologiyasi kafedrasi professori (PhD)
mirjahonnegmatillayev@gmail.com
nilufarqobilova90@gmail.com
DOI:https://doi.org/10.5281/zenodo.23389462

Annotatsiya. Maqolada bug'doy donining Fusarium bilan zararlanishini tezkor va buzmasdan aniqlash uchun giperspektral tasvirlashning ilmiy asoslari tahlil qilindi. Fusarium va deoksinivalenol (DON) kontaminatsiyasiga xos spektral o'zgarishlar, informativ to'lqin uzunliklarini tanlash hamda klassifikatsiya modellaridan foydalanish imkoniyatlari umumlashtirildi. Don oqimini bir qatlamda shakllantirish, spektral skanerlash, dasturiy klassifikatsiya va pnevmatik ejektor orqali zararlangan donni chiqarib tashlashni birlashtiruvchi avtomatik saralash sxemasi taklif etildi. Laboratoriya giperspektral tizimidan ishlab chiqarishga mos multispektral modulga o'tish tamoyillari asoslandi.

Kalit so'zlar: bug'doy doni, Fusarium, deoksinivalenol, giperspektral tasvirlash, NIR, klassifikatsiya, avtomatik saralash, pnevmatik ejektor, oziq-ovqat xavfsizligi.

Аннотация. Проанализированы возможности гиперспектральной визуализации для быстрого и неразрушающего выявления зерновок пшеницы, поражённых Fusarium. Рассмотрены спектральные изменения при фузариозном поражении и контаминации DON, выбор информативных длин волн и построение классификационных моделей. Предложена схема автоматической сортировки, объединяющая однослойную подачу зерна, спектральное сканирование, программную классификацию и пневматическое удаление опасных зерновок. Обоснован переход от лабораторной гиперспектральной системы к промышленному мультиспектральному модулю.

Ключевые слова: зерно пшеницы, Fusarium, дезоксиниваленол, гиперспектральная визуализация, NIR, классификация, автоматическая сортировка, пневматический эжектор, безопасность пищевых продуктов.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Abstract. The paper reviews hyperspectral imaging for rapid, non-destructive detection of Fusarium-damaged wheat kernels. Spectral changes associated with Fusarium infection and deoxynivalenol (DON), selection of informative wavelengths, and classification approaches are summarized. A conceptual automated sorting line combining single-layer feeding, spectral scanning, software classification, and pneumatic ejection is proposed. The transition from laboratory hyperspectral imaging to a simplified industrial multispectral module is substantiated.

Keywords: wheat kernel, Fusarium, deoxynivalenol, hyperspectral imaging, NIR, classification, automated sorting, pneumatic ejector, food safety.

KIRISH

Fusarium turkumiga mansub zamburug'lar donning tashqi tuzilishi va texnologik sifatiga ta'sir etishi, ayrim sharoitlarda DON va boshqa mikotoksinlarning hosil bo'lish xavfini yuzaga keltirishi mumkin. Tashqi zararlanish belgisi va DON konsentratsiyasi o'rtasida bir qiymatli bog'liqlik bo'lmasligi sababli optik saralashni mikotoksinlar bo'yicha laboratoriya tekshiruvlarining to'liq o'rnini bosuvchi usul deb qarash mumkin emas. HSI ko'rinadigan va yaqin infraqizil spektrlar bo'yicha har bir donning fazoviy-spectral xususiyatlarini aks ettiradi va tezkor skrining uchun istiqbolli vositadir [1–7].

Ishning maqsadi – mahalliy sharoitda o'tkaziladigan keyingi eksperimental tadqiqotlar uchun takrorlanuvchi sinov protokoli hamda Fusarium xavfi yuqori donlarni aniqlash va ajratishning konseptual texnologik tizimini ilmiy asoslash. Ishning chegarasi: bu yerda algoritmlar va jihozlar tavsiya qilinadi, ular mualliflar tomonidan sinovdan o'tkazilgan deb da'vo qilinmaydi.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Ilgari e'lon qilingan ishlarda Fusarium bilan zararlangan donlarni HSI asosida aniqlash, informativ spektral kanallarni tanlash va DON bilan statistik bog'liqlikni baholash imkoniyatlari ko'rsatilgan. Quyidagi jadvaldagi barcha raqamlar boshqa mualliflar e'lon qilgan natijalar sifatida keltiriladi; ular mazkur maqola mualliflarining tajriba natijalari emas. Nashrdan avval bibliografik ma'lumotlar va ko'rsatkichlar asl manbalar bilan qayta tekshirilishi kerak.

1-jadvalda xorijiy tadqiqotlardan olingan asosiy natijalar umumlashtirildi. Ushbu natijalar mazkur maqola mualliflarining eksperimental natijalari sifatida talqin qilinmaydi.

1-jadval

FUSARIUM ZARARLANISHINI HSI YORDAMIDA ANIQLASH BO'YICHA XORIJIY TADQIQOTLAR

Manba	Obyekt va usul	Adabiyotda xabar qilingan natija	Mazkur ishdagi vazifasi
Zhang va boshq., 2020 [6]	VIS–NIR; spektral va tasvir belgilari	810 dona; klassifikatsiya aniqligi 96,44% gacha	Mahalliy navlar uchun tashqi tekshiruv zarurligini ko'rsatadi
Femenias va boshq., 2022 [4]	NIR–HSI; DON bilan bog'lash	Fusarium simptomlari 85,8%; DON mezoni bo'yicha 76,9%; R^2=0,88	Optik diagnostika va toksin miqdorini farqlash

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Vicens-Sans va boshq., 2024 [5]	NIR–HSI va saralash	Chegaraviy DON konsentratsiyalarida murakkablik	Xavfli xatolarni cheklash

Manba: maqolada tahlil qilingan [4–6] ilmiy adabiyotlar asosida tuzilgan.

Mavjud ilmiy ishlardan olinadigan asosiy xulosa – nav, mavsum, namlik va saralash liniyasining ish sharoitlari o'zgarganda model aniqligi pasayishi mumkin. Shuning uchun mahalliy bug'doy partiyalarida mustaqil tashqi validatsiya, DON bo'yicha referens o'lchov va texnik-iqtisodiy tekshiruv talab qilinadi.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Don namunalarini shakllantirish. O'zbekistonning bir nechta agroiqlim hududida yetishtirilgan, nav identifikatsiyasi hujjatlar bilan tasdiqlangan bug'doydan mustaqil partiyalar yig'iladi. Har bir partiya bo'yicha nav, yetishtirilgan hudud va yil, agrotexnik holat, namlik, yig'ib olish va saqlash sharoitlari, Fusarium kasalligi belgilari qayd etiladi. Namuna soni oldindan pilot tadqiqot va statistik quvvat tahlili asosida belgilanadi. Bu maqolada namunalar soni keltirilmaydi, chunki haqiqiy namuna yig'ish bo'yicha eksperimental ma'lumotlar taqdim etilmagan.

Referens tasnif. «Sog'lom», «gumonli» va «zararlangan» sinflar tashqi ko'rinish bilangina emas, mikologik/molekulyar tekshiruv bilan tasdiqlanishi zarur. DON xavfi alohida masala: har bir belgilangan partiya yoki kerak bo'lsa individual donlarning DON konsentratsiyasi validatsiyalangan HPLC yoki LC–MS/MS usuli bilan aniqlanadi. Namunalarni xatolikka olib keladigan DON konsentratsiyasi bo'yicha oldindan sun'iy ravishda «sog'lom» deb belgilash mumkin emas.

HSI tasvir olish. Laboratoriya tizimi uchun 400–1000 nm VIS–NIR spektral diapazoni dastlabki texnik variant sifatida ko'riladi; kamera, spektral va fazoviy ajratuvchanlik, ekspozitsiya, yoritish geometriyasi, transportyor tezligi, atrof-muhit namligi va harorati qayd etiladi. Oq va qora etalonlar bo'yicha qaytaruvchanlik $R=(I-Idark)/(Iwhite-Idark)$ formulasi bilan kalibrlanadi. Har bir donning segmentatsiyalangan ROI mintaqasidan spektr va morfologik ko'rsatkichlar olinadi.

Ma'lumotlarni qayta ishlash. SNV, MSC va Savitzky–Golay filtrlash alternativalari faqat trening ma'lumotlarida tanlanadi. PCA ma'lumotlar tarkibini vizual baholashga; SPA, CARS va Random Forest xususiyat ahamiyati informativ kanallarni tanlashga; LDA, SVM va Random Forest esa klassifikatsiyaga nomzod algoritmlardir. Ushbu metodlarning nomini sanab o'tish ularning birortasi amalda sinab ko'rilganini bildirmaydi.

Mustaqil validatsiya. Bir partiya yoki bir tasvir seansidan olingan donlar trening va testga aralashmasligi kerak. Guruhlangan cross-validationdan so'ng boshqa hosil yili, nav yoki hududga mansub mutlaqo mustaqil partiyalarda tashqi validatsiya o'tkaziladi. Accuracy, sensitivity (recall), specificity, precision, F1-score, ROC-AUC, confusion matrix va noto'g'ri salbiy tasnif ulushi alohida beriladi. DON bo'yicha regressiya bajarilsa, R^2, RMSE va tizimli og'ish ko'rsatkichlari hisoblanadi.

DON bilan zararlanish belgilari optik spektrda aks etishi mumkin, ammo optik signal DON molekulasining bevosita o'lchovi emas. Shuning uchun referens HPLC/LC–MS/MS natijalari bilan bog'langan alohida model tuzilib, tashqi test to'plamida validatsiya qilinishi lozim. Tanlanadigan qaror chegarasi tegishli hudud va mahsulot turi uchun amaldagi me'yoriy limitlardan kelib chiqib belgilanadi; bu maqolada universal DON chegarasi taklif etilmaydi. Yuqori sezgirlik va past false-negative ko'rsatkichi saralash vazifasida ustuvor bo'lishi mumkin, ammo keraksiz chiqit va ishlab chiqarish yo'qotishlari bilan muvozanat tekshiriladi.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Laboratoriya HSI tizimida aniqlangan kanallar ichidan tanlanma xususiyatlarning o‘zaro takrorlanishi, to‘lqin uzunligi barqarorligi, namlikka sezgirlik, navlar bo‘yicha umumlashuv, LED/filtrlarning mavjudligi va real vaqt hisoblash xarajatlari bo‘yicha minimal kanal majmuasi tanlanadi. Hozirgi manbalarda 732, 876 va 941 nm atrofidagi zonalar istiqbolli ekanligi qayd etilgan [4, 6 va oldingi maqolada keltirilgan tadqiqotlar]; bu qiymatlar mahalliy don uchun tayyor optimal to‘plam sifatida qabul qilinmaydi. Dastlab 3, 5, 8 va 12 kanalli modellarni tashqi validatsiyada bir xil sharoitda solishtirish taklif qilinadi. Yakuniy tanlov natijalarga qarab belgilanadi.

TAHLILLAR VA NATIJALAR



1-rasm. Fusarium xavfi yuqori donlarni giperspektral aniqlash va pnevmatik saralashning konseptual sxemasi

Manba: mualliflar tomonidan texnologik konsepsiya asosida ishlab chiqilgan (tajribada sinalmagan sxema).

Taklif etilayotgan liniya: bunker → bir qatlamli uzatkich → boshqariladigan yoritish → kamera → tasvirni qayta ishlash → joylashuvni kuzatish → pnevmatik ejektor → ikki fraksiyali yig‘ish. Nominal kechikish t=L/v (L — tasvir olish nuqtasidan ejektorgacha masofa, v — donning haqiqiy tezligi) bilan boshlang‘ich baholanadi. Uskunada kamera ekspozitsiyasi, algoritm ishlash vaqti, klapan javobi, havo bosimi va don trayektoriyasi eksperimental ravishda hisobga olinishi shart.

Pilot sinovda don/soat yoki kg/soat hisobida unumdorlik, aniqlangan zararlangan don ulushi, noto‘g‘ri ajratish ulushi, ejektorning ishlamay qolish chastotasi, tozalangan fraksiyaning laboratoriyada tasdiqlangan DON miqdori hamda turg‘unlik kamida turli tezlik va partiyalarda baholanadi. Hozir bu ko‘rsatkichlar ma’lumot yo‘qligi sababli natija sifatida berilmaydi.

Tijorat joriy etishidan oldin investitsiya xarajatlari (HSI yoki multispektral kamera, yoritish bloki, transportyor, ejektor, kompressor, boshqaruv kompyuteri), amortizatsiya, elektr energiyasi, siqilgan havo, texnik xizmat, xodimlar mehnati va kalibrlash xarajatlari hisoblanishi kerak. Bir tonna donni saralash xarajati C_t=(yillik amortizatsiya + yillik ekspluatatsion xarajatlar)/yillik qayta ishlangan tonna; saralash bilan bog‘liq iqtisodiy samara esa oldi olingan zarar va saqlab qolingan mahsulot qiymatidan ushbu xarajatlarni ayirish yo‘li bilan hisoblanadi. Foyda, o‘zini qoplash muddati va sezgirlik tahlili haqiqiy narxlar va pilot unumdorlik olingach bajariladi.

Mazkur maqolaning ayni bosqichdagi ilmiy-uslubiy hissasi — mahalliy bug‘doy partiyalariga mos tashqi validatsiyali sinov protokolini hamda HSI–klassifikator–pnevmatik ajratish integratsiyasining tekshiriladigan konseptual sxemasini birlashtirib taqdim etishdir. Fusariumni HSI bilan aniqlash, PCA/SVM/RF usullari yoki ejektor asosidagi saralashning o‘zi mutlaqo yangi ixtiro sifatida da’vo qilinmaydi. Mahalliy spektral qonuniyatlar, optimal kanallar, modelning tekshirilgan aniqligi, DONni bashorat qilish ko‘rsatkichlari va sanoat samaradorligi hali olinishi zarur bo‘lgan eksperimental natijalardir.

Mahalliy tadqiqotlar bo‘yicha adabiyotlar qismi alohida izlash va asl manbalarini verifikatsiya qilishni talab etadi. Ishonchli bibliografik ma’lumotlar mavjud bo‘lmagan sharoitda mahalliy olimlar nomidan ularning maqolalari yoki ilmiy natijalarini to‘qib kiritish mumkin emas.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Adabiyotlar tahlili Fusarium bilan zararlangan bug'doy donlarini VIS–NIR/HSI asosida skrining qilishning istiqbolliligini ko'rsatadi. Taklif etilgan konsepsiyada namunalarni referens usul bilan tasdiqlash, ma'lumotlar sizib chiqishini oldini olish, mustaqil partiyalarda validatsiya o'tkazish va optik qarorni pnevmatik ajratish bilan sinxronlashtirish markaziy o'rin egallaydi. Biroq maqoladagi texnologik yechim eksperimental tasdiqlangan sanoat texnologiyasi emas; haqiqiy namuna va pilot qurilma sinovlari tugagach ilmiy yangilik hamda iqtisodiy samaradorlik bo'yicha yakuniy xulosalar qayta yozilishi lozim.

Taklif sifatida mahalliy bug'doy partiyalarida HSI tasvirlarini olish, DON miqdorini referens laboratoriya usullari bilan tekshirish, modellarni tashqi validatsiyadan o'tkazish va pilot saralash liniyasi samaradorligini hisoblash tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Pitt J.I., Miller J.D. A concise history of mycotoxin research. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2017. Vol. 65. P. 7021–7033.
2. Femenias A., Ramos A.J., Sanchis V., Marín S. Use of hyperspectral imaging as a tool for Fusarium and deoxynivalenol risk management in cereals: A review. Food Control. 2020. Vol. 108. 106819.
3. Wang Y., Ou X., He H.-J., Kamruzzaman M. Advancements, limitations and challenges in hyperspectral imaging for comprehensive assessment of wheat quality. Food Chemistry: X. 2024. Vol. 21. 101235.
4. Femenias A., Ramos A.J., Sanchis V., Marín S. Near-infrared hyperspectral imaging evaluation of Fusarium damage and DON in single wheat kernels. Food Control. 2022. Vol. 142. 109239.
5. Vicens-Sans A., Pascari X., Molino F., Ramos A.J., Marín S. Near infrared hyperspectral imaging as a sorting tool for deoxynivalenol reduction in wheat batches. Food Research International. 2024. Vol. 178. 113984.
6. Zhang D., Chen G., Zhang H. et al. Integration of spectroscopy and image for identifying Fusarium damage in wheat kernels. Spectrochimica Acta Part A. 2020. Vol. 236. 118344.
7. Ropelewska E., Zapotoczny P. Classification of Fusarium-infected and healthy wheat kernels based on features from hyperspectral images. European Food Research and Technology. 2018. Vol. 244. P. 1453–1462.
8. Yao L. et al. Nondestructive detection of deoxynivalenol in wheat kernels using VNIR-HSI supported by spatial heterogeneity analysis with SEM and SR-FTIR. Food Control. 2026. Vol. 184. 112016.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.