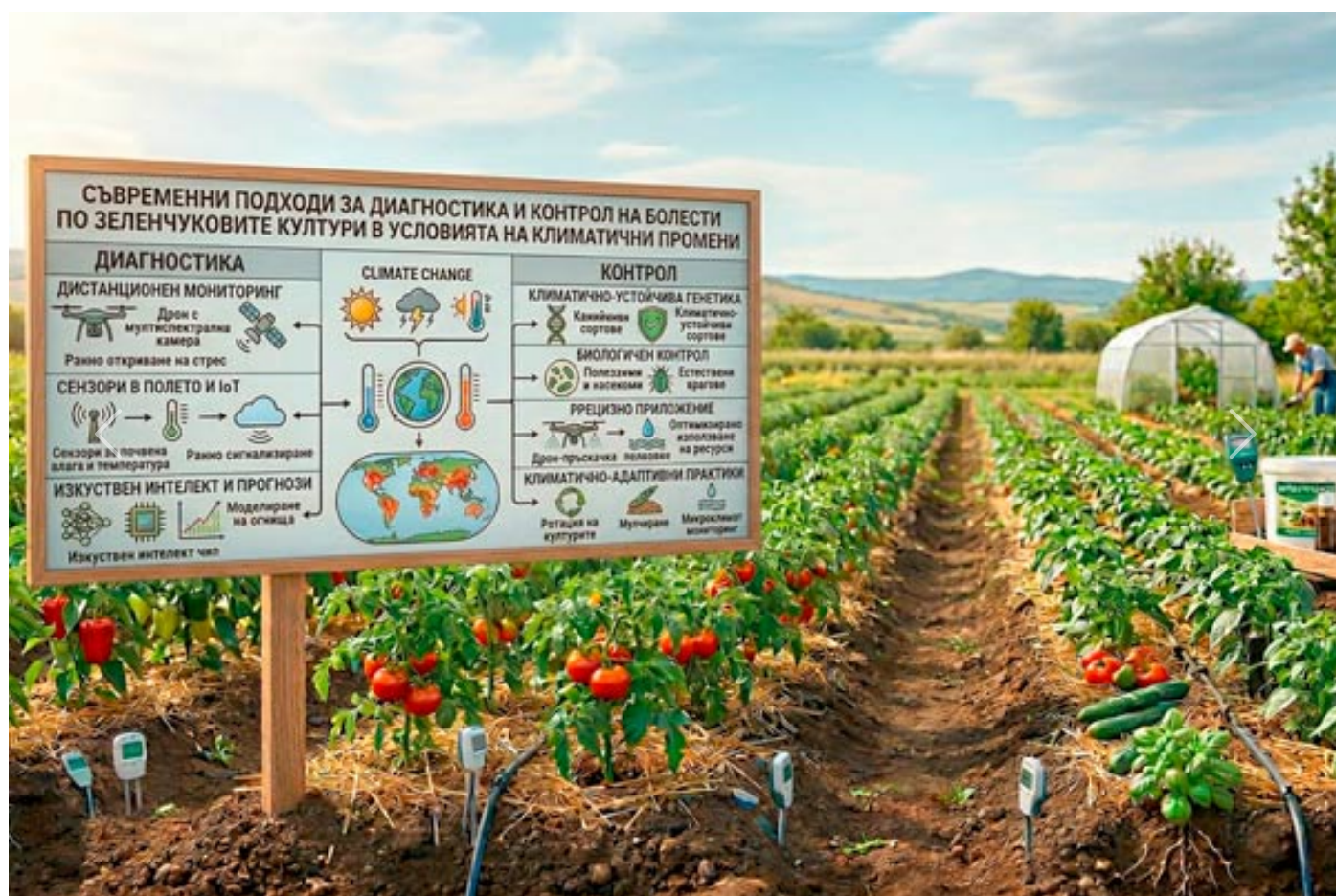


Abordări Moderne pentru Diagnosticarea și Controlul Bolilor Culturilor Legumicole în Condițiile Schimbărilor Climatice

Автор(и): гл. ас. д-р Катя Василева, ИЗК "Марица" - Пловдив

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



Rezumat

Schimbările climatice modifică semnificativ dinamica bolilor culturilor legumicole, ducând la o dezvoltare mai rapidă a patogenilor, o supraviețuire mai mare a inoculului și la apariții mai frecvente de epidemii. Creșterea temperaturilor, precipitațiile extreme și perioadele de secetă creează condiții care facilitează infecțiile cu viruși, bacterii și ciuperci patogene. În aceste condiții, metodele tradiționale de diagnostic sunt adesea insuficiente din cauza suprapunerii simptomelor

și a modificărilor induse de stres. Abordările moderne includ teste rapide imunocromatografice, metode moleculare, diagnostic hiperspectral, tehnologii cu drone și modele predictive. Managementul eficient al bolilor necesită o abordare integrată care implică soiuri rezistente, biofungicide, biostimulante și practici agronomice optimizate. Combinația dintre instrumentele tradiționale și cele moderne de diagnostic, susținută de evaluarea fitopatologică expertă, este cheia pentru o producție durabilă în condițiile schimbărilor climatice.

Bolile plantelor continuă să fie una dintre cele mai serioase provocări pentru agricultura modernă, provocând pierderi anuale semnificative de producție, calitate și reziliență a agroecosistemelor. Conform lui Fang și Ramasamy (2015), pierderile cauzate de patogeni "variază între 20% și 40%" și reprezintă un factor cheie care amenință securitatea alimentară globală. În condițiile schimbărilor climatice, ale sistemelor de producție intensive și ale fluxurilor comerciale globalizate, riscul de epidemii, apariția de noi rase și răspândirea patogenilor invazivi crește semnificativ (Juroszek & von Tiedemann, 2011).

Managementul eficient al bolilor necesită două direcții interconectate: diagnosticul precis și oportun și strategiile de control durabile care integrează abordări biologice, agronomice, chimice și digitale. În ultimele decenii, diagnosticul a suferit o transformare profundă – de la evaluarea vizuală și microscopie la metode moleculare, platforme de fenotipare de mare capacitate, senzori la distanță și algoritmi de învățare profundă. După cum notează Balodi et al. (2017), "știința diagnosticului bolilor a evoluat de la inspecția vizuală la tehnici serologice și moleculare extrem de sensibile," crescând semnificativ acuratețea și viteza de detectare.

În paralel, conceptul de control al bolilor se mută de la soluțiile chimice unilaterale către un management integrat, ecologic și evolutiv solid. He et al. (2016) subliniază că managementul durabil trebuie să "creeze condiții favorabile pentru creșterea plantelor și nefavorabile pentru reproducerea și evoluția patogenilor," combinând Rezistența, Evitarea, Eliminarea, Remedierea (RAER). Noile tendințe includ biocontrolul, extractele vegetale, abordările genetice, modelele predictive și sistemele digitale de suport pentru decizii (Mukhtar et al., 2023).

În acest context, sunt rezumate progresele științifice contemporane în două direcții cheie:

(1) diagnosticul bolilor plantelor, incluzând metode clasice, optice și bazate pe IA;

(2) controlul și managementul integrat, luând în considerare abordările ecologice, biologice, genetice și tehnologice.

Această dublă focalizare permite urmărirea modului în care progresele în diagnostic susțin un management al bolilor mai precis, durabil și adaptiv în contextul agroecosistemelor în schimbare dinamică.

Diagnosticul eficient este fundamentul oricărei strategii de management al bolilor. Acesta determină decizia corectă, minimizează pierderile și permite intervenția timpurie pentru control. După cum subliniază Balodi et al., (2017), "știința diagnosticului bolilor a evoluat de la inspecția vizuală... la tehnici serologice și moleculare extrem de sensibile." Abordările moderne pot fi grupate în trei direcții principale: metode de laborator clasice, tehnologii optice și de la distanță și inteligență artificială.

Tehnicile serologice precum ELISA, imunofluorescența și testele rapide imunocromatografice rămân utilizate pe scară largă datorită specificității și aplicabilității în condiții de câmp. ELISA este una dintre cele mai răspândite metode, unde "schimbarea vizuală de culoare permite o detectare ușoară" (Fang & Ramasamy, 2015). Cu toate acestea, sensibilitatea pentru patogenii bacterieni este limitată.

Metodele moleculare, în special PCR și variantele sale (imbricată, multiplex, timp real), oferă cea mai mare acuratețe. Balodi et al., (2017) notează că analizele bazate pe PCR sunt "specifice, sensibile, eficiente, rapide și relativ economice." PCR-ul în timp real permite evaluarea cantitativă și este deosebit de valoros pentru testarea semințelor și a patogenilor de carantină.

Platformele de fenotipare (fluorescența clorofilei, imagistica hiperspectrală și termică) oferă observație nedistructivă și repetată. Conform lui Balodi et al., (2017) "aceste metode sunt nedistructive... și permit vizualizarea reacțiilor localizate." Diagnosticul hiperspectral este deosebit de promițător pentru detectarea timpurie, deoarece surprinde schimbări fiziologice înainte ca simptomele vizibile să apară.

Fang și Ramasamy (2015) subliniază că tehnicile hiperspectrale "sunt utilizate pe scară largă pentru identificarea bolilor prin schimbări în reflectanță." Termografia și fluorescența completează analiza, dar sunt sensibile la condițiile externe și necesită adesea combinarea cu alte metode.

În ultimii ani, învățarea profundă a devenit un instrument cheie pentru recunoașterea automată a bolilor. Li et al., (2021) notează că "învățarea profundă evită deficiențele selecției manuale a caracteristicilor... și face extracția caracteristicilor mai obiectivă." Arhitecturile CNN precum AlexNet, GoogLeNet, ResNet și DenseNet ating acurateți peste 95–99% pe seturi de date controlate. Saleem et al., (2019) arată că GoogLeNet depășește AlexNet pe PlantVillage, iar Demilie (2024) concluzionează că rețelele neuronale convoluționale "sunt adesea alegerea preferată... datorită capacității lor de a capta ierarhii spațiale." Cu toate acestea, condițiile reale de câmp rămân o provocare și necesită modele mai complexe combinate cu senzori la distanță și sisteme predictive.

Strategiile moderne de control evoluează de la abordările dominate de chimicale către sisteme integrate, orientate ecologic și durabile din punct de vedere evolutiv. Scopul principal este reducerea presiunii patogenilor menținând în același timp productivitatea și echilibrul ecologic.

Schimbările climatice modifică epidemiologia bolilor și necesită strategii adaptive. Juroszek și von Tiedemann (2011) notează că "măsurile preventive... pot deveni deosebit de importante în viitor." Mukhtar et al., (2023) subliniază că Managementul Integrat al Bolilor (IPDM) este "cea mai potrivită și relevantă metodă în circumstanțele actuale." Noile tendințe includ: extracte vegetale – de ex., *Lantana camara*, ale cărei extracte "suprimă creșterea *Pyricularia oryzae* și *Xanthomonas* spp."; abordări genetice – expresia regulatorilor precum AtMYB12, care "crește nivelurile de flavonoide și rezistența la mai mulți patogeni"; rezistența derivată de la patogen (PDR) – strategii transgenice împotriva virusurilor.

Diagnosticul și sistemele bazate pe IA susțin managementul prin: detectarea și localizarea timpurie a focarelor; reducerea tratamentelor inutile; integrarea cu modele predictive; monitorizarea eficacității și a rezistenței.

După cum notează Demilie (2024), Învățarea Automată și Învățarea Profundă "îmbunătățesc performanța și viteza de detectare și clasificare," făcându-le o componentă cheie a sistemelor moderne de Management Integrat al Dăunătorilor (IPM).

Sinergia dintre diagnosticul modern și managementul integrat creează noi oportunități pentru o agricultură precisă, eficientă și ecologic durabilă. Această combinație permite nu doar reducerea pierderilor, ci și construirea unor agroecosisteme mai reziliente, capabile să răspundă provocărilor viitoare.

Materiale și Metode

Principalii patogeni care afectează culturile legumicole sunt virușii (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), bacteriile (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) și ciupercile patogene precum *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* și *Botrytis* (Figura 1).



Figura 1. Simptome de mană a cartofului, verticilioză pe ardei, pete bacteriene pe ardei, cancer bacterian pe tomate

Schimbările climatice duc la "creșterea temperaturilor → dezvoltare mai rapidă a patogenilor" și "sezoane de vegetație mai lungi → mai multe cicluri de infecție." În scopuri de diagnostic, au fost utilizate atât metode tradiționale, cât și moderne. Evaluarea inițială a fost diagnosticul vizual, care este rapid dar subiectiv, deoarece "simptomele se pot suprapune între diferiți patogeni sau factori abiotici." Microscopia a fost aplicată pentru observarea structurilor morfologice, cu colorații specifice utilizate în unele cazuri. Medii de cultură au fost utilizate pentru izolarea bacteriilor și ciupercilor, în timp ce virușii au fost diagnosticați folosind teste imunocromatografice.

Testele rapide imunocromatografice utilizate au fost: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® și LOEWE® FAST, care permit detectarea virușilor, bacteriilor și a unor ciuperci patogene în 5-10 minute și sunt "potrivite pentru câmp și laborator" (Figura 2).



Figura 2. Teste rapide imunocromatografice: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® și LOEWE®FAST

Pentru confirmarea rezultatelor, sunt recomandate metode moleculare (PCR, qPCR, LAMP), distinse prin "sensibilitate foarte mare" și "specificitate ridicată," dar care necesită un laborator specializat. Metodele hiperspectrale pentru detectarea timpurie a infecțiilor și evaluarea stresului fiziologic sunt utilizate pe scară largă, tehnologia fiind definită ca "neinvazivă, rapidă și scalabilă." Drone cu senzori RGB, multiespectrali, hiperspectrali și termici au fost utilizate pentru monitorizarea câmpurilor, cartarea bolilor și evaluarea biomasei. Modelele predictive bazate pe temperatură, umiditate, precipitații și microclimat au fost utilizate pentru a prognoza riscul de infecție și a optimiza momentul tratamentelor. Utilizate pe scară largă în producția legumicolă sunt biofungicidele (de ex., *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pythium oligandrum*), biostim