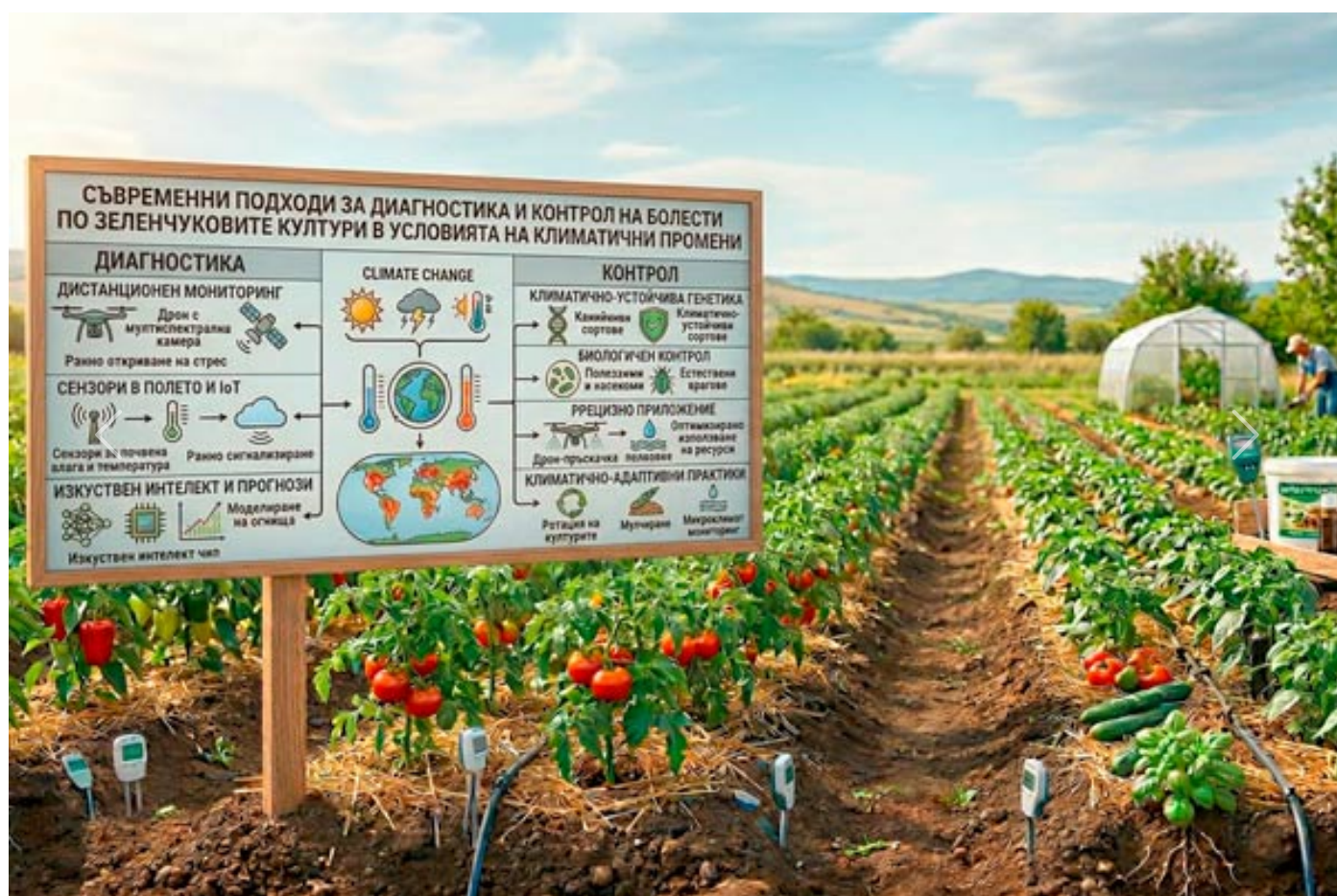


Savremeni pristupi za dijagnostiku i kontrolu bolesti povrtarskih kultura u uslovima klimatskih promena

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

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



Rezime

Klimatske promene značajno menjaju dinamiku bolesti povrtarskih useva, dovodeći do bržeg razvoja patogena, većeg preživljavanja inokuluma i češćih epidemijskih izbivanja. Povišene temperature, ekstremne padavine i periodi suše stvaraju uslove koji pogoduju infekcijama virusa, bakterija i gljivičnih patogena. U ovim uslovima, tradicionalne dijagnostičke metode su često nedovoljne zbog preklapajućih simptoma i promena izazvanih stresom. Savremeni pristupi

uključuju brze imunohromatografske testove, molekularne metode, hiperspektralnu dijagnostiku, tehnologije dronova i prediktivne modele. Efektivno upravljanje bolestima zahteva integralni pristup koji uključuje otporne sorte, biofungicide, biostimulatore i optimizovane agronomске праксе. Kombinacija tradicionalnih i savremenih dijagnostičkih alata, podržana stručnom fitopatološkom procenom, ključna je za održivu proizvodnju u uslovima klimatskih promena.

Biljne bolesti i dalje predstavljaju jedan od najozbiljnijih izazova za savremenu poljoprivredu, uzrokujući značajne godišnje gubitke u prinosu, kvalitetu i otpornosti agroekosistema. Prema Fangu i Ramasamyju (2015), gubici uzrokovani patogenima "kreću se između 20% i 40%" i predstavljaju ključni faktor koji ugrožava globalnu bezbednost hrane. U uslovima klimatskih promena, intenzivnih sistema proizvodnje i globalizovanih tokova trgovine, rizik od epidemija, pojave novih rasa i širenja invazivnih patogena značajno se povećava (Jurossek & von Tiedemann, 2011).

Efektivno upravljanje bolestima zahteva dva međusobno povezana pravca: preciznu i pravovremenu dijagnozu i održive strategije kontrole koje integrišu biološke, agronomске, hemijske i digitalne pristupe. Poslednjih decenija, dijagnoza je doživela duboku transformaciju – od vizuelne procene i mikroskopije do molekularnih metoda, platformi za fenotipizaciju visoke propusnosti, daljinskih senzora i algoritama dubokog učenja. Kako su приметили Balodi i sar. (2017), "nauka o dijagnozi bolesti evoluirala je od vizuelne inspekcije do veoma osetljivih seroloških i molekularnih tehnika," značajno povećavajući tačnost i brzinu detekcije.

Paralelno s tim, koncept kontrole bolesti se pomera od jednostranih hemijskih rešenja ka integralnom, ekološki i evolutivno opravdanom upravljanju. He i sar. (2016) naglašavaju da održivo upravljanje mora "stvoriti uslove povoljne za rast biljaka i nepovoljne za razmnožavanje i evoluciju patogena," kombinujući Otpornost, Izbegavanje, Eliminaciju, Remedijaciju (RAER). Novi trendovi uključuju biokontrolu, biljne ekstrakte, genetičke pristupe, prediktivne modele i digitalne sisteme za podršku odlučivanju (Mukhtar i sar., 2023).

U ovom kontekstu, sumirani su savremeni naučni napredak u dva ključna pravca:

(1) dijagnoza biljnih bolesti, uključujući klasične, optičke i metode zasnovane na veštačkoj inteligenciji;

(2) kontrola i integralno upravljanje, uzimajući u obzir ekološke, biološke, genetičke i tehnološke pristupe.

Ovaj dvostruki fokus omogućava praćenje kako napredak u dijagnozi podržava preciznije, održivije i adaptivnije upravljanje bolestima u kontekstu dinamički promenljivih agroekosistema.

Efektivna dijagnoza je osnova svake strategije upravljanja bolestima. Ona određuje ispravnu odluku, minimizira gubitke i omogućava ranu intervenciju za kontrolu. Kako su naglasili Balodi i sar., (2017), "nauka o dijagnozi bolesti evoluirala je od vizuelne inspekcije... do veoma osetljivih seroloških i molekularnih tehnika." Savremeni pristupi mogu se grupisati u tri glavna pravca: klasične laboratorijske metode, optičke i daljinske tehnologije i veštačka inteligencija.

Serološke tehnike kao što su ELISA, imunofluorescencija i brzi imunohromatografski testovi i dalje se široko koriste zbog svoje specifičnosti i primenljivosti u terenskim uslovima. ELISA je jedna od najrasprostranjenijih metoda, gde "vizuelna promena boje omogućava laku detekciju" (Fang & Ramasamy, 2015). Međutim, osetljivost za bakterijske patogene je ograničena.

Molekularne metode, posebno PCR i njene varijante (ugnježđeni, multipleks, real time), nude najveću tačnost. Balodi i sar., (2017) primećuju da su PCR analize "specifične, osetljive, efikasne, brze i relativno ekonomične." PCR u realnom vremenu omogućava kvantitativnu procenu i posebno je vredna za testiranje semena i karantinske patogene.

Platforme za fenotipizaciju (hlorofilna fluorescencija, hiperspektralno i termalno snimanje) obezbeđuju nedestruktivno i ponovljeno posmatranje. Prema Balodiju i sar., (2017) "ove metode su nedestruktivne... i omogućavaju vizualizaciju lokalizovanih reakcija." Hiperspektralna dijagnostika je posebno obećavajuća za ranu detekciju, jer hvata fiziološke promene pre nego što se pojave vidljivi simptomi.

Fang i Ramasamy (2015) naglašavaju da se hiperspektralne tehnike "široko koriste za identifikaciju bolesti kroz promene u refleksiji." Termografija i fluorescencija dopunjuju analizu, ali su osetljive na spoljašnje uslove i često zahtevaju kombinaciju sa drugim metodama.

Poslednjih godina, duboko učenje je postalo ključni alat za automatsko prepoznavanje bolesti. Li i sar., (2021) primećuju da "duboko učenje izbegava nedostatke ručnog odabira karakteristika... i čini ekstrakciju karakteristika objektivnijom." CNN arhitekture kao što su AlexNet, GoogLeNet,

ResNet i DenseNet postižu tačnost iznad 95–99% na kontrolisanim skupovima podataka. Saleem i sar., (2019) pokazuju da GoogLeNet nadmašuje AlexNet na PlantVillage, a Demilie (2024) zaključuje da su CNN "često preferirani izbor... zbog njihove sposobnosti da uhvate prostorne hijerarhije." Međutim, stvarni terenski uslovi ostaju izazov i zahtevaju složenije modele kombinovane sa daljinskim senzorima i prediktivnim sistemima.

Savremene strategije kontrole evoluiraju od hemijski dominiranih pristupa ka integralnim, ekološki orijentisanim i evolutivno održivim sistemima. Glavni cilj je smanjenje pritiska patogena uz održavanje produktivnosti i ekološke ravnoteže.

Klimatske promene menjaju epidemiologiju bolesti i zahtevaju adaptivne strategije. Juroszek i von Tiedemann (2011) primećuju da "preventivne mere... mogu postati posebno važne u budućnosti." Mukhtar i sar., (2023) naglašavaju da je IPDM "najprikladnija i najrelevantnija metoda u trenutnim okolnostima." Novi trendovi uključuju: biljne ekstrakte – npr. *Lantana camara*, čiji ekstrakti "suprimiraju rast *Pyricularia oryzae* i *Xanthomonas* spp."; genetičke pristupe – ekspresija regulatora kao što je AtMYB12, koji "povećava nivo flavonoida i otpornost na nekoliko patogena"; otpornost izvedena iz patogena (PDR) – transgene strategije protiv virusa.

Dijagnoza i sistemi zasnovani na VI podržavaju upravljanje kroz: ranu detekciju i lokalizaciju izbijanja; smanjenje nepotrebnih tretmana; integraciju sa prediktivnim modelima; praćenje efikasnosti i otpornosti.

Kako je primetio Demilie (2024), mašinsko učenje i duboko učenje "poboljšavaju performanse i brzinu detekcije i klasifikacije," čineći ih ključnom komponentom savremenih IPM sistema.

Sinergija između savremene dijagnoze i integralnog upravljanja stvara nove mogućnosti za preciznu, efektivnu i ekološki održivu poljoprivredu. Ova kombinacija omogućava ne samo smanjenje gubitaka već i izgradnju otpornijih agroekosistema sposobnih da odgovore na buduće izazove.

Materijali i metode

Glavni patogeni koji utiču na povrtarske useve su virusi (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), bakterije (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) i gljivični patogeni kao što su *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* i *Botrytis* (Slika 1).



Slika 1. Simptomi plamenjače krompira, verticilijumskog uvenuća na paprici, bakterioznih pegavosti na paprici, bakteriozne rakačice na paradajzu

Klimatske promene dovode do "povišenih temperatura → bržeg razvoja patogena" i "dužih vegetacionih sezona → više ciklusa infekcije." Za dijagnostičke svrhe korišćene su i tradicionalne i savremene metode. Početna procena bila je vizuelna dijagnoza, koja je brza ali subjektivna, jer se "simptomi mogu preklapati između različitih patogena ili abiotičkih faktora." Mikroskopija je primenjena za posmatranje morfoloških struktura, sa specifičnim bojenjem u nekim slučajevima. Hranljive podloge korišćene su za izolaciju bakterija i gljiva, dok su virusi dijagnostikovani korišćenjem imunohromatografskih testova.

Korišćeni brzi imunohromatografski testovi bili su: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® i LOEWE® FAST, koji omogućavaju detekciju virusa, bakterija i nekih gljivičnih patogena u roku od 5–10 minuta i "pogodni su za terenske i laboratorijske uslove" (Slika 2).



Slika 2. Brzi imunohromatografski testovi: AgriStrip® (BIOREBA), PockeT Diagnostic® i LOEWE®FAST