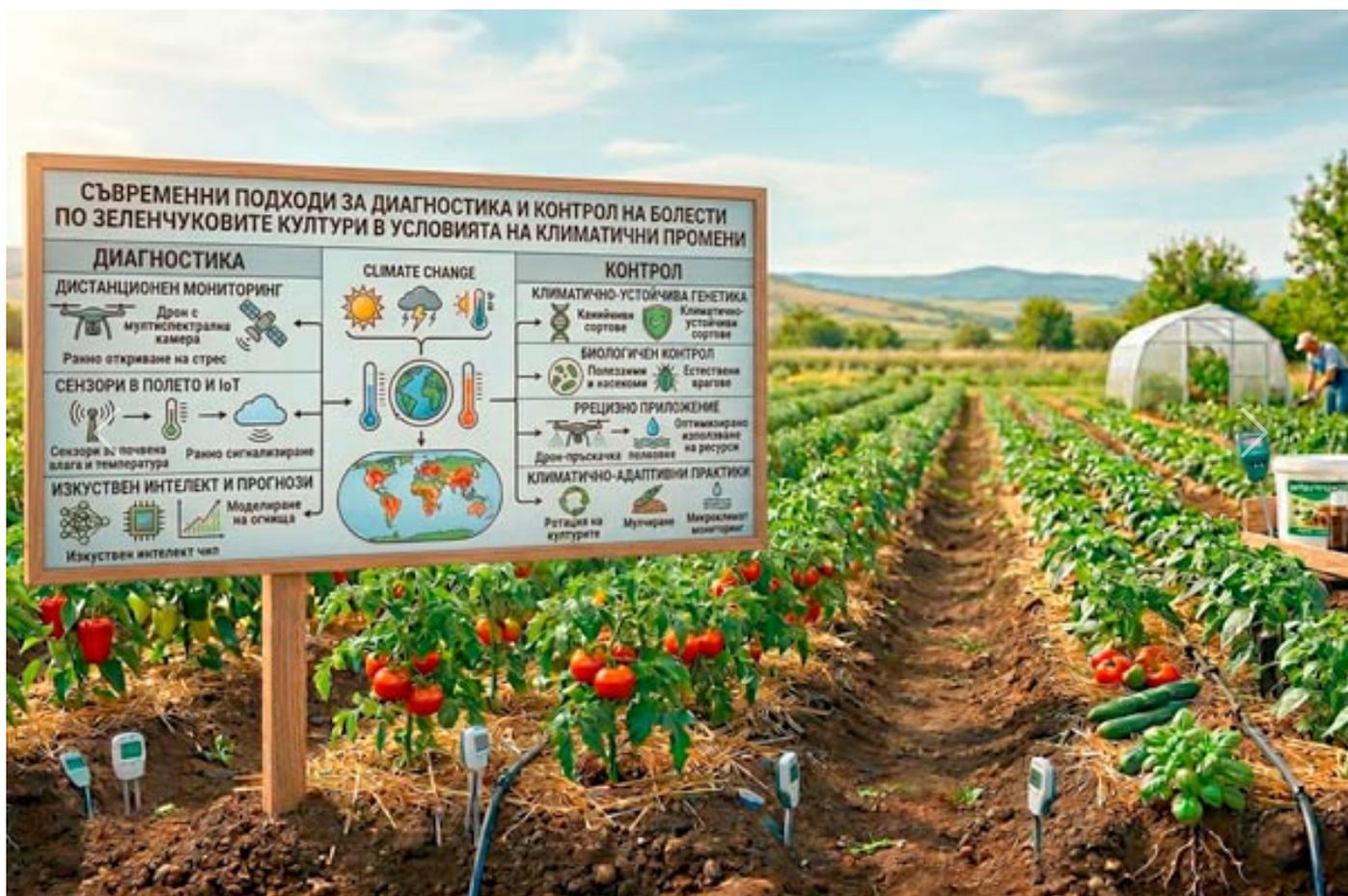


# Современные подходы к диагностике и контролю заболеваний овощных культур в условиях изменения климата

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

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



## Резюме

Изменение климата существенно меняет динамику болезней овощных культур, приводя к более быстрому развитию патогенов, повышению выживаемости инокулюма и более частым эпифитотийным вспышкам. Повышенные температуры, экстремальные осадки и засушливые периоды создают условия, способствующие заражению вирусами, бактериями и грибковыми патогенами. В этих условиях традиционные методы диагностики часто

оказываются недостаточными из-за перекрывающихся симптомов и изменений, вызванных стрессом. Современные подходы включают быстрые иммунохроматографические тесты, молекулярные методы, гиперспектральную диагностику, технологии дронов и прогностические модели. Эффективная борьба с болезнями требует комплексного подхода, включающего устойчивые сорта, биофунгициды, биостимуляторы и оптимизированные агротехнические практики. Сочетание традиционных и современных диагностических инструментов, поддерживаемое экспертной фитопатологической оценкой, является ключом к устойчивому производству в условиях изменения климата.

Болезни растений продолжают оставаться одной из самых серьезных проблем для современного сельского хозяйства, ежегодно нанося значительные потери урожайности, качества и устойчивости агроэкосистем. По данным Fang и Ramasamy (2015), потери, вызванные патогенами, «колеблются от 20% до 40%» и представляют собой ключевой фактор, угрожающий глобальной продовольственной безопасности. В условиях изменения климата, интенсивных систем производства и глобализированных товарных потоков риск эпифитотий, появления новых рас и распространения инвазивных патогенов значительно возрастает (Juroszek & von Tiedemann, 2011).

Эффективная борьба с болезнями требует двух взаимосвязанных направлений: точной и своевременной диагностики и устойчивых стратегий контроля, интегрирующих биологические, агротехнические, химические и цифровые подходы. За последние десятилетия диагностика претерпела глубокую трансформацию – от визуальной оценки и микроскопии к молекулярным методам, платформам высокопроизводительного фенотипирования, дистанционным сенсорам и алгоритмам глубокого обучения. Как отмечают Balodi et al. (2017), «наука диагностики болезней эволюционировала от визуального осмотра до высокочувствительных серологических и молекулярных техник», что значительно повысило точность и скорость обнаружения.

Параллельно этому концепция контроля болезней смещается от односторонних химических решений к комплексному, экологически и эволюционно обоснованному управлению. He et al. (2016) подчеркивают, что устойчивое управление должно «создавать условия, благоприятные для роста растений и неблагоприятные для размножения и эволюции патогенов», сочетая Устойчивость, Избегание, Устранение, Восстановление (RAER). Новые тенденции включают биоконтроль, растительные экстракты, генетические подходы,

прогностические модели и цифровые системы поддержки принятия решений (Mukhtar et al., 2023).

В этом контексте суммируются современные научные достижения по двум ключевым направлениям:

(1) диагностика болезней растений, включая классические, оптические и методы на основе ИИ;

(2) контроль и комплексное управление, учитывающее экологические, биологические, генетические и технологические подходы.

Такой двойной фокус позволяет проследить, как достижения в диагностике поддерживают более точное, устойчивое и адаптивное управление болезнями в контексте динамично меняющихся агроэкосистем.

Эффективная диагностика является основой любой стратегии управления болезнями. Она определяет правильное решение, минимизирует потери и позволяет проводить раннее вмешательство для контроля. Как подчеркивают Balodi et al., (2017), «наука диагностики болезней эволюционировала от визуального осмотра... до высокочувствительных серологических и молекулярных техник». Современные подходы можно сгруппировать в три основных направления: классические лабораторные методы, оптические и дистанционные технологии, а также искусственный интеллект.

Серологические техники, такие как ИФА, иммунофлуоресценция и быстрые иммунохроматографические тесты, остаются широко используемыми благодаря своей специфичности и применимости в полевых условиях. ИФА является одним из самых распространенных методов, где «визуальное изменение цвета позволяет легко обнаружить» (Fang & Ramasamy, 2015). Однако чувствительность для бактериальных патогенов ограничена.

Молекулярные методы, особенно ПЦР и ее варианты (вложенная, мультиплексная, в реальном времени), предлагают наивысшую точность. Balodi et al., (2017) отмечают, что анализы на основе ПЦР являются «специфичными, чувствительными, эффективными, быстрыми и относительно экономичными». ПЦР в реальном времени позволяет проводить

количественную оценку и особенно ценна для тестирования семян и карантинных патогенов.

Платформы фенотипирования (флуоресценция хлорофилла, гиперспектральная и тепловизионная съемка) обеспечивают неразрушающее и повторяющееся наблюдение. По данным Balodi et al., (2017) «эти методы являются неразрушающими... и позволяют визуализировать локализованные реакции». Гиперспектральная диагностика особенно перспективна для раннего обнаружения, так как фиксирует физиологические изменения до появления видимых симптомов.

Fang и Ramasamy (2015) подчеркивают, что гиперспектральные техники «широко используются для идентификации болезней через изменения в отражательной способности». Термография и флуоресценция дополняют анализ, но чувствительны к внешним условиям и часто требуют сочетания с другими методами.

В последние годы глубокое обучение стало ключевым инструментом для автоматического распознавания болезней. Li et al., (2021) отмечают, что «глубокое обучение избегает недостатков ручного выбора признаков... и делает извлечение признаков более объективным». Архитектуры CNN, такие как AlexNet, GoogLeNet, ResNet и DenseNet, достигают точности выше 95–99% на контролируемых наборах данных. Saleem et al., (2019) показывают, что GoogLeNet превосходит AlexNet на PlantVillage, а Demilie (2024) заключает, что CNN «часто являются предпочтительным выбором... благодаря их способности улавливать пространственные иерархии». Однако реальные полевые условия остаются проблемой и требуют более сложных моделей в сочетании с дистанционными сенсорами и прогностическими системами.

Современные стратегии контроля эволюционируют от подходов, доминируемых химией, к комплексным, экологически ориентированным и эволюционно устойчивым системам. Основная цель – снизить давление патогенов, сохраняя продуктивность и экологический баланс.

Изменение климата меняет эпидемиологию болезней и требует адаптивных стратегий. Juroszek и von Tiedemann (2011) отмечают, что «превентивные меры... могут стать особенно важными в будущем». Mukhtar et al., (2023) подчеркивают, что IPDM (интегрированное управление болезнями растений) является «наиболее подходящим и актуальным методом в

текущих обстоятельствах». Новые тенденции включают: растительные экстракты – например, *Lantana camara*, чьи экстракты «подавляют рост *Pyricularia oryzae* и *Xanthomonas* spp.»; генетические подходы – экспрессия регуляторов, таких как AtMYB12, которая «повышает уровень флавоноидов и устойчивость к нескольким патогенам»; устойчивость, полученная от патогена (PDR) – трансгенные стратегии против вирусов.

Диагностика и системы на основе ИИ поддерживают управление через: раннее обнаружение и локализацию вспышек; сокращение ненужных обработок; интеграцию с прогностическими моделями; мониторинг эффективности и устойчивости.

Как отмечает Demilie (2024), машинное обучение и глубокое обучение «улучшают производительность и скорость обнаружения и классификации», что делает их ключевым компонентом современных систем IPM.

Синергия между современной диагностикой и комплексным управлением создает новые возможности для точного, эффективного и экологически устойчивого сельского хозяйства. Это сочетание позволяет не только сократить потери, но и построить более устойчивые агроэкосистемы, способные реагировать на будущие вызовы.

## **Материалы и методы**

Основными патогенами, поражающими овощные культуры, являются вирусы (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), бактерии (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) и грибковые патогены, такие как *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* и *Botrytis* (Рисунок 1).



*Рисунок 1. Симптомы фитофтороза картофеля, вертициллезного увядания перца, бактериальной пятнистости перца, бактериального рака томата*

Изменение климата приводит к «повышению температур → более быстрому развитию патогенов» и «удлинению вегетационных периодов → большему количеству циклов заражения». Для диагностических целей использовались как традиционные, так и современные методы. Первоначальная оценка проводилась визуальной диагностикой, которая является быстрой, но субъективной, так как «симптомы могут перекрываться между разными патогенами или абиотическими факторами». Микроскопия применялась для наблюдения морфологических структур, в некоторых случаях использовалось специфическое окрашивание. Для выделения бактерий и грибов использовались питательные среды, а вирусы диагностировались с помощью иммунохроматографических тестов.

Использовались следующие быстрые иммунохроматографические тесты: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® и LOEWE® FAST, которые позволяют обнаруживать вирусы, бактерии и некоторые грибковые патогены в течение 5–10 минут и являются «пригодными для полевых и лабораторных условий» (Рисунок 2).



Рисунок 2. Быстрые иммунохроматографические тесты: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® и LOEWE® FAST

Для подтверждения результатов рекомендуются молекулярные методы (ПЦР, qПЦР, LAMP), отличающиеся «очень высокой чувствительностью» и «высокой специфичностью», но требующие специализированной лаборатории. Широко используются гиперспектральные методы для раннего обнаружения инфекций и оценки физиологического стресса, при этом технология определяется как «неинвазивная, быстрая и масштабируемая». Дроны с RGB, мультиспектральными, гиперспектральными и тепловизионными сенсорами использовались для полевого мониторинга, картирования болезней и оценки биомассы. Прогностические модели на основе температуры, влажности, осадков и микроклимата использовались для прогнозирования риска заражения и оптимизации сроков обработок. Широко применяются в овощеводстве биофунгициды (например, *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pythium oligandrum*), биостимуляторы (аминокислоты, водоросли, гуминовые кислоты) и химические фунгициды (препараты на основе меди, Манкоцеб, Азоксистробин, Дифеноконазол и др.).

## Результаты

Влияние изменения климата на динамику патогенов и частоту заболеваний овощных культур явно выражено. Повышенные температуры ускоряют развитие множества патогенов, а более теплые зимы повышают выживаемость инокулюма. Экстремальные осадки создают благоприятные условия для развития грибных и бактериальных болезней, так как «высокая влажность > 90% ускоряет споруляцию», а капли дождя способствуют дальнейшему распространению бактерий. Засуха приводит к физиологическому стрессу и микротрещинам на листьях