

ӨСІМДІК АУРУЛАРЫ ҚОЗДЫРҒЫШТАРЫНЫҢ ТАРАЛУЫН БАҚЫЛАУ ЖӘНЕ БИОЛОГИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІК

¹С.Ғ. Кеңесбай^{id}, ¹Ш.Е. Сайлаубай^{id}, ¹М.Ж. Шарипова*^{id}, ²О.С. Абдураимов^{id},
¹Ш.Т. Тустубаева^{id}

¹Астана Халықаралық университеті, Астана, Қазақстан

²Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Ботаника институты, Ташкент, Өзбекстан

*e-mail: mzhakypzhan@mail.ru

С.Ғ. Кеңесбай – Астана халықаралық университетінің «Biosafety and Biosecurity» білім беру бағдарламасының 2-курс студенті, Астана, Қазақстан, e-mail: kns.symbat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2873-7975>

Ш.Е. Сайлаубай – Астана халықаралық университетінің «Biosafety and Biosecurity» білім беру бағдарламасының 2-курс студенті, Астана, Қазақстан, e-mail: shyraileysailaubai@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8565-8751>

М.Ж. Шарипова – PhD, Астана Халықаралық университетінің қауымдастырылған профессоры, Астана, Қазақстан, e-mail: mzhakypzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9467-1483>

О.С. Абдураимов – биология ғылымдарының докторы, табиғи өсімдік ресурстарының кадастры және популяциялық биология зертханасының аға ғылыми қызметкері, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Ботаника институты, Ташкент, Өзбекстан, e-mail: ozodbek88@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9087-8949>

Ш.Т. Тустубаева – PhD, Астана Халықаралық университетінің қауымдастырылған профессоры м.а., Астана, Қазақстан, e-mail: tustubaeva.shynar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6581-2403>

Аңдатпа. Мақалада өсімдік ауруларының қоздырғыштарын бақылау мен өсімдік биоқауіпсіздігі туралы әдеби деректерге шолу жасалды. Шығын үлкен. Негізгі азық-түлік дақылдары жыл сайын фитопатогендердің кесірінен өнімнің 13-22%-ын жоғалтады. Жұмыста ауруларды басқарудың негізгі тәсілдері қарастырылады: агротехникалық және карантиндік шаралар, төзімді сорттар селекциясы, химиялық қорғау және биологиялық бақылау агенттері. Өсімдік биоқауіпсіздігі «Бір денсаулық» (One Health) тұжырымдамасының бөлігі ретінде талданады, өйткені өсімдік денсаулығы азық-түлік қауіпсіздігімен, экожүйе тұрақтылығымен және адам денсаулығымен тікелей байланысты. Мониторинг пен тәуекелді бағалаудың, жергілікті қауымдастықтарды тартудың және гермоплазма алмасу кезіндегі карантиндік бақылаудың рөлі көрсетілген. Диагностика әдістері кезең-кезеңімен салыстырылады: көзбен бағалау мен микроскопиядан бастап серологиялық тәсілдерге (ELISA, LFD), ПТР-дың түрлі нұсқаларына және изотермиялық амплификацияға (LAMP, RPA) дейін. Қашықтықтан зондтауға жеке тоқталады: гиперспектрлік, мультиспектрлік және жылулық түсірілім, ұшқышсыз ұшу аппараттары, жасанды интеллект пен IoT датчиктері. Бірақ бір-бір әдіс жалғыз өзі жеткіліксіз. Ауруды ерте анықтау үшін далалық жедел тесттер мен қашықтықтан зондтауды зертханалық молекулалық растаумен ұштастыру керек, ал бұл ұштастыру ұлттық фитосанитарлық бақылау жүйесінің негізіне айналуы тиіс.

Кілт сөздер: өсімдік аурулары, фитопатогендер, биологиялық қауіпсіздік, «Бір денсаулық», фитосанитарлық мониторинг, молекулалық диагностика, қашықтықтан зондтау, биологиялық бақылау.

КОНТРОЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ БОЛЕЗНЕЙ РАСТЕНИЙ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

¹С.Г. Кенесбай, ¹Ш.Е. Сайлаубай, ¹М.Ж. Шарипова*, ²О.С. Абдураимов,
¹Ш.Т. Тустубаева

¹Международный университет Астана, Астана, Казахстан

²Институт ботаники, Академия наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан

*e-mail: mzhakypzhan@mail.ru

С.Г. Кенесбай – студент 2 курса образовательной программы «Biosafety and Biosecurity» Международного университета Астана, Астана, Казахстан, e-mail: kns.symbat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2873-7975>

Ш.Е. Сайлаубай – студент 2 курса образовательной программы «Biosafety and Biosecurity» Международного университета Астана, Астана, Казахстан, e-mail: shyraileysailaubai@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8565-8751>

М.Ж. Шарипова – PhD, ассоциированный профессор Международного университета Астана, Астана, Казахстан, e-mail: mzhakypzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9467-1483>

О.С. Абдураимов – доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории кадастра природных растительных ресурсов и популяционной биологии Института ботаники Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан, e-mail: ozodbek88@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9087-8949>

Ш.Т. Тустубаева – PhD, и.о. ассоциированного профессора Международного университета Астана, Астана, Казахстан, e-mail: tustubaeva.shynar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6581-2403>

Аннотация. Статья представляет обзор литературы по контролю возбудителей болезней растений и биобезопасности растений. Потери велики. Основные продовольственные культуры ежегодно теряют от фитопатогенов 13-22% урожая. Рассмотрены основные способы управления болезнями: агротехнические и карантинные меры, селекция устойчивых сортов, химическая защита, агенты биологического контроля. Биобезопасность растений разобрана как часть концепции «Единое здоровье» (One Health): здоровье растений напрямую связано с продовольственной безопасностью, устойчивостью экосистем и здоровьем человека. Показана роль мониторинга и оценки рисков, участия местных сообществ и карантинного контроля при обмене гермоплазмой. Методы диагностики сопоставлены по ступеням: от визуальной оценки и микроскопии к серологическим подходам (ИФА, иммунохроматографические тест-полоски), разным вариантам ПЦР и изотермической амплификации (LAMP, RPA). Отдельно разобрано дистанционное зондирование: гиперспектральная, мультиспектральная и тепловая съёмка, беспилотные летательные аппараты, искусственный интеллект и датчики IoT. Но ни один метод сам по себе задачу не закрывает. Раннее выявление болезней требует связи быстрых полевых тестов и дистанционного зондирования с лабораторным молекулярным подтверждением, причём эта связка должна лечь в основу национальной системы фитосанитарного контроля, а не оставаться набором разрозненных методик, которые каждая лаборатория применяет по-своему.

Ключевые слова: болезни растений, фитопатогены, биологическая безопасность, «Единое здоровье», фитосанитарный мониторинг, молекулярная диагностика, дистанционное зондирование, биологический контроль.

CONTROL OF THE SPREAD OF PLANT DISEASE PATHOGENS AND BIOSECURITY

¹S.G. Kengesbay, ¹Sh.E. Sailaubai, ¹M.Zh. Sharipova*, ²O. S. Abduraimov,
¹Sh.T. Tustubayeva

¹Astana International University, Astana, Kazakhstan

²Institute of Botany, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

*e-mail: mzhakypzhan@mail.ru

S.G. Kengesbay – second-year student of the “Biosafety and Biosecurity” educational program at Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: kns.symbat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2873-7975>

Sh.E. Sailaubai – second-year student of the “Biosafety and Biosecurity” educational program at Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: shyraileysailubai@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8565-8751>

M.Zh. Sharipova – PhD, Associate Professor at Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: mzhakypzhan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9467-1483>

O.S. Abduraimov – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Cadastre of Natural Plant Resources and Population Biology, Institute of Botany, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan, e-mail: ozodbek88@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9087-8949>

Sh.T. Tustubayeva – PhD, Acting Associate Professor at Astana International University, Astana, Kazakhstan, e-mail: tustubaeva.shynar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6581-2403>

Abstract. This review examines the control of plant disease pathogens and plant biosecurity. Losses are heavy. Major food crops lose 13-22% of their yield to pathogens every year. The paper covers the main approaches to disease management: agronomic and quarantine measures, breeding for resistance, chemical protection and biological control agents. Plant biosecurity is treated as part of the One Health concept, because plant health is directly linked to food security, ecosystem stability and human health. The roles of surveillance and risk assessment, community engagement and quarantine screening during germplasm exchange are described. Diagnostic methods are compared step by step, from visual assessment and microscopy to serological tools (ELISA, lateral flow devices), PCR variants and isothermal amplification (LAMP, RPA). Remote sensing is discussed separately: hyperspectral, multispectral and thermal imaging, unmanned aerial vehicles, artificial intelligence and IoT sensors. No single method is enough. Early detection requires rapid field tests and remote sensing combined with laboratory molecular confirmation, and this combination should form the basis of a national phytosanitary control system.

Keywords: plant diseases, phytopathogens, biosecurity, One Health, phytosanitary surveillance, molecular diagnostics, remote sensing, biological control.

Кіріспе. Өсімдіктердің инфекциялық аурулары тарихи тұрғыдан азық-түлік қауіпсіздігіне, экономикалық өсімге және экожүйелердің тепе-теңдігіне теріс әсер етіп, адамзат қоғамы мен қоршаған ортаға елеулі зардаптар әкелді. Мұның айқын мысалы ретінде Ирландиядағы ашаршылықты атауға болады, ол жаппай аштық пен халықтың әлеуметтік-экономикалық жағдайының күрт нашарлауына алып келді (Austin Bourke, 1964: 805-808).

Ауыл шаруашылығы дақылдарының патогендік аурулары өндірістік тізбектің кез келген сатысында туындап, тұрақты дамуға кері әсерін тигізеді. Статистикалық мәліметтерге сәйкес, негізгі азық-түлік дақылдары (күріш, бидай, жүгері, картоп) жыл сайын 13–22% көлемінде өнім жоғалтады. Бұл үдеріс тек тікелей экономикалық шығынға ғана емес, сонымен қатар фитосанитарлық бақылау мен басқару стратегияларын оңтайландыруға бағытталған қосымша шығындардың артуына алып келеді (Oerke E. C., 2006: 31-43; Savary S., et al., 2019: 430-439).

Өсімдік патологиясы – өсімдік организмі, патогендік факторлар және сыртқы

орта жағдайларының өзара күрделі байланысынан туындайтын құбылыс. Агротехникалық тәжірибе барысында адамзат осы үш фактордың тепе-теңдігін басқару арқылы өсімдіктің өнімділігін арттыруға және ауру қоздырғыштарының таралуын шектеуге бағытталған кешенді әдістемелерді қалыптастырды. (Bisht N., Mishra S.K., Chauhan P.S., 2020: 937-951.)

Тәсілдердің таңдауы ауру қоздырғышының түріне, климаттық-географиялық ерекшеліктерге, агрономиялық технологиялардың даму деңгейіне және мемлекеттік реттеу шараларына тікелей байланысты. Олар биотикалық және абиотикалық орта жағдайларын өзгерту, қоздырғыштың белсенділігін тежеу немесе өсімдіктің қорғаныс механизмдерін күшейту мақсатында жеке немесе кешенді түрде (интеграцияланған аурулармен күрес – IDM) қолданылады. Бұл әдістерді агротехникалық (ауыспалы егіс, тазалықты сақтау), карантиндік және жою шаралары, генетикалық селекция (төзімділік сорттарын шығару), физикалық әсерлер (топырақты жабу, суару режимін реттеу) және химиялық препараттар (пестицидтер, иммунностимуляторлар) деп бөлуге болады. Осы стратегиялардың ішінде ие мен қоздырғыш арасындағы өзара әрекеттесу негізіндегі тәсілдер экологиялық тұрғыдан қауіпсіз және экономикалық тиімді саналады. Мұндай тұрақты төзімділік ген-ген деңгейіндегі өзара әрекеттесу арқылы жүзеге асады, бұл мысалы, бидайдың сабақ дақтарына *Puccinia tritricina* немесе картоптың кешенді дақтарына *Phytophthora infestans* қарсы күресте байқалады (Denes T.E., Molnar I., Rakosy-Tican E., 2015: 165-175; Zhang, N. et al., 2021: 279-287).

Биологиялық бақылау әдісін пайдалану кезіндегі негізгі мәселе – оның тиімділігі. Биологиялық бақылау агенттері (ББА) егіннің көлемі мен сапасын қорғау, сонымен қатар жақсы экономикалық нәтижелерге жету үшін, патогендердің дамуын тоқтату не өсімдіктің иммундық деңгейін арттыру арқылы аурудың таралуына едәуір әсер етуі қажет. Жасымықтың фузариозды солуына қарсы қолданылатын коммерциялық ББА аурудың таралуын 50,0%-ға дейін азайтып, өнімділікті 58,7%-ға дейін көтерді (Campanella V., Miceli C., 2021: 105635).

B. myloliquefaciens (VFS2, VF11, VFS14, VFS15 және VFS21) штаммдары *Vicia faba* өсімдіктеріндегі *Fusarium equiseti* (Corda) Sacc. қоздырғышы тудырған ауыр жағдайларды едәуір төмендетіп, науқастану деңгейін толықтай 100%-ға дейін азайтып, өсімдіктердің даму көрсеткішін 82%-ға арттырды (Haddoudi I. et al., 2021: 1049-9644).

Өсімдіктердің биоқауіпсіздігі мен биоқауіпсіздігі осы салада шешуші рөл атқарады. Салауатты өсімдіктер экожүйенің тепе-теңдігін, тамақ қауіпсіздігін және халықтың сау-саламатты болуын қамтамасыз ету үшін аса маңызды, сондықтан өсімдіктердің биоқауіпсіздігі, яғни өсімдіктердің денсаулығын қорғау мен жақсартуға бағытталған шаралар One Health парадигмасының негізгі бөлігі болып табылады (Schröder R., Hilker M., 2008: 308-16).

Өсімдіктер жер бетіндегі тіршіліктің негізін құрайды, олар оттегіні шығарады, көміртекті жұтады және азық-түлік, талшықтар мен дәрі-дәрмекпен қамтамасыз етеді. Өсімдіктердің экологиялық қауіпсіздігі топырақ микроорганизмдерінен бастап, адамдар мен жыртықштарға дейінгі барлық азық желісіне ықпал етеді. Дені сау өсімдіктер түрлі түрлер үшін өмір сүру ортасы мен азық-түлік ресурстарын ұсынып, биоәртүрлілікті жасайды, сонымен қатар экожүйе тұрақтылығын қамтамасыз етеді (Rawat U., Agarwal N.K. 2015:19-28).

Өсімдіктердің биоқауіпсіздігін сақтау тек ауыл шаруашылығының маңызды бағыты емес, сонымен қатар әлемдік деңгейде өте қажет. Осылайша, өсімдіктердің биоқауіпсіздігін «Бір денсаулық» концепциясымен біріктіру ғаламдық денсаулық сақтауды және экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз ету ақсından қажеттілік болып табылады. «Бір денсаулық» идеясы адам, жануар және ортаның денсаулық мәселелерінің тығыз байланысын көрсетеді, бұл контексте өсімдіктердің биоқауіпсіздігінің маңыздылығын айқындайды. Австралияда 2008 жылы карантин және биоқауіпсіздікті қамтамасыз ету шараларын қайта қарау нәтижесінде «Бір биоқауіпсіздік» бастамасы пайда болды, онда ауыл шаруашылығындағы зиянкестер мен ауруларға қарсы күресте федералдық және мемлекеттік деңгейде ынтымақтастықты нығайту ұсынылған (Durant S., Faunce T.A. 2018: 647-654).

Өсімдіктердің биоқауіпсіздігі тәжірибелерінің адам денсаулығына ықпалы One Health тақырыптарында жиі ескерілмейді. One Health аясында өсімдіктердің биоқауіпсіздігін

мойындау азық-түлік қауіпсіздігі мен экологияның тұрақтылығы арасындағы балансқа ерекше назар аударады, экожүйелер, жануарлар мен адамдардың денсаулығын жақсартатын ауыл шаруашылығының қажеттіліктеріне жауап беретін кешенді шешімдерді алға жылжытады (Hoffmann V., et al. 2022:62).

Зиянды организмдер, ауру тудырғыштар және олардың тасымалдаушыларына химиялық, сондай-ақ химиялық емес әдістермен бақылау және микробтарға қарсы дәрілердің тиімділігін төмендету қауіптерін басқару сәтті жүзеге асырылатын бағыттар болып табылады. Биоқауіпсіздіктегі аталмыш тәсілдерді біріктіру жануарлар мен өсімдіктерге әсер ететін зооноздық инфекциялар сияқты көпсалалы қатерлердің алдын алу мен азық-түлік жүйесінің тұрақтылығын қамтамасыз ету арқылы жүйенің нығаюына алып келеді (Mazzeo A. et al., 2022: 2736).

Мүдделі тараптардың зиянкестердің таралуын, популяциялардың өзгерісін және олардың таралуына әсер етеді дүлей факторларды түсінуі мақсатқа сай және тиімді жүру үшін стратегияларды жасауда көмектесе алады. Мұндай мәліметтерге негізделген әдіс тәуекел деңгейіне сәйкес іс-шараларға басымдылық бере отырып, ресурстарды дұрыс бөлуге мүмкіндік береді (Lafond V. et al., 2020: 218-245).

Бақылау зиянкестердің ықтимал шабуылдарының қаупін анықтауға мүмкіндік береді, бұл тәуекелдерді басқару стратегияларын жасауға қолдау көрсетеді. Бұл стратегияларға әлеуетті эпидемияларды жоюға арналған шұғыл шаралар енеді, осылайша биологиялық қауіпсіздікке дайындықты арттырады (Venette R.C. et al., 2021: 111-131).

Сонымен бірге, жергілікті халықтар, соның ішінде дәстүрлі халықтардың, биологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз ету шараларына тартылуы маңызды, өйткені олар көбінесе баға жетпес дәстүрлі білімге ие және өсімдік денсаулығына қатысты саясатқа тікелей ықпал етеді. Қоғамдық ақпарат беру науқандары қоғамдастықтың биологиялық қауіпсіздікке қатысты шараларға қалыпты қатысуын арттыру, зиянкестер мен ауруларды алдын ала анықтау мен олар туралы хабарлауды қамтамасыз ету үшін аса маңызды (Thompson L. et al., 2022: 1-16).

Өсімдік ауруларының алдын алу және карантин шараларын енгізу үшін осы салада алғашқы қадамдар ретінде аурудың белгілерін визуалды бағалау мен қоздырғыштардың морфологиялық сипаттамаларын арнайы қоректік орталарда өсіру (егер бұл жүзеге асса) немесе микроскопиялық әдістер арқылы тексеру (егер оларды *in vitro* жағдайында өсіру мүмкіндігі болмаса) жүргізу кіреді (Ward E. et al., 2005: 1-16).

Қарапайымдылығы мен қолжетімділігіне қарамастан, бұл әдістермен байланысты жалпы проблемалар сенімділіктің төмендігі мен пайдаланудың қиындығы болып табылады, әсіресе *in vitro* өсіруге келмейтін немесе микроскоп арқылы бақылау қиын болатын патогендер үшін. Мұндай жағдайларда нуклеин қышқылы технологиясы диагностикадағы жылдамдық пен дәлдіктің арқасында ең тиімді таңдау болып табылады, өйткені ол жоғары сезімталдық пен ерекшелікпен көптеген үлгілерді зерттеуге мүмкіндік береді. Дәстүрлі түрде, молекулалық талдаудан өзге, жоғары өнімділікті талдауға арналған серологиялық әдістер де пайдаланылуда. Фенотиптік, серологиялық және молекулалық техникаларды қамтитын осы тәсілдердің барлығы ЕРРО хаттамаларында бірнеше әдістерден алынған қосымша ақпаратқа негізделген (Alvarez A.M., 2004: 339-366; López M.M. 2003: 233-243).

Қашықтықтан зондтау ұғымы - сенсор (спутник, ұшақ, ҰҰА/ЖҰА немесе зонд) арқылы қашықта жатқан нысан немесе орта жайлы сапалық әрі сандық деректер алу процесі. Біздің назарымызға ауылшаруашылық жүйелерінің уақыт пен кеңістікте қалай өзгередіні және осы зондтаудың түрі ресурстардың азаюы арқылы экологиялық ауыртпалықты төмендетуге қол жеткізуі өте маңызды. Атап айтқанда, молекулалық өзара әрекеттесулерді, ауыл шаруашылығы дақылдарының стресс факторларына жауап беру реакцияларын, сондай-ақ олардың биофизикалық және биохимиялық сипаттамаларын зерттеуге болады. Сонымен қатар өсімдіктердің стресс жағдайында пайда болатын өзгерістерін, атап айтқанда, жапырақ ауданының, хлорофилл мөлшерінің және жапырақ беті температурасының өзгеруін анықтауға мүмкіндік бар. Бұл өзгерістерді өсімдіктердің қалыпты физиологиялық күйімен салыстыру арқылы стресс әсерінің бастапқы кезеңдерінде-ақ анықтауға болады (Mulla D.J., 2013: 358–371;

Meroni M.R.M., Colombo R., 2010: 165–187).

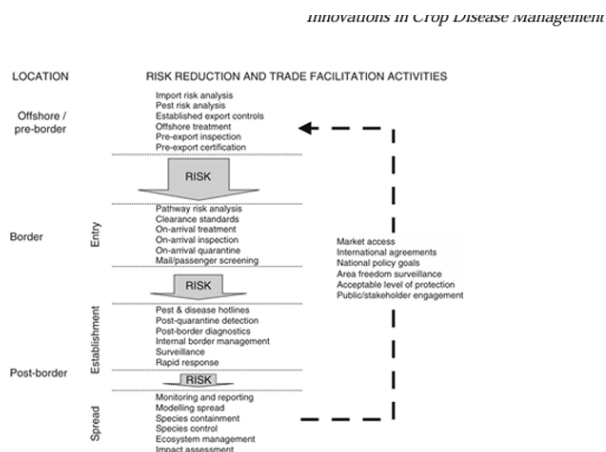
Дәлме-дәл егіншілікте қашықтықтан зондтау әдістерін қолдану 1980 жылдардың ішінде басталған. Алғашқы кезеңде бұл тек қана көрінетін немесе жақын инфрақызыл спектрдің бірнеше бөлігімен шектелген болатын, кейінірек гиперспектрлік қашықтықтан зондтау саласына көбірек назар аударылды. Басқа бір зерттеуде көрсетілгендей, өсімдіктермен байланысты процестер түрлі спектрлік аймақтарда бақылануы мүмкін: патоген споралары (патогеннің түріне байланысты) көрінетін жарық (VIS) диапазонында; хлорофиллдің ыдырау процессін (некроз немесе хлороз ошақтарындағы) көрінетін жарық пен «қызыл шекара» (red-edge) аймағында (550 нм; 650-720 нм); фотосинтездің бұзылуын флуоресценция (450-550 нм; 690–740 нм) және жылулық инфрақызыл (TIR) диапазонында (8000-14 000 нм); қартаю процесін түстің қоңырлануы қолданыла отырып, көрінетін жарық пен жақын инфрақызыл (NIR) диапазонында (680-800 нм), ал ылғалдың жоғалуы қысқа толқынды инфрақызыл (SWIR) диапазонында (1400-1600 нм және 1900–2100 нм) бақылауға болады; егін жабынының тығыздығы мен жапырақ ауданындағы өзгерістерді де жақын инфрақызыл (NIR) диапазонында зерттеуге болады; сонымен қатар транспирация қарқындылығындағы өзгерістерді жылулық инфрақызыл (TIR) диапазонында (8000-14 000 нм) бақылау мүмкіндігі бар. Сондықтан, бұл әдістерді егін дақылдарындағы ауруларды анықтау мақсатында тиімді пайдалануға болатыны айдан анық. Жақында гиперспектрлік радиометр жапырақтың шағылыстыру мүмкіндігіне сүйене отырып, II фотожүйе фотохимиясының ішкі тиімділігін, атап айтқанда, жапырақтағы хлорофилл флуоресценциясы (ChlF) негізінде айнымалы және максималды флуоресценцияны білдіретін Fv/Fm қатынасының мәнін бағалауға пайдаланылды (West J.S. et al., 2003: 593-614; Peng Y. et al., 2017: 026034).

Нақты айтқанда, бірінші бөлім спутниктер мен ұшақтардағы қашықтан басқару сенсорларын зерттейді, сонымен қатар ауыл шаруашылығындағы қолданбаларды талқылайды (жер пайдалану мен азот ағыны жөніндегі жер сатысы мен ГАЗ деректері, бидай өсімін бағалау немесе ауыл шаруашылығы жерлерін зерттеу үшін әуе гиперкеңістіктік ақпаратты қолдану және жер бедері мен ормандарды 3D қашықтан зондтау үшін әуе лидар деректері). Соңғы бөлім спутниктердің, ҰҰА және жердегі сенсорлардың артықшылықтары мен кемшіліктерін талдайды, ҰҰА-ның кең ауқымды мүмкіндіктерін немесе басқа екі жүйенің нақты қолдану үшін тиімділігін атап көрсетеді (мысалы, кейбір жердегі сенсорлар үшін жолда өңдеу мүмкіндіктері деректерді өңдеудің кідіріссіз гербицидтерді жедел қолдануға мүмкіндік береді). Бұл технологияның даму жолы сілтемеде баяндалғандай, жылулық және мультиспектрлік бейнелеу үшін арзан мини-ҰҰА-ны қарастырады (Bendig J. et al., 2012: 345-349).

Бұл зерттеуде авторлар шамамен 1 кг салмағы бар мини-ҰҰА жүйесін (HiSystems МК-Okto) қолданды, ол қолмен ұстап жүруге ыңғайлы NEC F30IS термиялық бейнелеу жүйесімен және төрт жолақты көпспектрлі камерамен (Tetracam Mini MCA) жабдықталады. Жүйе термиялық және көпспектрлі суреттерді алу үшін пайдалы екені анықталды, бұл геореференциялау арқасында деректердің салыстырылуын қамтамасыз етеді. 15 минуттық ұшу уақыты кішігірім жобаларда пайдалануға мүмкіндік береді. Қашықтан зондтау технологиясының тағы бір қолданысы ауыл шаруашылық учаскелерінің пайдалануын бақылау, егіндердің өнімділігін болжау, өнімділікті арттыру үшін дақылдарды бақылау және экожүйелік қызметтермен байланысты болып табылады (Weiss M. et al., 2020: 111402.).

Бұл зерттеуде зерттеушілер шамамен 1 кг салмағы бар мини-ҰҰА жүйесін (HiSystems МК-Okto) қолданды, ол жеңіл және портативті NEC F30IS термиялық бейнелеу жүйесімен қатар төрт жолақты көпспектрлі бейнелеу жүйесі (Tetracam Mini MCA) үшін жеткілікті болды. Жүйе жылу және көпспектрлі бейнелерді алу мақсатында тиімді болып шықты, бұл деректерді геореференцеу арқылы салыстыру мүмкіндігін береді. 15 минуттық ұшу уақытын шағын ауқымды жобалар үшін пайдалануға болады. Қашықтан зондтаудың тағы бір әлеуетті қолдануы аграрлық жерлерді басқару, дақылдардың өнімділігін болжау, өнімділікті арттыру мақсатында дақылдарды мониторинг жасау және экожүйе қызметтерімен байланысты мәселелерді шешу болып табылады (Lahlali R. et al., 2024: 159-170).

Дақылдарды дамыту үшін гермоплазма алмасуы қатаң биоқауіпсіздік шараларын қажет етеді. Үндістанда 23 мемлекеттен алынған майлы дақылдар мен Brassica тобына жататын көкөніс дақылдарына қатысты 40 жылға жуық (1975-2015 жж.) жүргізілген зерттеулер *Alternaria brassicicola* (65,5%) және *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (17,8%) қоздырғыштарының, сондай-ақ тағы да 16 патогеннің тұрақты түрде бар екенін көрсетті; осы патогендердің басым бөлігі АҚШ (26,3%) мен Канададан (24,0%) келген үлгілерден табылды (Akhtar J. et al., 2017: 120–130).



Сурет 1. Hulme (2013) бойынша жинақталған өсімдіктер биологиялық қауіпсіздігі континуумының құрылымы

Өсімдік ауруларының көп бөлігін визуалды әдіс арқылы байқап, анықтауға болады, ал қол лупалары мен бинокулярлы микроскоптар саңырауқұлақтардың жыныссыз көбею элементтерін (ацервулалар, пикнидиялар, спородохийлер, синнемалар) және жыныстық жолмен пайда болатын жеміс денелерін (клеистотецийлер, перитецийлер, апотецийлер, псевдотецийлер) зерттеуге жәрдемдеседі. Құрама микроскоптар саңырауқұлақ мицелийлерін, споралар мен бактерияларды табуға көмектессе, сканерлеуші және трансмиссиялық электронды микроскоптар вирус бөлшектерін анықтауға мүмкіндік береді. Жапырақ ауруларын автоматты түрде диагностикалауға арналған жүйелер қазіргі күні жасанды интеллект пен IoT датчиктерін пайдаланып, ауруды тікелей егістік ортасында тез анықтауға мүмкіндік береді (Jafar A. et al., 2024: 1356260).

Дәстүрлі диагностика тәсілдері әдетте көп уақыт алады, ал облигат өсімдік патогендерін (жалған ұнтақ зең, ұнтақ зең, тат және т. б.) өсіру арнайы қоректік ортада мүмкін емес. Вирустық аурулардың көріністері сортқа байланысты әртүрлі болып келеді, ал арнайы түрлері, нәсілдері немесе нұсқалары сыртқы белгілері арқылы айыруды қиындататын қауіп бар. Осындай кедергілер патогендерді молекулалық деңгейде анықтау үшін тиімді, нақты және жоғары сезімтал диагностикалық әдістерді талап етеді. Фитопатогендерді табу үшін молекулалық диагностика әдістерінен, мысалы, ПТР (PCR), qPCR, RT-PCR және мультиплексті ПТР кеңінен пайдаланылады. Негізгі жетістіктерге топырақтан *Sclerotium cepivorum* склероцияларын qPCR арқылы анықтау, *Rhizoctonia solani* анастомоздық топтарын нақтылау, топырақтағы *Plasmodiophora brassicae* көлемін анықтау, *F. oxysporum* f. sp. *lactucae* 1-нәсілін IRAP-PCR арқылы ажырату және селективті ортада *Phytophthora ramorum*-ды сезімтал RT-qPCR арқылы анықтау кіреді. Дегенмен, ПТР әдісі үлкен көлемдегі нысаналы тінді немесе бірнеше зерттеуді талап етуі мүмкін. Изотермиялық амплификация технологиялары, мысалы, LAMP, RCA және RPA, бұл проблемаларды шешуге арналған, өйткені олар ДНҚ/РНҚ-ны тұрақты температурада термоциклерсіз амплификациялап, анықтау шегі төмен және туыстас түрлерді немесе нысаналы емес штамдарды бөліп көрсету мүмкіндігін ұсынады. Бұл тәсілдер от жарасы (fire blight) ауруын, топырақ пен тұқым үлгілеріндегі кила ауруын, бидай жапырағының дақтылық ауруын тудыратын саңырауқұлақтарды, сондай-ақ *F. oxysporum* f. sp. *vasinfectum* 4-нәсілін далалық жағдайда анықтау үшін қолданылады.

RPA әдісі ДНҚ геномен (бананның шоғырланған шың вирусы, қызанақтың сары жапырақ бұйралану вирусы, үрмебұршақтың алтын мозаика вирусы) және РНК геномен (раушан розеткасының вирусы) қамтылған өсімдіктердің вирусын далалық жағдайда анықтауда тиімді нәтиже көрсетті. FISH және ELISA сияқты иммунологиялық әдістер де кеңінен қолдануға ие; ELISA вирустарды анықтау үшін көп пайдаланылады, дегенмен бактерияға қатысты нәтижелері тиімділікті төмендетуі мүмкін. Индия үкіметінің Биотехнология департаменті (DBT) бағалы дақылдардағы вирустарды анықтау үшін ELISA жинақтары мен ДНҚ-чиптерін қолдануға ынталандыруда. «Pocket Diagnostic» типтес бүйірлік ағын құрылғылары (LFD) 10 минут ішінде тіпті ағаш тіндерінен анықтауға мүмкіндік береді, бірақ олардың дәлдігі төмендеу болып табылады. Топырақтағы *Rhizoctonia solani* және *Peronospora destructor* спорангийлерін анықтау үшін мономерлі антиденелерді пайдаланатын LFD (латералды ағынды тест-жолақтар) жүйелері бар және олар 1990 жылдардан бері қолданылып келеді. RPA және LFD әдістерінің үйлесімі *Fusarium oxysporum* қоздырғышын егістіктер мен жылыжайларда тікелей мүдделі жерде анықтауға мүмкіндік берді (Hu S. et al., 2024: e4915).

References

- Akhtar J., Singh B., Kandan A., Kumar P., Maurya A.K., Dubey S.C. (2017). Interception of pathogens during quarantine processing: An effort towards safe import of oilseed and vegetable Brassicas germplasm in India. *Journal of Oilseed Brassica*, 8(2), 120–130. <https://epubs.icar.org.in/index.php/JOB/article/view/158793>.
- Alvarez A.M. (2004). Integrated approaches for detection of plant pathogenic bacteria and diagnosis of bacterial diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 42, 339–366. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.040803.140329>.
- Bendig J., Boltan A., Bareth G. (2012). Introducing a low-cost mini-UAV for thermal- and multispectral-imaging. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1, 345–349. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-345-2012>.
- Bisht N., Mishra S.K., Chauhan P.S. (2020). *Bacillus amyloliquefaciens* inoculation alters physiology of rice (*Oryza sativa* L. var. IR-36) through modulating carbohydrate metabolism to mitigate stress induced by nutrient starvation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 143, 937–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.154>.
- Bourke P.M. (1964). Emergence of Potato Blight, 1843–1846. *Nature*, 203, 805–808. <https://doi.org/10.1038/203805a0>.
- Campanella V., Miceli C. (2021). Biological control of *Fusarium* wilt of *Ustica* landrace lentil. *Crop Protection*, 145, 105635. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105635>.
- Dénes T.E., Molnár I., Rákossy-Tican E. (2015). New insights into the interaction between cultivated potato and *Phytophthora infestans*. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Biologia*, 60, 165–175. <https://studia.reviste.ubbcluj.ro/index.php/subbbiologia/article/view/4577>.
- Durant S., Faunce T.A. (2018). Analysis of Australia's new biosecurity legislation. *Journal of Law and Medicine*, 25(3), 647–654. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3241819.
- Gupta N., Slawson D.D., Moffat A.J. (2022). Using citizen science for early detection of tree pests and diseases: Perceptions of professional and public participants. *Biological Invasions*, 24, 123–138. <https://doi.org/10.1007/s10530-021-02631-3>.
- Haddoudi I., Cabrefiga J., Mora I., Mhadhbi H., Montesinos E., Mrabet M. (2021). Biological control of *Fusarium* wilt caused by *Fusarium equiseti* in *Vicia faba* with broad spectrum antifungal plant-associated *Bacillus* spp. *Biological Control*, 160, 104671. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104671>.
- Hoffmann V., Paul B., Falade T., Moodley A., Ramankutty N., Olawoye J., Djouaka R., Lekei E., de Haan N., Ballantyne P. (2022). A One Health approach to plant health. *CABI Agriculture and Bioscience*, 3, 62. <https://doi.org/10.1186/s43170-022-00118-2>.
- Hu S., Yu H., Zhang C. (2024). Development of Recombinase Polymerase Amplification–Lateral Flow Dipstick (RPA–LFD) as a rapid on-site detection technique for *Fusarium oxysporum*. *Bio-protocol*, 14(1), e4915. <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.4915>.
- Jafar A., Bibi N., Naqvi R.A., Sadeghi-Niaraki A., Jeong D. (2024). Revolutionizing agriculture with artificial intelligence: Plant disease detection methods, applications, and their limitations. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1356260. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1356260>.
- Lafond V., Lingua F., Lumnitz S., Paradis G., Srivastava V., Griess V.C. (2020). Challenges and opportunities in developing decision support systems for risk assessment and management of forest invasive alien species. *Environmental Reviews*, 28(3), 218–245. <https://doi.org/10.1139/er-2019-0024>.
- Lahlali R., Taoussi M., Laasli S.E., et al. (2024). Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. *Crop and Environment*, 3(3), 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.05.003>.
- López M.M., Bertolini E., Olmos A., Caruso P., Gorris M.T., Llop P., Penyalver R., Cambra M. (2003). Innovative tools for detection of plant pathogenic viruses and bacteria. *International Microbiology*, 6, 233–243. <https://doi.org/10.1007/s10123-003-0143-y>.
- Mazzeo A., Tremonte P., Lombardi S.J., Caturano C., Correr A., Sorrentino E. (2022). From the intersection of food-borne zoonoses and EU green policies to an in-embryo One Health financial model. *Foods*, 11(18), 2736. <https://doi.org/10.3390/foods11182736>.
- Meroni M., Rossini M., Colombo R. (2010). Characterization of leaf physiology using reflectance and fluorescence hyperspectral measurements. In: Maselli F., Menenti M., Brivio P.A. (eds.). *Optical Observation of Vegetation Properties and Characteristics*. Research Signpost, Trivandrum, India.
- Mulla D.J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114, 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>.
- Oerke E.C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144, 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>.

- Peng Y., Zeng A., Zhu T., Fang S., Gong Y., Tao Y., Zhou Y., Liu K. (2017). Using remotely sensed spectral reflectance to indicate leaf photosynthetic efficiency derived from active fluorescence measurements. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11, 026034. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.026034>.
- Rawat U.S., Agarwal N.K. (2015). Biodiversity: concept, threats and conservation. *Environment Conservation Journal*, 16(3), 19–28. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2015.16303>.
- Savary S., Willocquet L., Pethybridge S.J., Esker P., McRoberts N., Nelson A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>.
- Schröder R., Hilker M. (2008). The relevance of background odor in resource location by insects: A behavioral approach. *BioScience*, 58(4), 308–316. <https://doi.org/10.1641/B580406>.
- Thompson L., Stenekes N., Kruger H., Carr A. (2009). Engaging in Biosecurity: Literature Review of Community Engagement Approaches. Canberra: Bureau of Rural Sciences. <https://www.agriculture.gov.au/abares/research-topics/social-sciences/community-engagement>.
- Venette R.C., Gordon D.R., Juzwik J., Koch F.H., Liebhold A.M., Peterson R.K.D., Sing S.E., Yemshanov D. (2021). Early intervention strategies for invasive species management: Connections between risk assessment, prevention efforts, eradication, and other rapid responses. In: Poland T.M., Patel-Weynand T., Finch D.M., Miniati C.F., Hayes D.C., Lopez V.M. (eds.). *Invasive Species in Forests and Rangelands of the United States*. Springer, Cham, pp. 111–131. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45367-1_6.
- Ward E., Foster S.J., Fraaije B.A., McCartney H.A. (2004). Plant pathogen diagnostics: Immunological and nucleic acid-based approaches. *Annals of Applied Biology*, 145, 1–16. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2004.tb00354.x>.
- Weiss M., Jacob F., Duveiller G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>.
- West J.S., Bravo C., Oberti R., Lemaire D., Moshou D., McCartney H.A. (2003). The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 41, 593–614. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.41.121702.103726>.
- Zhang N., Yuan S., Zhao C., Park R.F., Wen X., Yang W., Liu D. (2021). TaNAC35 acts as a negative regulator for leaf rust resistance in a compatible interaction between common wheat and *Puccinia triticina*. *Molecular Genetics and Genomics*, 296, 279–287. <https://doi.org/10.1007/s00438-020-01746-x>.