

Дәйексөз үшін: Мухамадиев, Н.С., Чадинова, А.М., Меңдібаева, Г.Ж., Рысбекова, А.М., Фазылбеков, Р., Курмангалиева, Н.Д. (2026). Қызанақтың негізгі зиянкесіне қарсы энтомофагтарды капсулалау және оларды Biodrop арқылы ұшқышсыз ұшу аппаратымен (ҰҰА) қолдану. *Еуразиялық агротехникалық журнал*, 2(130), 93-108. DOI: [https://doi.org/10.51452/eaj.2026.2\(130\).2191](https://doi.org/10.51452/eaj.2026.2(130).2191).

ӨОЖ 68.35.41; 68.35.29; 68.85.85

Зерттеу мақаласы

Қызанақтың негізгі зиянкесіне қарсы энтомофагтарды капсулалау және оларды Biodrop арқылы ұшқышсыз ұшу аппаратымен (ҰҰА) қолдану

Мухамадиев Н.С. , Чадинова А.М. , Меңдібаева Г.Ж. , Рысбекова А.М. 
Фазылбеков Р. , Курмангалиева Н.Д. 

Ж. Жиёмбаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ғылыми зерттеу институты
Алматы, Қазақстан

Корреспондент-автор: Меңдібаева Г.Ж.: 1987gulnaz@gmail.com

Бірлескен авторлар: (1: НМ) nmukhamadiyev@gmail.com; (2: АЧ) aizhan_chadinova@mail.ru
(3: АР) rysbekova949r@gmail.com; (4: РФ) fazylbekov@gmail.com
(5: НК) n.kurmangalieva77@mail.ru

Келіп түсті: 04.04.2026 **Қабылданды:** 10.06.2026 **Жарияланды:** 30.06.2026

Авторлық құқық: Мухамадиев Н.С. т.б. Бұл мақала ашық қолжетімділікте жарияланып, Creative Commons Attribution 4.0 халықаралық лицензиясының шарттарына сәйкес таратылады (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Қазіргі ауыл шаруашылығында химиялық пестицидтерді азайту және экологиялық қауіпсіз технологияларды енгізу қажеттілігі өсуде. Осыған байланысты зерттеудің мақсаты – трихограмма (*Trichogramma* spp.) мен габробракон (*Habrobracon hebetor*) энтомофагтарын жаппай өсіру, капсулалау және оларды ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) арқылы енгізу технологияларын жетілдіру.

Материалдар мен әдістер. Зерттеулер зертханалық және далалық жағдайда жүргізілді. Энтомофагтарды өсіру процесінде микроклимат параметрлерін бақылау үшін Edge–Fog–Cloud архитектурасына негізделген IoT жүйесі (Arduino Mega, Raspberry Pi 4В және датчиктер) қолданылды. PLA-пластиктен 3D-басып шығарылған биоыдырайтын капсулалар әзірленіп, олардың беріктігі 3 м биіктіктен түсіру арқылы бағаланды. Далалық тәжірибелерде биоагенттер Biodrop жүйесі арқылы енгізілді.

Нәтижелер. Оңтайлы капсула үлгілері (трихограмма үшін № 2–3, габробракон үшін № 3–4) иелердің 100% қоныстануын және паразитоидпен толық залалдануын қамтамасыз етті. Капсулалар механикалық әсерге төзімді болды. Алматы облысында жүргізілген тәжірибелерде биологиялық тиімділік 69,5–82,8% деңгейінде анықталды.

Қорытынды. Энтомофагтарды капсулалау, микроклиматты цифрлық бақылау және ҰҰА арқылы енгізу технологияларын біріктіру биологиялық қорғаудың тиімділігін арттырып, экологиялық қауіпсіз және автоматтандырылған ауыл шаруашылығын дамытуға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: өсімдіктерді биологиялық қорғау; *Trichogramma* spp.; *Habrobracon hebetor*; капсулалау; 3D-басып шығару; Biodrop автоматтандырылған жүйесі.

Кіріспе

Ауыл шаруашылығында биологиялық қорғау жүйелерінің дамуы қазіргі егіншіліктің басым бағыттарының біріне айналып, химиялық пестицидтерді қолдану көлемін қысқартуға және қоршаған ортаға түсетін антропогендік жүктемені азайтуға мүмкіндік береді. Қабыршаққанаттылар зиянкестеріне қарсы трихограмма (*Trichogramma* spp.) және габробракон (*Habrobracon hebetor*) энтомофагтары жоғары тиімділігімен ерекшеленіп, кеңінен қолданылуда [1].

Smith (1996) зерттеуінде трихограмманың жұмыртқа паразитоиды ретінде тиімділігі кеңінен талданып, оның көптеген ауыл шаруашылығы дақылдарында зиянкестердің жұмыртқа фазасын 70–90% деңгейінде жоюға қабілетті екені көрсетілген. Автор трихограмманы қолдану химиялық инсектицидтерді алмастыра алатын экологиялық қауіпсіз әдіс екенін атап өтеді, әсіресе интеграцияланған қорғау жүйелерінде оның маңызы жоғары екенін көрсеткен [2].

Hassan (1993) зерттеуінде трихограмманы жаппай өсірудің тиімділігі өндірістік технологиялардың дұрыс ұйымдастырылуына байланысты екені анықталған. Автордың мәліметтері бойынша, өндірістік жағдайда паразитоидтардың сапасы (паразиттеу деңгейі, өміршеңдігі) енгізу әдісі мен сақтау жағдайларына тікелей тәуелді. *van Lenteren* (2012) өз еңбегінде коммерциялық биобақылау агенттерінің тиімділігі оларды дұрыс жеткізу және уақытында енгізу технологияларымен анықталатынын көрсетеді, сонымен қатар сапаны бақылау жүйесінің маңыздылығын атап өткен [3, 1].

Parra (2010) зерттеуінде трихограмманы қолдану тиімділігі енгізу мерзімі мен нормасына тікелей байланысты екені дәлелденген. Автордың деректеріне сәйкес, дұрыс таңдалған енгізу уақыты кезінде паразиттеу деңгейі 80% және одан жоғары көрсеткіштерге жетеді. Сонымен қатар *Bigler* (1986), *Smith* және т.б. (2001) зерттеулерінде далалық жағдайда трихограмманың таралуы климаттық факторларға, өсімдік жамылғысына және зиянкестер тығыздығына байланысты өзгереді, бұл оның тиімділігін шектейтін негізгі факторлардың бірі екені көрсетілген [4, 5, 6].

Carvalho және т.б. (2005) зерттеуінде *Ephestia kuehniella* жұмыртқаларын жасанды иесі ретінде пайдалану трихограмманы өндірістік деңгейде өсірудің тиімді әдісі екені дәлелденген. Авторлар бұл иеде өсірілген паразитоидтардың шығу деңгейі жоғары (80–95%) және биологиялық сапасы тұрақты болатынын көрсеткен [7].

Соңғы жылдары биологиялық агенттерді қорғау және жеткізу технологиялары қарқынды дамуда. *Baldiviezo* және т.б. (2023) зерттеуінде микрокапсулалау технологиясы биологиялық агенттердің қоршаған орта факторларына төзімділігін арттырып, олардың тіршілік қабілеттілігін сақтауға мүмкіндік беретіні анықталған. Авторлар микрокапсулаланған формалардың ультракүлгін сәулеге және температуралық стресс факторларына төзімділігі жоғары екенін көрсеткен [8]. *Celestino* және т.б. (2022) биополимер негізіндегі капсулалардың (альгинат, хитозан) биоагенттерді қорғауда тиімді және экологиялық тұрғыдан қауіпсіз екенін, олардың толық биодеградацияланатынын дәлелдеген [9].

Tomar және т.б. (2024), *Tyagi* және т.б. (2024) зерттеулерінде биологиялық қорғау жүйелерін цифрлық технологиялармен интеграциялау (дрондар, дәлме-дәл егіншілік жүйелері) олардың тиімділігін айтарлықтай арттыратынын көрсетілген. Авторлар биобақылау агенттерін максатты түрде енгізу арқылы олардың тиімділігі 20–30% жоғарылайтынын атап өткен [10, 11].

Lü және т.б. (2024) зерттеуінде температура мен ылғалдылықтың паразитоидтардың даму жылдамдығына және тіршілік қабілеттілігіне айтарлықтай әсер ететіні анықталған. Авторлардың мәліметтері бойынша, оптималды жағдайларда (25 °C және 70–80% ылғалдылық) паразитоидтардың даму циклі қысқарып, паразиттеу деңгейі жоғарылайды [12].

Atashi және т.б. (2021) зерттеуінде трихограмманы ұзақ уақыт бойы бір ғана иеде өсіру оның биологиялық сапасының төмендеуіне әкелетіні көрсетілген. Авторлар паразитоидтардың репродуктивтік қабілеті мен өміршеңдігі бірнеше генерациядан кейін төмендейтінін анықтаған [13]. *Laurentis* және т.б. (2019) зерттеуінде балама иелерді қолдану трихограмманың өнімділігін арттыруға мүмкіндік беретіні дәлелденген [14].

Khan және т.б. (2014) зерттеуінде трихограмманы (*Trichogramma chilonis*) мақта көбелегіне (*Helicoverpa armigera*) қарсы қолдану нәтижесінде далалық жағдайда 60–85% биологиялық тиімділікке қол жеткізілгені көрсетілген. Авторлар бұл әдіс химиялық инсектицидтерді қолдану жиілігін айтарлықтай төмендететінін атап өткен [15].

Қазақстан жағдайында энтомофагтарды қолданудың тиімділігі де тәжірибелік зерттеулерде дәлелденген. *Н.С. Мухамдиев* және т.б. (2025) зерттеуінде трихограмма мен габробраконды қолдану нәтижесінде мақта көбелегіне қарсы биологиялық тиімділік 75,9–85,6% деңгейінде болған, ал басқа аймақтарда 77,0–82,7% көрсеткіштер алынған. Авторлар атап өткендей: «энтомофагтарды қолдану зиянкестер санын экономикалық зияндылық шегінен төмен деңгейде тұрақты ұстап тұруға мүмкіндік береді және химиялық өңдеулер санын қысқартады» [16, 17].

Алайда бұл зерттеулерде биоагенттерді енгізу дәстүрлі әдістермен жүзеге асырылып, автоматтандыру, капсулалау және цифрлық бақылау жүйелері жеткілікті деңгейде қарастырылмаған.

Осы тұрғыдан алғанда, ұсынылып отырған зерттеу жұмысының ғылыми жаңалығы бірнеше инновациялық бағыттардың интеграциясымен сипатталады: биоыдырайтын PLA негізіндегі 3D-баспа капсулаларды қолдану, микроклиматты Edge-Fog-Cloud архитектурасы арқылы басқару және энтомофагтарды ҰҰА арқылы Biodrop жүйесімен енгізу.

Отандық және шет елдік зерттеулермен салыстырғанда шамалас болғанымен, ұсынылған технологияның басты артықшылығы – автоматтандыру, еңбек шығындарының азаюы және биоагенттердің сақталу деңгейінің жоғары болуы. Зертханалық жағдайда 100% қоныстану және паразиттелу көрсеткіштерінің алынуы капсулалау технологиясының жоғары тиімділігін дәлелдейді. Осылайша, ұсынылған зерттеу биологиялық қорғау әдістерін цифрлық технологиялармен интеграциялау арқылы жаңа сапалық деңгейге көтереді және тұрақты ауыл шаруашылығын дамытуға бағытталған.

Зерттеудің мақсаты – энтомофагтарды жаппай өсіру, капсулалау және оларды ұшқышсыз ұшу аппараттары арқылы енгізу технологияларын жетілдіру арқылы өсімдіктерді биологиялық қорғаудың тиімділігін арттыру.

Зерттеудің өзектілігі химиялық пестицидтерді қолдануды азайту, зиянкестердің төзімділігінің қалыптасуын болдырмау, агроэкожүйелердің тұрақтылығын арттыру және цифрлық технологияларға негізделген экологиялық қауіпсіз ауыл шаруашылығын дамыту қажеттілігімен анықталады.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу жұмыстары «Ж. Жиембаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ғылыми зерттеу институты» ЖШС зертханаларында, сондай-ақ Алматы облысының Еңбекшіқазақ және Қарасай аудандарының шаруа қожалықтарында жүргізілді.

Трихограмма мен габробраконды өндіру желісін жетілдіру мақсатында заманауи датчиктер мен контроллерлерді пайдалана отырып сынақтар өткізілді. Зерттеулер барысында микроэлектромеханикалық жүйелер қолданылды микроэлектрондық және микромеханикалық компоненттерді біріктіретін құрылғылар. Олар температура, ылғалдылық, қысым және қозғалыс сияқты әртүрлі параметрлерді өлшеуге арналған датчиктер ретінде пайдаланылды. Атап айтқанда қысым датчиктері трихограмма мен габробраконды өндіру процесінде қоршаған орта параметрлерін бақылауға мүмкіндік берді.

Бағдарламаланатын логикалық контроллерлер (БЛК) – өндірістік желідегі процестерді басқаруға арналған арнайы құрылғылар. Бұл контроллерлер операцияларды автоматтандыруға, технологиялық параметрлерді бақылауға және олардың өзгерістеріне жедел әрекет етуге мүмкіндік береді. Мысалы, БЛК биологиялық агенттерді өсіру барысында температура, ылғалдылық және басқа да микроклимат көрсеткіштерін дәл реттеу үшін қолданылды.

Бақылау-өлшеу аспаптарымен (БӨА) интеграциялау – датчиктер мен реттегіштерді қамтитын БӨА өндірістің барлық кезеңдерінде параметрлерді сенімді өлшеу мен бақылауды қамтамасыз етті. Мысалы, температура датчиктері пайдалы жәндіктердің дамуына қолайлы жағдайларды тұрақты ұстап тұруға мүмкіндік берді.

Энтомофагтарды қорғау және тиімді енгізу мақсатында биоыдырайтын PLA негізіндегі капсулалар 3D-басып шығару әдісімен дайындалды. Капсулалар екі бөліктен (түбі және қақпағы) тұрады, ішкі құрылымы торлы болып келеді және биоагенттердің сақталуына бейімделген. Тесіктерінің мөлшері торлы толтыру деңгейін (~65%) өзгерту арқылы реттелді. Капсулалау әдісі биополимерлік материалдарды (альгинат, хитозан, крахмал) қолдану принциптеріне негізделді [8, 9].

Капсулалардың механикалық төзімділігі 3 м биіктіктен түсіру арқылы бағаланды, олар келесі формуламен (1) есептелді:

$$K = \left(\frac{N_s}{N}\right) \times 100 \text{ .} \quad (1)$$

мұндағы,

N_s – бүтін қалған капсулалар саны;

N – жалпы капсулалар саны.

Габробраконды капсулалау «өздігінен қоныстану» әдісімен жүзеге асырылды, яғни *Galleria mellonella* жұлдызқұрттары капсулаға өздігінен еніп, кейін паразитоидпен залалданды.

Микроклимат параметрлері Edge-Fog-Cloud архитектурасына негізделген интеллектуалды жүйе арқылы бақыланды.

Edge деңгейі: Arduino Mega және датчиктер (DHT11, BMP180, MQ-3, MQ-7, TCS3200).

Fog деңгейі: Raspberry Pi 4B (Flask, WebSocket).

Cloud деңгейі: веб-интерфейс (HTML, JavaScript, Socket.IO).

Температура мен ылғалдылықтың әсері энтомофагтардың дамуына негізгі фактор ретінде қарастырылды [12].

Орташа мән келесі формуламен (2) есептелді:

$$X = (\sum x_i) \div n, \quad (2)$$

мұндағы,

x_i – жеке бақылау нәтижелері (i-ші мән);

$\sum x_i$ – барлық бақылау нәтижелерінің қосындысы;

n – бақылаулар саны.

Қызанақ егістіктерінде зиянды организмдерді жерүсті мониторингілеу энтомология мен фитопатологияда жалпы қабылданған әдістеме бойынша жүргізілді [18].

Зиянкестердің ұшу динамикасын және санын анықтау үшін әр гектарға бір феромондық тұзақ орнатылды. Қызанақ егістіктерінде жүргізілген мониторинг барысында шахматтық тәртіппен орналастырылған 20 нүктеде (әр нүктеде 5 өсімдіктен) барлығы 100 модельдік өсімдік қаралып, фитофагтардың жұмыртқалары мен жұлдызқұрттарының саны есептелді.

Зиянкестердің орташа тығыздығы келесі формуламен (3) есептелді:

$$X = (\sum n) \div N, \quad (3)$$

мұндағы,

$\sum n$ – анықталған дарақтардың жалпы саны;

N – есепке алынған өсімдіктер саны.

Зиянкестердің ұшу динамикасын бақылау үшін феромон тұзақтары қолданылды (1 дана/га).

Мақта көбелегінің жұмыртқаларына қарсы трихограмма қолданылды, енгізу мөлшері гектарына 120 000–80 000 дарақ. Қызанақтағы көбелек жұлдызқұрттарына қарсы габробракон паразитоиды пайдаланылып, оның қолдану мөлшері 700–1050 дарақ/га құрады (1-кесте).

Енгізу нормасы келесі формуламен (4) есептелді:

$$R = N/S, \quad (4)$$

мұндағы,

N – жіберілген дарақтар саны;

S – өңделген алаң (га).

1-кесте – Қызанақ екпелерінде биоагенттерді енгізу мөлшері, 2025 ж.

Сорт үлгілері	Биоагент	Тәжірибе нұсқасы	1 капсуладағы дарак саны, дана	Шығын мөлшері, дарак/га	Капсулалар арақашықтығы (ұзындығы/ ені), см	Зиянкестің даму фазасы
Сюрприз Фабра F1	трихограмма	50 капсула/га	2400	120000	20/10	Алғашқы жұмыртқа салудың басталуы
			1600	80000		
		100 капсула/га	1200	120000	10/10	
			800	80000		
	Габробракон	10 капсула/га	70	700	20/50	Көбелектің III жастағы жұлдызқұрттарының пайда болуы
			70	700		
		15 капсула/га	70	1050	20/25	
			70	1050		

Биологиялық тиімділікті энтомофагтарды енгізгеннен кейін келесі формула (5) бойынша бағаланды [19]:

$$БЭ = \frac{\Pi}{M} \times (x + a)^n \quad (5)$$

мұндағы,

Π – энтомофагтарды енгізгеннен кейін паразиттелген жұмыртқа мен жұлдызқұрттардың саны;

M – энтомофагтарды енгізгенге дейін тірі жұмыртқа мен жұлдызқұрттардың саны.

Нәтижелер

Соңғы жылдары өсімдік шаруашылығында ауыл шаруашылығы дақылдарын зиянкестерден қорғаудың экологиялық қауіпсіз әдістеріне ерекше көңіл бөлінуде. Бұл міндет әсіресе қызанақ өсіру жағдайында өзекті, өйткені ол қабыршаққанатты зиянкестердің кең ауқымынан – мақта көбелегінен (*Helicoverpa armigera*), онтүстікамерикалық қызанақ көбелегінен (*Phthorimaea absoluta*), түрлі кеміргіш және басқа да зиянкестерден қатты зақымданады. Химиялық инсектицидтердің белсенді қолданылуы зиянкестерде төзімділіктің қалыптасуына, өнімде пестицид қалдықтарының жиналуына және қоршаған ортаға зиян келуіне әкеледі.

Осындай жағдайда биологиялық қорғау әдістері басымдыққа ие болады, олар зиянкестердің табиғи жауларын-энтомофагтарды, атап айтқанда трихограмма және габробракон қолдануға негізделген. Дегенмен, олардың егістік сынақтарында кең ауқымда қолданылуы үшін жаппай өсіру, капсулалау технологияларын және өмірлік циклді бақылау процесін автоматтандыруды оңтайландыру қажет.

Қазіргі уақытта биоагенттерді (трихограмма, габробракон) өсіру және капсулалау әдістерін жетілдіру жұмыстары, сондай-ақ микроклиматты автоматтандырылған бақылау жүйесін құру жұмыстары жүргізілуде. Бұл жүйе энтомофагтардың өмірлік маңызды көрсеткіштерін (температура, ауаның салыстырмалы ылғалдылығы, атмосфералық қысым және т.б.) автоматты түрде реттеуге мүмкіндік береді.

Микроклиматты бақылау жүйесі үш деңгейден тұрады: деректерді жинау деңгейі (Edge Layer)-Arduino Mega микроконтроллері DHT11, BMP180, MQ-3, MQ-7, TCS3200 датчиктері арқылы микроклимат параметрлері мен ауа құрамын өлшейді; агрегация және өңдеу деңгейі (Fog Layer) – Raspberry Pi 4B Flask-сервері мен WebSocket арқылы деректерді алдын ала өңдеу және интерфейс пен мәліметтер базасына жіберу жүзеге асырылады; визуализация және басқару деңгейі (Cloud/UI Layer)-HTML/JS веб-интерфейсі Socket.IO архитектурасы арқылы нақты уақыт режимінде ақпаратты көрсету және цифрлық егізге өту үшін дайындық жасайды (2, 3-кестелер).

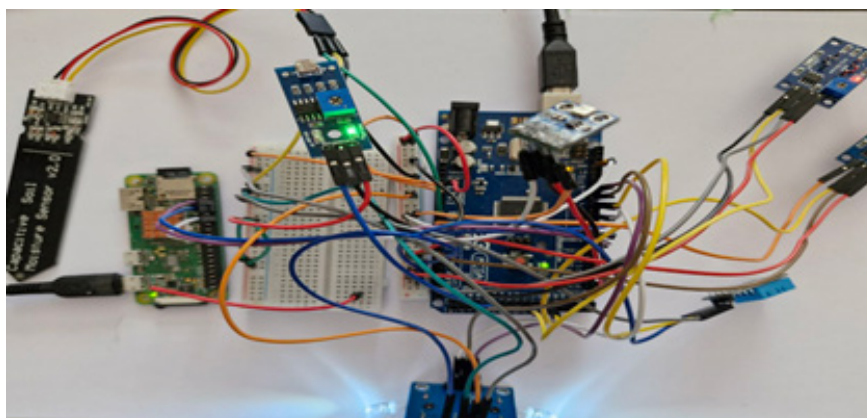
2-кесте – Микроклиматты бақылау жүйесінің архитектурасы

Деңгей	Компоненттер	Міндеті
Деректерді жинау деңгейі (Edge Layer)	Микроконтроллер Arduino Mega + датчиктер DHT11, BMP180, MQ-3, MQ-7, TCS3200	Микроклимат параметрлері мен атмосфера құрамын бақылау
Агрегация және өңдеу деңгейі (Fog Layer)	Raspberry Pi 4B + Flask-сервер, WebSocket	Деректерді алдын ала өңдеу, агрегаттау, интерфейс пен мәліметтер базасына жіберу
Визуализация және басқару деңгейі (Cloud/UI Layer)	Веб-интерфейс, Socket.IO архитектурасы, HTML/JS	Нақты уақыт режимінде мониторинг жүргізу, цифрлық егізге дейін кеңейту мүмкіндігі

3-кесте – Микроклиматты бақылау жүйесінің құрамдас бөлігі

Параметр	Датчик	Өлшеу диапазоны	Дәлдігі
Ауаның температурасы	DHT11 / BMP180	0–50 °C	± 2 °C
Ауаның салыстырмалы ылғалдылығы	DHT11	20–90%	± 5%
Атмосфералық қысым	BMP180	300–1100 гПа	± 2 гПа
CO ₂ (CO-мен ауыстырылған)	MQ-7	10–5000 ppm (CO)	± 10%
Газ буы	MQ-3	10–5000 ppm	± 10%
Жарықтылық / Түс	TCS3200	RGB 0–255	–

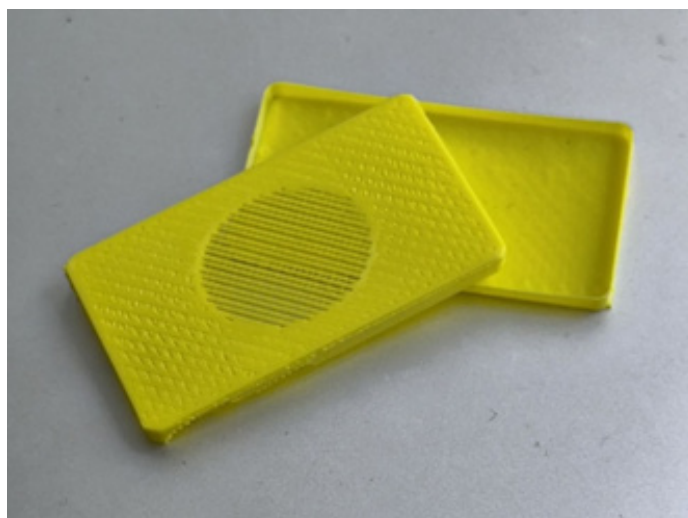
Микроклиматты бақылау жүйесі қоршаған ортаның негізгі параметрлерін үздіксіз өлшеуге арналған сенсорлар жиынтығынан тұрады, олар өсімдіктердің өсу жағдайын және агроэкожүйелердің жұмысын бағалау үшін шешуші мәнге ие. Әрбір сенсор белгілі бір өлшеу диапазоны мен дәлдікке ие, бұл оны дала және зертхана зерттеулерінің талаптарына сәйкес етеді. DHT11 және BMP180 сенсорлары температураны оқудың сенімділігін арттыру үшін бірге қолданылады. MQ-7 сенсоры көміртегі оксидінің (CO) деңгейін өлшейді, бұл жану немесе ауа ластануын көрсетуі мүмкін. MQ-3 сенсоры ұшқыш органикалық қосылыстарды, оның ішінде спирт буын тіркейді. TCS3200 сенсоры жарық деңгейін және түстік спектрді анықтайды, бұл фотосинтез жағдайларын бақылауда маңызды. Топырақ сенсоры топырақтың ылғалдылығын аналогтық сигнал (АЦП) арқылы өлшейді, бұл өсімдіктердің су қорын бағалауға мүмкіндік береді. Жүйе IoT ортасына интеграциялануы мүмкін, бұл деректерге қашықтан қолжетімділік пен микроклиматтық жағдайларды кейінгі талдау жасауға мүмкіндік береді.



1-сурет – Жүйе элементтерін қосу мысалы

1-суретте электрондық компоненттер көрсетілген, олар келесі параметрлерді бақылайды: ауа температурасы, ауа ылғалдылығы, атмосфералық қысым, CO₂ (CO-мен ауыстырылған), газ буы, жарықтылық/түстік спектр, топырақ ылғалдылығы.

Алдыңғы зерттеулер аясында трихограммаға арналған арнайы капсулалар жасалып, олар бар прототип шашқышқа бейімделген. Бұл капсулалар PLA-пластиктен 3D-басып шығару әдісімен дайындалып, екі бөліктен – қақпақ пен түбінен тұрады (2-сурет), олардың арасында биоагент орналасатын төсеніш бар.



2-сурет – PLA-дан жасалған капсула дизайнының алғашқы нұсқасы

Өткізілген сынақтар № 1 капсуланың конструкциясының жұмыс қабілеттілігін растады. Алайда қатты бетке, мысалы, асфальтқа шашқанда шамамен 30% капсулалар бөлшектерге ыдырап, биоагент қорғалмаған күйде қалды. Трихограммаға арналған капсулаларды Biodrop шашқышы арқылы ҰҰА-мен сынау жүзеге асты (3-сурет).



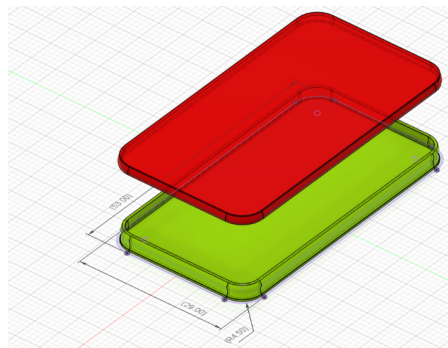
3-сурет – Трихограммаға арналған капсулаларды Biodrop автоматтандырылған жүйесі арқылы ҰҰА-мен сынау

BioDrop – Қазақстанда тікелей баламасы жоқ, биоагенттерді ұшқышсыз ұшу аппараттары арқылы автоматтандырылған түрде енгізуге негізделген өсімдіктерді қорғаудың инновациялық жүйесі. Технология пайдалы паразитоидтарды биоыдырайтын патенттелген капсулаларға орналастырып, оларды цифрлық карта негізінде дәл егіншілік қағидатымен егістікке айнымалы нормада таратуға (шашуға) мүмкіндік береді. Нәтижесінде химиялық пестицидтерді қолдану көлемі қысқарып, өнімнің экологиялық қауіпсіздігі сақталады және агроэкожүйенің табиғи тепе-теңдігі бұзылмайды. Жүйе жоғары өнімділікпен ерекшеленеді: бір оператор бір ауысымда 100 га-дан астам алқапты өңдей алады, ал трихограмма мен габробракон сияқты екі түрлі биоагентті бір мезгілде қолдану кең спектрлі зиянкестерге қарсы тиімді күрес жүргізуге мүмкіндік береді.

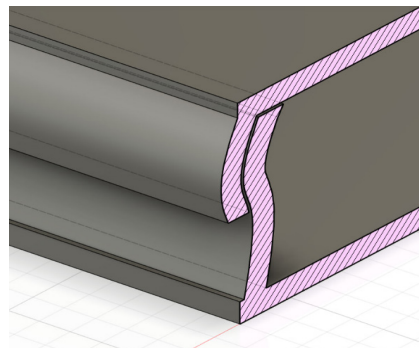
Нәтижесінде капсула дизайны қайта өңделді: пішіні жақсарды, жабу механизмі жетілдірілді, өлшемдері аздап өзгертілді, бұл өз кезегінде өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік берді. Жаңартылған капсулалар нұсқасы зертханалық сынақтардан сәтті өтті, конструкцияның

сенімділігі мен бүтіндігін көрсетті, ал жақын арада оны егістік сынақтарында тексеру жоспарлануда.

Жаңа № 2 капсула дизайны алдыңғыдан түбі мен қақпағының қабырғалары пішіні бойынша ерекшеленеді. Қақпақ түбін тығыз қоршап тұруы үшін оның пішіні сәл қисықталып жасалды (4-сурет).



Капсуланың жалпы көрінісі

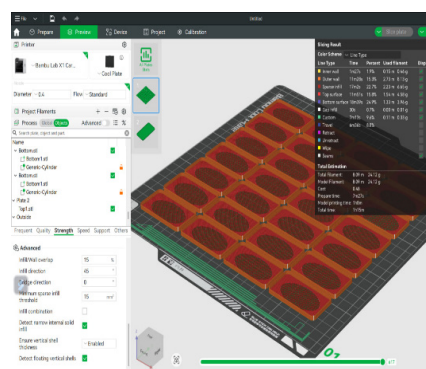
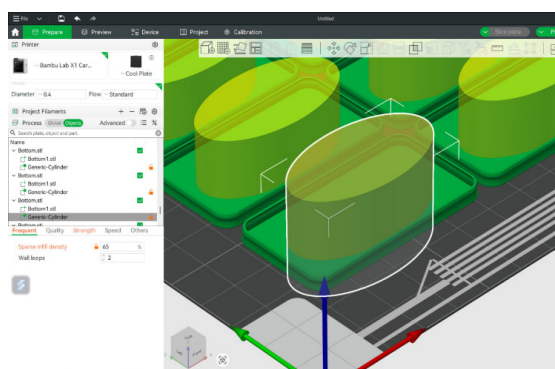


Капсула қабырғаларының қимасы

4-сурет – Капсуланың жаңа дизайны

Құрылымның беріктігін тексеру жүргізу барысында 3 м биіктен түсірілген кезде, капсулалар 30 сынақтан 30 ашылмады.

№ 3 капсулаларда тесіктерді қалыптастыру әдісіне ерекше назар аударылды. Бастапқыда капсулалар бүтін, тесіктерсіз жобаланған, кейін баспаға дайындау кезеңінде слайсерде (Bambu Slicer қолданылды) өзгерістер енгізілді. Толтыру параметрлерінде модификациялық объектілер жасалып (5-сурет), торлы толтырудың қажетті тесіктерді алу үшін параметрлері орнатылды. Торлы толтырудың тығыздығын өзгерту арқылы және сол арқылы тесіктердің диаметрін бақылау эксперименттері оңтайлы параметрлерді анықтауға мүмкіндік берді (6-сурет).



5-сурет – Bambu Studio слайдеріндегі модификациялайтын объектілер



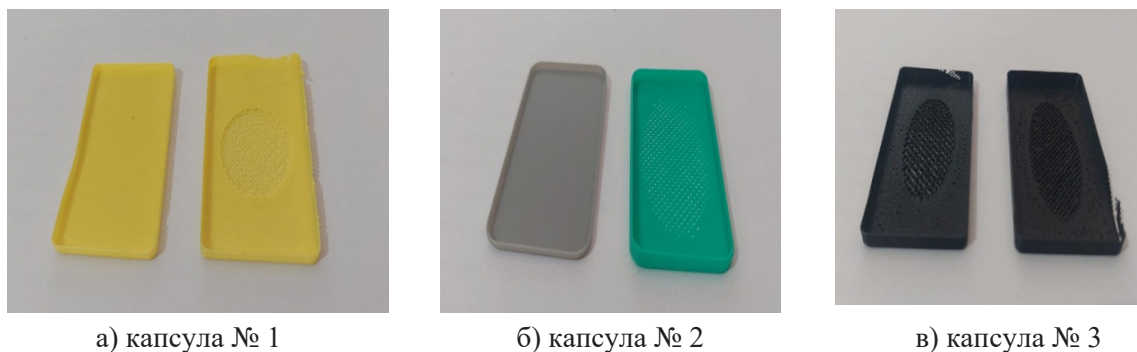
6-сурет – Торды әртүрлі дәрежеде толтыруды сынау

Трихограмма капсулаларын жинау процесі айтарлықтай жылдамдатылды, алайда төсеніштерді дайындау кезеңін әлі де оңтайландыру қажет. Эксперименттік жұмыстар барысында төсеме бетіне жабындыны біркелкі тарату үшін сүзгі қолдану шешімі қабылданды. Прототип ретінде капсула түбі (торлы) пайдаланылды (7, 8-суреттер).



7-сурет – Трихограмма жұмыртқаларына арналған капсулалар

а) Трихограмма жұмыртқаларына арналған 50×50 мм сүзгі;
б-в) Трихограмманы капсулалау процесі



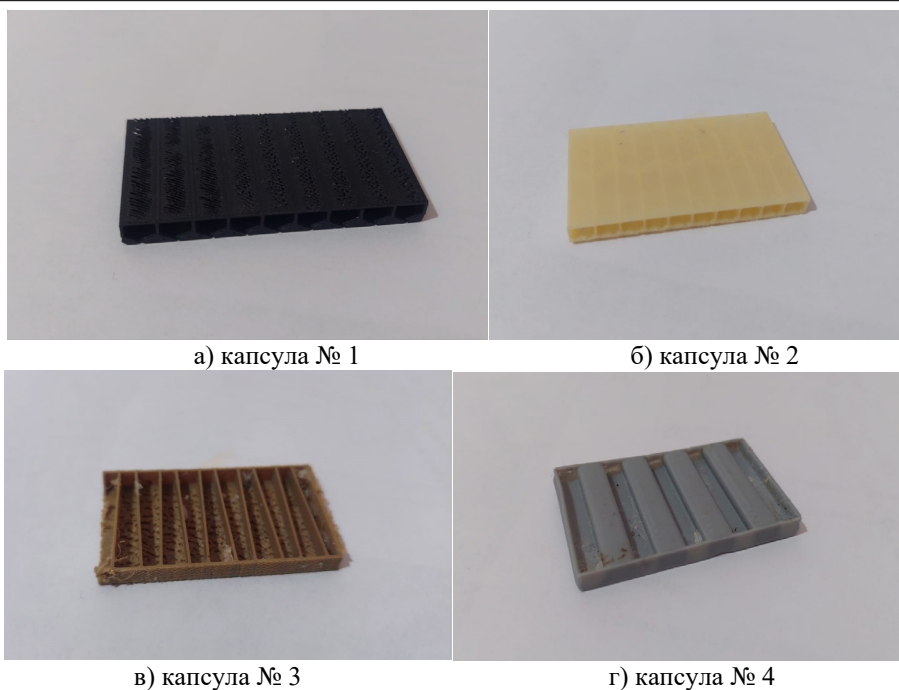
8-сурет – Трихограммаға арналған капсулалардың түрлері

Өлшеу нәтижелері мен тесіктердің салыстырмалы фотосуреттері талданып, осы деректер негізінде торлы толтырудың оңтайлы параметрі – 65% таңдалды.

Габробракон паразитоидын капсулалау әдісін әзірлеу бойынша жұмыстар жүргізілді. Жаңа тәсіл өздігінен қоныстану принципіне негізделген, мұнда балауыз көбелегінің жұлдызқұрттары (*Galleria mellonella*) қуыршақтануға арналған капсулаларға өздері қоныстанады. Капсулалар жұлдызқұрттарды тарту үшін арнайы жобаланған. Қоныстанғаннан кейін зертханалық жағдайда олар габробракон паразитоидының жұмыртқаларымен залалдандырылады. Алынған залалданған капсулаларды мақта көбелегіне қарсы биологиялық күресте қолдануға болады.

Әдістің негізгі артықшылығы – капсулаларды стандарттау: олар біркелкі, механикаландырылған өндіріс пен себуге жарамды, бұл технологияны дәстүрлі әртүрлі қағаз контейнерлерге қарағанда өнеркәсіптік қолдануға ыңғайлы етеді. Классикалық биотехнологиялық тәжірибеде габробраконды өсіру үшін бал қоректісі құрттары қолмен зақымданады, бұл көп еңбек шығынын талап етеді. Жаңа әдіс капсулаларды өндіруді, олардың қоныстануын және зақымдануын автоматтандыруға мүмкіндік береді. Ол үшін капсулалар арнайы жасалған ыдыстарға орналастырылады, онда құрттар табиғи түрде қоныстанып, кейін паразитоидпен зақымданады.

Зертханалық жағдайда габробракон үшін төрт түрлі капсуланы тестілеу тәжірибелері жүргізілді (9-12 суреттер). Айта кету керек, капсулалар аддитивтік өндіру (3D басып шығару) арқылы PLA-пластикадан жасалған, ал өндірушінің сипаттамасына сәйкес, ол 2 жыл ішінде ізсіз ыдырайды.

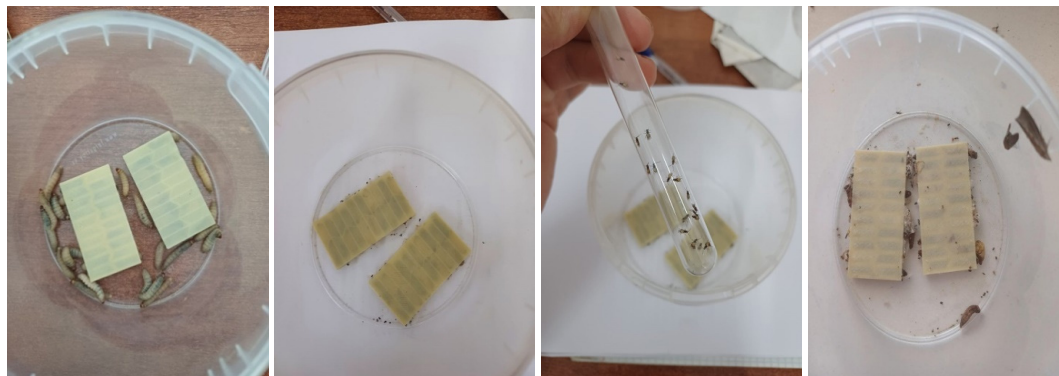


9-сурет – Габробраконға арналған капсулалардың түрлері

Капсула № 1 тек екі ұшынан ғана ашық мини-туннельдер сериясынан тұрады (бұл дернәсілдердің бүйір жағынан залалдануына кедергі келтірді). Капсула № 2 қимада зигзаг тәрізді профильге ие, оның қабырғалары ішке қарай көлбеу орналасқан. Мұндай құрылым жұлдызқұрттардың екі жағынан қоныстануына мүмкіндік беріп, олардың санын екі есе арттырады. Бұл конструкцияны өндіруге уақыт пен материал аз жұмсалады. № 1 және № 2 капсулаларда балауыз көбелегінің жұлдызқұрттары капсулаларға толық, яғни 100% қоныстанды. 8–9 күннен кейін балауыз көбелегінің қуыршағының ұшып шығуы 65% деңгейінде тіркелді, ал паразитоидпен залалдану 35%-ды құрады. Айта кету керек, залалданған балауыз көбелегі жұлдызқұрттарынан паразитоидтың толыққанды қуыршағы жекелеген ғана жағдайда шықты. Алынған деректер капсуладағы жұлдызқұрттардың барлығы бірдей паразитоидтармен залалданбағанын көрсетеді, бұл аталған әдіс кезінде залалдаудың толық тиімді еместігін аңғартады.

№ 3 және № 4 капсулаларда да балауыз көбелегінің жұлдызқұрттары капсуланың ұяшықтарына толық (100%) қоныстанды. Балауыз көбелегінің қуыршағының ұшып шығуы тіркелмеді, бұл паразитоидпен толық залалданғанын көрсетеді. Бір капсуладан орта есеппен 71,5 габробракон қуыршағы шықты.

Зертханалық жағдайда капсулалардың әртүрлі түрлері салыстырылды. Сынақтар барысында капсула ішіндегі ұяшықтардың бойлық бағытта орналасуы неғұрлым қолайлы екені анықталды. Мұндай жағдайда иесінің жұлдызқұрты қуыршақ түзген кезде габробраконның паразитоидымен залалдануға анағұрлым қолжетімді болады (10–13-суреттер).



10-сурет – Қоныстандырылған № 2 капсуланың көрінісі

Осылайша, № 3 және № 4 капсулалармен жүргізілген тәжірибенің нәтижелері әзірленген әдістің жоғары тиімділігін көрсетті: жұлдызқұрттардың толық қоныстануы және паразитоидпен 100% залалдануы қамтамасыз етіліп, бұл габробраконның ересек дарактарының жоғары деңгейде шығуына алып келді.



11-сурет – Қоныстандырылған № 3 капсуланың көрінісі



12-сурет – Қоныстандырылған № 4 капсуланың көрінісі

Зертханалық тәжірибелер көрсеткендей, жұлдызқұрттар № 4 капсуланы сәтті қоныстанып, габробраконның толық дамуын қамтамасыз етті және ересек жәндіктің шығуына мүмкіндік берді. Бұл нәтижелер ұсынылған технологияның өміршеңдігін растап, оны өсімдіктерді биологиялық қорғау жүйелерінде ауқымды қолдануға жоғары әлеуетін көрсетті.



13-сурет – Габробраконмен залалданған балауыз көбелегінің жұлдызқұрты бар капсулалар

Алматы облысының шаруашылықтарында Biodrop автоматтандырылған жүйесі көмегімен ҰҰА арқылы капсулаланған биоагенттерді енгізу бойынша далалық тәжірибелер маусым айында басталды. Мақта көбелегінің алғашқы жұмыртқа салуы мен қуыршақтарының жаппай ұша бастауы кезінде трихограмма шығарылды, ал жұлдызқұрттардың ересек жастағы сатылары пайда болған кезде габробракон енгізілді (4-кесте).

4-кесте – Қызанақ алқабында мақта көбелегіне қарсы биоагенттерді капсулалар арқылы енгізу, Алматы облысы, Қарасай ауданы, 2025 ж.

Гибрид	Тәжірибе нұсқасы	Биоагент	Шығарылған күні	Шығару нормасы, жеке/га	Зиянкестің даму фазасы
Фабра F1	50 капсула/га	трихограмма	23.06	120000	бірінші жұмыртқалар пайда болған кездегі фаза
			27.06	80000	
			23.06	120000	
			27.06	80000	
	10 капсула/га	габро-бракон	11.07	700	ересек жұлдызқұрт пайда болған кездегі фаза
			15.07	700	
			11.07	1050	
			15.07	1050	

23 маусым күні мақта көбелегіне қарсы трихограмма капсулаларында гектарына 120000 дарақ есебімен шығару жұмыстары жүргізілді. Шығару екі нұсқада жүзеге асырылды: гектарына 50 және 100 нүкте орналастыру арқылы. Орналастыру нұсқалары бойынша паразитоидты гектарына 80000 дарақ мөлшерінде қайта енгізу 27 маусым күні жүргізілді.

ҰҰА-мен Biodrop автоматтандырылған жүйесі арқылы капсулаларда қолданылған трихограмма мен габробраконның биологиялық тиімділігі анықталды (5-кесте).

5-кесте – Қызанақ егістіктерінде мақта көбелегіне қарсы капсулалардағы трихограмма мен габробраконның биологиялық тиімділігі, Алматы облысы, Қарасай ауданы, 2025 ж.

Тәжірибе нұсқасы	Өсімдік фазасы	Орташа жұмыртқа мен жұлдызқұрттар саны 100 өсімдікке дейін / кейін		Биологиялық тиімділік, %
		шығаруға дейін	паразиттелген	
екінші ұрпақ				
Трихограмма 100 нүкте/га, габробракон 15 нүкте/га	бүршіктену	10,0	7,75	77,5
Трихограмма 50 нүкте/га, габробракон 10 нүкте/га		11,5	8,0	69,5
Бақылау (енгізілмеген)		9,5	-	-
үшінші ұрпақ				
Трихограмма 100 нүкте/га, габробракон 15 нүкте/га	жеміс түзілу	7,0	5,8	82,8
Трихограмма 50 нүкте/га, габробракон 10 нүкте/га		9,2	6,5	70,6
Бақылау (енгізілмеген)		16,0	-	-

Өсімдіктердің бүршіктену кезеңінде мақта көбелегінің екінші ұрпағына қарсы биологиялық тиімділік гектарына 10 нүкте болғанда 69,5%, ал гектарына 15 нүкте болғанда 77,5% құрады. Өсімдіктердің жеміс түзу фазасында үшінші ұрпаққа қарсы тиімділік тиісінше 70,6% және 82,8% деңгейіне жетті.

Талқылау

Қызанақ егістіктерінде мақта көбелегіне қарсы биоагенттерді қолдану бойынша жүргізілген далалық сынақтар капсулаланған энтомофагтар – трихограмма мен габробраконды оңтайлы шығару мөлшері мен орналастыру нүктелерінің тығыздығын сақтай отырып пайдаланудың жоғары тиімділігін көрсетті. Осылайша, паразитоидтарды шығару нүктелерінің тығыздығын арттыра отырып бірлесіп қолдану мақта көбелегінің санын сенімді түрде басуға мүмкіндік береді, зиянкестің зияндылығын төмендетіп, экологиялық қауіпсіз қорғаудың алғышарттарын қалыптастырады.

Arduino Mega микроконтроллері, Raspberry Pi 4B мини-компьютері және көпсенсорлы модуль (DHT11, BMP180, MQ-3, MQ-7, TCS3200) негізінде Edge–Fog–Cloud үш деңгейлі архитектураға сүйенген микроклиматты интеллектуалды мониторинг жүйесі әзірленді. Бұл жүйені енгізу температураны, ылғалдылықты, қысымды және ауадағы газ құрамын нақты уақыт режимінде автоматты түрде бақылауды қамтамасыз етіп, энтомофабриканың «цифрлық егізін» құруға және ақылды ауыл шаруашылығы (Smart Agriculture) тұжырымдамасын жүзеге асыруға негіз қалайды.

Жұмыстың маңызды технологиялық нәтижесі ретінде трихограмма және габробракон үшін PLA-пластиктен жасалған жаңа буындағы биоыдырайтын 3D-баспа капсулалары жасалып, сынақтан өткізілді. Оңтайландырылған конструкциялар (трихограмма үшін № 2, 3 капсулалар және габробракон үшін № 3, 4 капсулалар) иелердің толық қоныстануын, паразитоидпен 100% залалдануды және механикаландырылған енгізу кезінде жоғары механикалық беріктікті қамтамасыз етті. Капсулалар материалы экологиялық қауіпсіз және екі жыл ішінде толық ыдырайды, бұл тұрақты егіншілік қағидаттарына толық сәйкес келеді.

Алматы облысында жүргізілген далалық сынақтар әзірленген технологиялардың жоғары биологиялық тиімділігін растады. Biodrop энтомофагтарды тарату құралы арқылы ҰҰА-мен трихограмма капсулаларын (100 нүкте/га) және габробраконды (15 нүкте/га) бірлесіп енгізу бақылаумен салыстырғанда мақта көбелегінің санын 82,8% дейін төмендетуді қамтамасыз етті. Алынған деректер ұсынылған биотехнологиялық шешімдердің ашық топырақ жағдайында жоғары бейімделгіштігін және практикалық қолдануға жарамдылығын көрсетеді.

Жалпы алғанда, энтомофагтарды өсірудің жетілдірілген әдістерін, микроклиматты басқарудың интеллектуалды жүйесін және 3D-баспа негізіндегі капсулалау технологиясын интеграциялау биологиялық өсімдіктерді қорғау құралдарын өнеркәсіптік, автоматтандырылған және экологиялық қауіпсіз түрде өндірудің негізін қалайды. Бұл тәсілді іске асыру химиялық инсектицидтерді қолдануды азайтуға, агроэкожүйелерге пестицидтік жүктемені төмендетуге және цифрландыру мен экологиялық интеграция қағидаттарына негізделген тұрақты ауыл шаруашылығына көшуге ықпал етеді.

Қорытынды

Алынған нәтижелер экологиялық қауіпсіз, ауқымды және экономикалық тұрғыдан тиімді өсімдіктерді биологиялық қорғау стратегияларын дамытуға елеулі үлес қосады. Әзірленген технологиялар қызанақ зиянкестерін тұрақты басқару жүйелеріне сәтті енгізілуі мүмкін, сондай-ақ әртүрлі агроклиматтық аймақтарда басқа ауыл шаруашылығы дақылдарын қорғауға бейімделуі ықтимал. Бұл қазіргі заманғы өсімдік шаруашылығы тәжірибесіне инновациялық биологиялық әдістерді кең көлемде енгізуге жаңа мүмкіндіктер ашады.

Авторлардың қосқан үлесі

НМ: энтомофагтарды өсірудің жетілдірілген әдістерін, микроклиматты басқарудың интеллектуалды жүйесін зерттеді, мақаланың негізгі бөлімін жазды. АЧ: Энтомофагтарды өсіру және далалық сынақтарды жүргізу жұмыстарын атқарды. ГМ: эксперименттерді ұйымдастыру, мақаланы өңдеу және жариялауға дайындау. АР: Arduino Mega микроконтроллері, Raspberry Pi 4B мини-компьютері және көпсенсорлы модуль (DHT11, BMP180, MQ-3, MQ-7, TCS3200) негізінде Edge–Fog–Cloud үш деңгейлі архитектураға сүйенген микроклиматты интеллектуалды мониторинг жүйесін әзірледі. РФ: Трихограмма және габробракон үшін PLA-пластиктен жасалған жаңа буындағы биоыдырайтын 3D-баспа капсулалар жасап, сынақтан өткізді. НК: далалық зерттеулерді жүргізді, әдістемелерді дайындады.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу жұмыстары Қазақстан Республикасы Ауыл шаруашылығы министрлігінің 2024–2026 жылдары қаржыландыруымен BR22885887 «Зиянды организмдерді басқару жүйесін жетілдіру және ендіру» ғылыми-техникалық бағдарламасының 3-міндеті «Пестицидтер мен биоагенттерді (энтомофагтар) нақты қолдану технологиясын енгізу» шеңберінде орындалды.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Van Lenteren, J.C. (2012). The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57, 1–20. DOI: 10.1007/s10526-011-9395-1.
- 2 Smith, S.M. (1996). Biological control with Trichogramma: advances, successes, and potential of their use. *Annual Review of Entomology*, 41, 375–406. DOI:10.1146/annurev.en.41.010196.002111.
- 3 Hassan, S.A. (1993). The mass rearing and utilization of Trichogramma to control lepidopterous pests: achievements and outlook. *Pesticide Science*, 37, 387–391.
- 4 Parra, J.R.P. (2010). *Egg parasitoids in biological control systems*. In Egg Parasitoids in Agroecosystems with Emphasis on Trichogramma Springer. 1–40.
- 5 Bigler, F. (1986). *Quality control in Trichogramma production*. In Proceedings of the International Symposium on Trichogramma. 93–111.
- 6 Smith, S.M., Hubbes, M., Carrow, J.R. (2001). Advances in Trichogramma biological control. *Annual Review of Entomology*, 46, 245–273.
- 7 Carvalho, G.A., Parra, J.R.P., Baptista, G.C. (2005). Rearing of Trichogramma pretiosum on Ephestia kuehniella eggs. *Neotropical Entomology*, 34(2), 197–201. DOI:10.1590/S1519-566X2005000200001.
- 8 Baldiviezo, L.V., Guzmán-Franco, A.W., García, J.A. (2023). Microencapsulation of a native strain of an entomopathogenic fungus: an alternative for biological control. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1193942. DOI:10.3389/fmicb.2023.1193942.
- 9 Celestino, M.F., de Oliveira, L.C., Silva, A.P. et al. (2022). Encapsulation methods of entomopathogenic fungi for their application in biological control. *Research, Society and Development*, 11(10), e380111038031. DOI:10.33448/rsd-v11i10.38031.
- 10 Tomar, P., Sharma, A., Singh, R. (2024). Entomopathogenic microorganisms as biocontrol agents: formulations, applications and future prospects. *Applied Soil Ecology*, 195, 104961. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.104961.
- 11 Tyagi, S., et al. (2024). Digital agriculture and biological protection systems. *Agricultural Water Management*, 290, 108500. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108500.
- 12 Lü, X., Sun, Z., Liu, Y. et al. (2024). Evaluation of key factors for mass rearing the egg parasitoid Telenomus remus. *CABI Agriculture and Bioscience*, 5, 263. DOI:10.1186/s43170-024-00263-w.
- 13 Atashi, N., et al. (2021). Effects of host egg age on Trichogramma performance. *Insects*, 12(8), 724.
- 14 Laurentis, V.L., et al. (2019). Performance of Trichogramma pretiosum on different hosts. *Scientific Reports*, 9, 11917.
- 15 Khan, M.A., Ashfaq, M., Ahmad, S. et al. (2014). Field evaluation of Trichogramma chilonis against Helicoverpa armigera in tomato crop. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 51(2), 321–326.
- 16 Мухамадиев, Н.С., Курманғалиева, Н.Д., Чадинова, А.М., Мендибаева, Г.Ж., Жузбаев, М.Ж. (2025). Эффективность применения энтомофагов на посадках томата против хлопковой совки. *Исследования, результаты*, 2, 190–198. DOI:10.37884/2-2025/19.
- 17 Мухамадиев, Н.С., Курманғалиева, Н.Д., Чадинова, А.М., Мендибаева, Г.Ж., Кенес, Н.Т. (2025). Особенности развития южноамериканской томатной моли (*Tuta absoluta*) на посадках томатов. *Вестник Кызылординского университета имени Коркыт Ата*, 2(73), 154–164. DOI:10.52081/bkaku.2025.v73.i2.263.
- 18 Твердюков, А.П., Никонов, П.В., Ющенко, Н.П. (1993). *Биологический метод борьбы с вредителями и болезнями в защищенном грунте*. Москва: Колос. 25–31.
- 19 Агасьева, И.С. и др. (2019). Оценка биологической эффективности биологических средств защиты растений против основных вредителей кукурузы. *Масличные культуры*, 3(179), 124–129.

References

- 1 Van Lenteren, J.C. (2012). The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57, 1–20. DOI:10.1007/s10526-011-9395-1.
- 2 Smith, S.M. (1996). Biological control with Trichogramma: advances, successes, and potential of their use. *Annual Review of Entomology*, 41, 375–406. DOI:10.1146/annurev.en.41.010196.002111.
- 3 Hassan, S.A. (1993). The mass rearing and utilization of Trichogramma to control lepidopterous pests: achievements and outlook. *Pesticide Science*, 37, 387–391.
- 4 Parra, J.R.P. (2010). *Egg parasitoids in biological control systems*. In Egg Parasitoids in Agroecosystems with Emphasis on Trichogramma Springer. 1–40.
- 5 Bigler, F. (1986). *Quality control in Trichogramma production*. In Proceedings of the International Symposium on Trichogramma. 93–111.
- 6 Smith, S.M., Hubbes, M., Carrow, J.R. (2001). Advances in Trichogramma biological control. *Annual Review of Entomology*, 46, 245–273.
- 7 Carvalho, G.A., Parra, J.R.P., Baptista, G.C. (2005). Rearing of Trichogramma pretiosum on Ephestia kuehniella eggs. *Neotropical Entomology*, 34(2), 197–201. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2005000200001>
- 8 Baldviezo, L.V., Guzmán-Franco, A.W., García, J.A. (2023). Microencapsulation of a native strain of an entomopathogenic fungus: an alternative for biological control. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1193942. DOI:10.3389/fmicb.2023.1193942.
- 9 Celestino, M.F., de Oliveira, L.C., Silva, A.P. et al. (2022). Encapsulation methods of entomopathogenic fungi for their application in biological control. *Research, Society and Development*, 11(10), e380111038031. DOI:10.33448/rsd-v11i10.38031.
- 10 Tomar, P., Sharma, A., Singh, R. (2024). Entomopathogenic microorganisms as biocontrol agents: formulations, applications and future prospects. *Applied Soil Ecology*, 195, 104961. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.104961.
- 11 Tyagi, S., et al. (2024). Digital agriculture and biological protection systems. *Agricultural Water Management*, 290, 108500. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108500.
- 12 Lü, X., Sun, Z., Liu, Y., et al. (2024). Evaluation of key factors for mass rearing the egg parasitoid Telenomus remus. *CABI Agriculture and Bioscience*, 5, 263. DOI:10.1186/s43170-024-00263-w.
- 13 Atashi, N., et al. (2021). Effects of host egg age on Trichogramma performance. *Insects*, 12(8), 724.
- 14 Laurentis, V.L., et al. (2019). Performance of Trichogramma pretiosum on different hosts. *Scientific Reports*, 9, 11917.
- 15 Khan, M.A., Ashfaq, M., Ahmad, S. et al. (2014). Field evaluation of Trichogramma chilonis against Helicoverpa armigera in tomato crop. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 51(2), 321–326.
- 16 Mukhamadiev, N.S., Kurmangalieva, N.D., Chadinova, A.M., Mendibaeva, G.Zh., Zhuzbaev, M.Zh. (2025). Effektivnost' primeneniya entomofagov na posadkakh tomata protiv khlopkovoy sovki. *Issledovaniya, rezul'taty*, 2, 190–198. DOI:10.37884/2-2025/19. [in Russ].
- 17 Mukhamadiev, N.S., Kurmangalieva, N.D., Chadinova, A.M., Mendibaeva, G.Zh., Kenes, N.T. (2025). Osobennosti razvitiya yuzhnoamerikanskoy tomatnoy moli (*Tuta absoluta*) na posadkakh tomatov. *Vestnik Kyzylordinskogo universiteta imeni Korkyt Ata*, 2(73), 154–164. DOI:10.52081/bkaku.2025.v73.i2.263. [in Russ].
- 18 Tverdyukov, A.P., Nikonov, P.V., Yushchenko, N.P. (1993). *Biologicheskiy metod bor'by s vredityelyami i boleznyami v zashchishchennom grunte*. Moscow: Kolos, 25–31. [in Russ].
- 19 Agas'eva, I.S. et al. (2019). Ocenka biologicheskoy effektivnosti biologicheskikh sredstv zashchity rasteniy protiv osnovnykh vreditel'ey kukuruzy. *Maslichnye kul'tury*, 3(179), 124–129. [in Russ].

Капсулирование энтомофагов против основного вредителя томата и их применение с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) по технологии Biodrop

Мухамадиев Н.С., Чадинова А.М., Мендібаева Г.Ж., Рысбекова А.М., Фазылбеков Р.
Курмангалиева Н.Д.

Аннотация

Предпосылки и цель. Современное сельское хозяйство требует снижения уровня применения химических пестицидов и внедрения экологически безопасных технологий. Цель исследования – совершенствование технологий массового разведения, капсулирования энтомофагов (*Trichogramma* spp., *Habrobracon hebetor*) и их внесения с использованием БПЛА.

Материалы и методы. Исследования проводились в лабораторных и полевых условиях. Для контроля микроклимата применена IoT-система на основе архитектуры Edge–Fog–Cloud (Arduino Mega, Raspberry Pi 4B, датчики). Разработаны биоразлагаемые капсулы из PLA методом 3D-печати, их прочность оценивалась при сбросе с высоты 3 м. В полевых условиях биоагенты вносились с помощью системы Biodrop.

Результаты. Оптимальные конструкции капсул (№ 1, 2 для трихограммы, № 3, 4 для габробракона) обеспечили 100% заселение и паразитирование. Капсулы показали высокую механическую устойчивость. Биологическая эффективность в полевых условиях составила 69,5–82,8%.

Заключение. Интеграция технологий капсулирования, цифрового мониторинга микроклимата и применения БПЛА повышает эффективность биологической защиты растений и способствует развитию устойчивого и экологически безопасного сельского хозяйства.

Ключевые слова: биологическая защита растений; *Trichogramma* spp.; *Habrobracon hebetor*; капсулирование; 3D-печать; аппаратно-программный комплекс BioDrop.

Encapsulation of entomophages against the main tomato pest and their application using unmanned aerial vehicles (UAVs) based on Biodrop technology

Nurzhan Mukhamadiyev, Aizhan Chadinova, Gulnaz Mengdibayeva, Alua Rysbekova
Rinat Fazylbekov, Nurbakyt Kurmangaliyeva

Abstract

Background and Aim. Modern agriculture requires a reduction in chemical pesticide use and an implementation of environmentally safe technologies. The aim of this study was to optimize technologies for mass rearing and encapsulation of entomophagous biological control agents (*Trichogramma* spp., *Habrobracon hebetor*), as well as to evaluate their application using UAVs.

Materials and Methods. The study was conducted under both laboratory and field conditions. An IoT-based microclimate monitoring system with Edge Fog Cloud architecture (Arduino Mega, Raspberry Pi 4B, sensors) was implemented. Biodegradable PLA capsules were developed using 3D printing, and their durability was tested by dropping from a height of 3 m. Field application was carried out using the Biodrop system.

Results. Optimal capsule designs (No. 2–3 for *Trichogramma*, No. 3–4 for *Habrobracon*) ensured 100% host colonization and parasitization. The capsules demonstrated high mechanical stability. Field experiments showed biological efficiency ranging from 69.5% to 82.8%.

Conclusion. The integration of encapsulation technology, digital microclimate monitoring, and UAV-based application enhances the efficiency of biological plant protection, supporting the development of sustainable and environmentally friendly agriculture.

Keywords: biological plant protection; *Trichogramma* spp.; *Habrobracon hebetor*; encapsulation; 3D printing; BioDrop hardware software complex.