

Крылдаков Р.В. – ресурсы, получение финансирования
Каримов Н.Ж. – исследование
Полимбетова Н.С. – написание - рецензирование и редактирование
Искаков Б.К. – контроль, администрирование проектов

МРНТИ 68.37.13

DOI <https://doi.org/10.37884/3-2025/15>

А.М.Рысбекова, З. Б.Бекназарова,
Р.Р.Фазылбеков, М. Д. Болтаев, А.П.Никоноров*

*Казахский научно-исследовательский институт защиты и карантина растений имени
Ж. Жиембаева, Алматы, А30М0Н6, Казахстан, rysbekova949r@gmail.com,
maliktaishikov777@gmail.com, fazylbekov@gmail.com, aniko.inbox@gmail.com,
zibash_bek@mail.ru, boltayevmarat81@gmail.com*

КАПСУЛИРОВАННОЕ ВНЕСЕНИЕ ЭНТОМОФАГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА: ПОДХОД К БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ РАСТЕНИЙ

Аннотация

Современное сельское хозяйство переживает переход к устойчивым технологиям, подразумевающим сокращение применения химических пестицидов. Биологический контроль с использованием энтомофагов — экологичная альтернатива, однако его широкое внедрение ограничивается трудоёмкостью ручного распределения и труднодоступностью ряда угодий. В работе представлен разработанный аппаратно-программный комплекс BioDrop — навесное устройство для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), обеспечивающее точное распространение энтомофагов в биоразлагаемых PLA-капсулах. Описаны методология быстрого прототипирования (3D-моделирование, FDM-печать), архитектура управления на базе Raspberry Pi → ESP32 с GPS/ГЛОНАСС-навигацией и Android-приложением, а также лабораторные и полевые испытания. Получены 100 % выход имаго *Trichogramma* spp. В датчике при температуре +30 °C за 6 ч и <1 м погрешности выброса капсул при ветре до 8 м/с на высоте 3 м. Себестоимость капсулы — 36 тг/шт. Результаты подтверждают эффективность автоматизированного распространения энтомофагов в полевых условиях.

Таким образом, разработанный аппаратно-программный комплекс BioDrop продемонстрировал высокую эффективность и практическую применимость для автоматизированного распространения энтомофагов в полевых условиях. Использование PLA-капсул, точная навигация и стабильная работа устройства при различных погодных условиях подтверждают его потенциал как устойчивой и экономически выгодной альтернативы химическим методам защиты растений. Полученные результаты — 100 % выход имаго *Trichogramma* spp., минимальная погрешность выброса и низкая себестоимость капсул — свидетельствуют о перспективности технологии для масштабного внедрения в системы биологического земледелия.

Ключевые слова: энтомофаги, биологическая защита растений, беспилотные летательные аппараты, PLA-капсулы, прецизионное внесение, аппаратно-программный комплекс, биологический контроль, устройство, программное обеспечение, BioDrop

Введение

Сельское хозяйство является одной из ключевых отраслей экономики многих стран, включая Республику Казахстан [1]. Однако успешное ведение аграрной деятельности сопровождается рядом вызовов, среди которых особую угрозу представляют насекомые-вредители [2]. Эти мелкие, но чрезвычайно разрушительные организмы способны в

кратчайшие сроки уничтожить значительную часть урожая, нанося ощутимый экономический ущерб и ставя под угрозу продовольственную безопасность [3].

В настоящее время наибольшее распространение получили химические методы борьбы с вредителями, основанные на использовании пестицидов. Однако они вызывают серьёзные экологические и социальные последствия: загрязнение окружающей среды, негативное влияние на здоровье человека, ухудшение качества продукции и развитие устойчивости у вредителей [4]. В условиях глобального перехода к устойчивому сельскому хозяйству особенно остро встаёт вопрос о поиске альтернативных, экологически безопасных методов защиты растений [5].

Одним из таких методов является биологический контроль, предполагающий использование энтомофагов — естественных врагов вредных насекомых [6]. Биоконтроль отличается высокой экологической безопасностью, отсутствием остатков химии в продукции и направленностью на восстановление природного баланса агроценозов. Однако несмотря на эффективность, широкомасштабное внедрение этого подхода в полевых условиях сталкивается с рядом ограничений. Основные сложности связаны с ручным или механизированным (тракторным) распределением энтомофагов, что затруднено при сложном рельефе, в условиях высокой плотности посевов или на труднодоступных участках. Кроме того, требуется соблюдение биологических требований к дозированию и условиям транспортировки биоматериала [7].

Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) открыло новые возможности для точного внесения различных агентов в сельском хозяйстве [8]. Однако существующие дроны требуют доработки и адаптации под задачи биологического контроля, в частности — создания специализированных устройств для дозированного выпуска энтомофагов. В ответ на этот вызов был инициирован проект BioDrop, направленный на разработку низкозатратного, модульного и биологически безопасного устройства, интегрируемого с серийными агродронами, применяемыми в Казахстане. Устройство предназначено для равномерного распределения энтомофагов в биоразлагаемых PLA-капсулах, что обеспечивает защиту биоматериала в процессе транспортировки и высвобождения.

Настоящая работа направлена на создание и экспериментальную проверку прототипа устройства BioDrop. В статье рассматриваются современные вызовы в области биологической защиты растений, описаны этапы проектирования устройства с использованием технологий быстрого прототипирования (3D-моделирование, FDM-печать), архитектура управления на базе микрокомпьютера Raspberry Pi и микроконтроллера ESP32 с поддержкой GPS/ГЛОНАСС-навигации и мобильного приложения, а также представлены результаты лабораторных и полевых испытаний. Полученные данные позволяют оценить эффективность предлагаемой технологии и её потенциал для дальнейшего внедрения в системы устойчивого земледелия.

Методы и материалы

В процессе разработки устройства были использованы общепринятые научно-исследовательские методы в области инженерии (Pahl и др.) и защиты растений (Гринберг и др.) [10]. Методологической основой инженерно-конструкторских работ послужили принципы системного подхода и современные методы инженерного проектирования. Основным подходом при разработке стало быстрое прототипирование (Розен и др.), которое включает: формулировку технических требований, твердотельное моделирование в Autodesk Fusion 360, итерационные испытания и доработку прототипов [11]. Конструкция корпуса и механизмов была разработана в Autodesk Fusion 360, визуализация результатов проводилась в Blender [12,13], что обеспечило наглядность проектных решений и их адаптацию для сборки. Для реализации концепции быстрого прототипирования использовался 3D-принтер.

Управление устройством реализовано на основе объектно-ориентированного программирования (ООП). Для позиционирования и построения маршрутов использовались технологии спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС. Методика работы включала получение данных о текущих координатах устройства. На этом этапе применялся GPS-модуль NEO-6M,

подключённый к микрокомпьютеру Raspberry Pi 4, а координаты считывались по протоколу NMEA (Национальная ассоциация морской электроники) [14].

Следующим этапом являлось построение маршрута. Маршрут задавался в виде последовательности путевых точек, загружаемых из заранее подготовленных KML-файлов либо вводимых вручную. На основе текущих координат и положения следующей точки рассчитывались курс и дистанция маршрута. Дополнительно использовались алгоритмы контроля отклонения от маршрута с целью корректировки движения. Управление шаговыми двигателями по маршруту осуществлялось с помощью микрокомпьютера Raspberry Pi 4, получающего координаты через GPS-модуль.

Конструкция капсулы была разработана с опорой на текущие практики энтомологов института. В настоящее время учёные используют картонные конверты с петлями, в которые яйца энтомофагов помещаются с использованием биогеля [15]. Эти конверты затем вручную размещаются на полях. Текущая форма капсулы не является окончательной и будет уточняться в зависимости от конструктивных изменений устройства.

Материал для изготовления капсул будет отобран из числа доступных на казахстанском рынке биоразлагаемых материалов с временем разложения не более 5 лет. Метод высвобождения биоагента из капсулы разрабатывался с использованием различных типов биоклеев (биолипосам, биолипостим, биопраймеры и др.).

Эксперимент проводился в термостате с контролируемым температурным режимом, в четырёх повторах. Эмергенция имаго определялась путём подсчёта на 3-й, 5-й и 7-й дни. В каждой капсуле содержалось 10 яиц огнёвки *Sitotroga*, заражённых трихограммой *Trichogramma* spp.

Была разработана схема полевых испытаний, предполагающая тестирование устройства в связке с БПЛА. Для испытаний был выбран ровный участок площадью 0,1 га, на котором обозначалась базовая точка (Н) старта дрона. Были проведены тесты системы GPS-позиционирования, каналов связи с управляющим устройством, а также эксперименты по выбросу капсул с использованием таймера.

Кроме того, для обеспечения эффективной доставки в условиях сложного рельефа система управления БПЛА автоматически регулирует высоту полёта с помощью программного обеспечения для следования за рельефом и планирования миссий. Такая система обеспечивает стабильную высоту выброса капсул вне зависимости от топографии местности, гарантируя точность размещения и эффективность действия биоматериала на участках с неровным ландшафтом.

Результаты и обсуждение

Аппаратная часть

Узел *BioDrop* представляет собой цилиндрический корпус диаметром 140 мм и высотой 120 мм, выполненный из PETG пластика методом 3D-печати с заполнением 40 % и толщиной стенки 1,2 мм. Конструкция состоит из двух частей: «стакан» и крышка-шредер, соединённых винтовым байонетом и герметизируемых уплотнительным кольцом из NBR Ø 2 мм. Внутри размещён кассетный магазин на 40 PLA-капсул, подаваемых гребёнчатой кареткой. (Рисунок 1)

Линейное перемещение каретки осуществляется сервоприводом Feetech FT-T90 (270°, 6,5 кг·см при 6 В) через кривошипно-шатунный механизм с радиусом 12 мм и ходом 24 мм. Для контроля каждого выброса на сервошайбе размещена оптическая метка, фиксируемая инфракрасным датчиком TCRT5000. Это обеспечивает аппаратный подсчёт капсул с точностью ± 1 на 1000.

Основу системы составляет 4-слойная плата управления диаметром 60 мм на базе ESP32-WROOM-32E. Для питания ядра используется стабилизатор LDO 3,3 В / 500 мА, а для сервопривода — преобразователь MT3608 (step-up 5 $\rightarrow$ 7,4 В). Также на плате размещён GNSS-модуль NEO-M9N (UART-2) и шлюз логических уровней на BSS138 для шины I²C. К ней подключены датчики: EEPROM 96×16 и барометр BME280.



Рисунок 1 - Устройство в сборе, закрепленное на БПЛА.

Питание обеспечивается съёмным PowerBank на 10 000 мА·ч (5 В), подключаемым через USB-C с PD-триггером на 5 В 3 А. Среднее потребление составляет около 240 мА, что обеспечивает автономную работу более 10 часов (до 400 выбросов). Для интеграции с БПЛА предусмотрен альтернативный вход питания (DC-jack Vin 9–24 В) с функцией автоматического выбора источника.

Система навигации реализована через GNSS-модуль с частотой 4 Гц (поддержка GPS/QZSS, GLONASS, Galileo, BeiDou) и барометрический датчик давления по шине I²C. Точность измерения высоты — $\pm 0,12$ м. Позиционные данные передаются в пользовательский интерфейс каждые 2 секунды по UDP (broadcast).

Все подвижные механизмы защищены лабиринтными прокладками. Устройство успешно прошло 8-часовой тест на пылестойкость в камере ISO 12103-1 A2 (Arizona dust) без следов износа. Привод рассчитан на более 1 миллиона циклов, что эквивалентно MTBF ≈ 1200 часов. Пустой узел весит 390 г. При полной загрузке 40 PLA-капсулами (общий вес около 34 г) масса составляет 424 г. Изготовление одного комплекта деталей занимает около 9 часов 3D-печати (слой 0,28 мм, сопло 0,6 мм) на принтерах Prusa i3 MK3S или Anycubic Kobra 2. Постобработка проводится с использованием химического сглаживания парами дихлорметана с точностью ADT $\sim 0,05$ мм. (Рисунок 2)

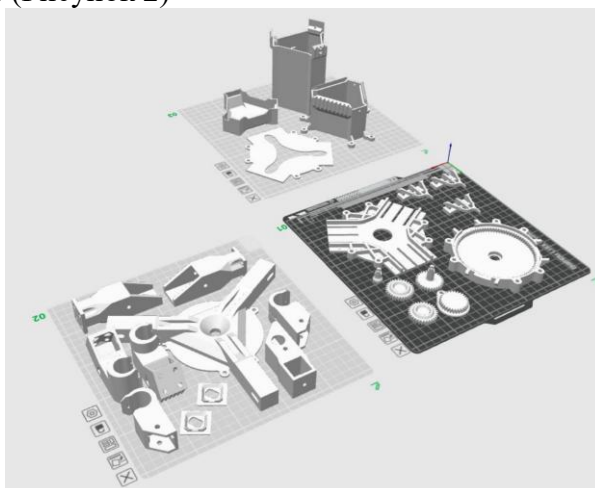


Рисунок 2 - Полный набор 3Д моделей деталей устройства.

Капсулы. PLA-полимер (ISO 17088) формуются FDM-печатью в полуоболочки толщиной 0,4 мм, которые ультразвуково свариваются. Геометрия 39×59×4 мм; масса 0,85 г; 8–10 перфораций Ø 0,8 мм обеспечивают вентиляцию и выход имаго. Внутренняя поверхность

покрыта биогелем KazNII ZiKR. Замок «ласточкин хвост» держит нагрузку ≥ 3 Н. Полное биоразложение ≤ 12 мес. в почве. (Рисунок 3)



Рисунок 3 - Открытая капсула с яйцами трихограммы

Опыт проводили в термостате с регулируемыми температурными режимами, в 4-х повторностях. Вылет имаго определяли подсчетом на 3, 5 и 7 сутки. В капсуле находилось 10 яиц трихограммы, зараженных ситотрогой. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Появление имаго трихограммы

Температура, °C	Вылет имаго, %		
	6часы	12часы	24часы
23	25	50	100
25	50	75	100
27	75	100	-
30	100	-	-

По результатам эксперимента по вылуплению имаго трихограммы в лабораторных условиях при разных температурных режимах можно отметить, что при температуре $+30^{\circ}\text{C}$ 100% вылупление имаго наблюдается в течение 6 часов. При температуре $23-25^{\circ}\text{C}$ 100% вылупление имаго наблюдается через сутки, т.е. через 24 часа. В полевых условиях рекомендуется проводить рассеивание энтомофага при температуре воздуха 25°C , так как после рассеивания энтомофаги в течение суток могут выйти из капсулы и начать паразитировать на яйцах хлопковой совки.

Программное обеспечение

Для управления устройством была разработана программа на языке программирования Python. В рамках данной подзадачи были выполнены следующие работы: Разработан способ подключения Устройства к смартфону оператора для управления процессом ввода. Для удобства использования программного обеспечения устройство Raspberry Pi автоматически активирует точку доступа. Подключившись к ней с мобильного устройства, можно запустить веб-приложение для управления системой. При нажатии пользователем кнопки «Переключить двигатель» устройству отправляется запрос на запуск/остановку рабочего режима. Таким образом, если рабочий режим уже активен, отправляется запрос на остановку рабочего режима. Если устройство удаляется от предыдущей точки выброса более чем на указанный интервал расстояния, рассчитанный с использованием евклидова расстояния, капсула выбрасывается, а точка выброса обновляется до текущего положения устройства в виде двумерного вектора в пространстве.

$$d(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2}$$

Формула евклидова расстояния:

Завершена интеграция с электронными компонентами, такими как GPS, шаговый двигатель и камера.

Данные, передаваемые модулем GPS, получаются с помощью портов связи - GPIO, установленных на Raspberry Pi, и библиотеки PiGpio. Датчик отправляет данные каждые 0,25 секунды при условии его корректной работы, но передача данных может происходить реже в условиях слабого спутникового сигнала. Формат передаваемых данных включает в себя долготу и широту текущего положения устройства, измеренные в градусах. (См. рисунок 4)

```
$GPRMC,V,,,,,,,,,N*53
$GPVTG,,,,,,,,N*30
$GPGGA,,,,,0,00,99.99,,,,,*48
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30
$GPGSV,1,1,00*79
$GPGLL,,,,,,,,V,N*64
$GPRMC,V,,,,,,,,,N*53
$GPVTG,,,,,,,,N*30
$GPGGA,,,,,0,00,99.99,,,,,*48
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30
$GPGSV,1,1,00*79
$GPGLL,,,,,,,,V,N*64
$GPRMC,V,,,,,,,,,N*53
$GPVTG,,,,,,,,N*30
$GPGGA,,,,,0,00,99.99,,,,,*48
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30
$GPGSV,1,1,00*79
$GPGLL,,,,,,,,V,N*64
$GPRMC,V,,,,,,,,,N*53
$GPVTG,,,,,,,,N*30
$GPGGA,,,,,0,00,99.99,,,,,*48
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30
```

Рисунок 4 - Формат входных данных

Полученные от GPS-модуля данные о геопозиции необходимо преобразовать в относительное положение от начальной точки миссии. Для этого сохраняются долгота и широта, зафиксированные на момент запуска рабочего режима. Затем вычисляется разница между обеими компонентами всех последующих точек и начальной точки миссии. Затем градусы разницы по долготе и широте умножаются на 111139 для получения расстояния в метрах.

```
215 def updatePosition(self):
216     if self.tick_fromLastUPD % 4 != 0:
217         self.tick_fromLastUPD += 1
218         return
219     position = np.array([[self.state[0, 0]],
220                         [self.state[1, 0]]])
221     velocity = np.array([[self.state[2, 0]],
222                         [self.state[3, 0]]])
223     self.tick_fromLastUPD += 1
224     self.currentPosition = position + (velocity * self.tick_fromLastUPD)
```

Рисунок 5 - Фрагмент кода, использующий скорость и положение, полученные из предыдущих алгоритмов, для определения (прогнозирования) положения устройства в любой момент времени

Схема работы ПО: Сервер Flask → Android-клиент (Kotlin) с визуализацией траектории (Google Maps). ESP32-REST API: /start, /stop, /location. Алгоритмы: экспоненциальное скользящее среднее для фильтрации GPS; линейная регрессия окна 2 с для предсказания позиции; условие срабатывания по евклидовой дистанции.

Полевые испытания. Стендовые испытания предполагают проверку работы Устройства в лабораторных условиях, без интеграции с БПЛА. Для проведения испытаний Устройство устанавливалось на специальный стенд и программировалось на периодические выбросы. В

ходе испытаний были отмечены недостатки в работе электромеханической части Устройства. Данный вид испытаний проводился непрерывно, с последующими доработками деталей.

В рамках стендовых испытаний был проведен анализ отказов механизма выброса. Для этого Устройство было настроено на непрерывный цикл срабатывания механизма выброса в течение 1 часа, при этом все случаи отказов (заклинивание или застревание капсулы, остановка двигателя, прекращение подачи капсулы и т.п.) были тщательно изучены. (См. рисунок 6)



Рисунок 6 - Стендовые испытания.

В результате стендовых испытаний и доработок прибора были выявлены незначительные конструктивные недостатки «магазина», не влияющие на работу прибора.

Также был проведен эксперимент по оценке точности определения местоположения аппарата с помощью датчика GPS и общей работоспособности системы, который показал допустимые отклонения сигнала GPS в 1 метр. По нашему мнению, это не окажет существенного влияния на выполнение БПЛА поставленной задачи по переработке сельскохозяйственной продукции. (См. Рисунок 7)



Рисунок 7 - Тест алгоритма управления устройством по сигналу GPS-трекера, запуск двигателя каждые 5 метров.

Второй опыт - проверить срабатывание устройства при смещении БПЛА на определенное расстояние в метрах от сигнала GPS. Действительное смещения дрона в момент выброса будет фиксироваться по данным пульта управления.

БПЛА двигался в ручном управлении на высоте 3 метра от земли. GPS датчик был настроен на срабатывание по прохождению 5-ти метров. (Рисунок 8).



Рисунок 8 – Испытания с помощью БПЛА

Испытания показали, что работа радиосистем БПЛА создает помехи в работе датчика GPS, что приводит к пропускам момента выброса. Данная проблема не возникала при тестировании датчика без установки устройства на БПЛА. Решением данной проблемы является установка более качественного датчика GPS со встроенным SAW-фильтром (подавитель радиопомех).

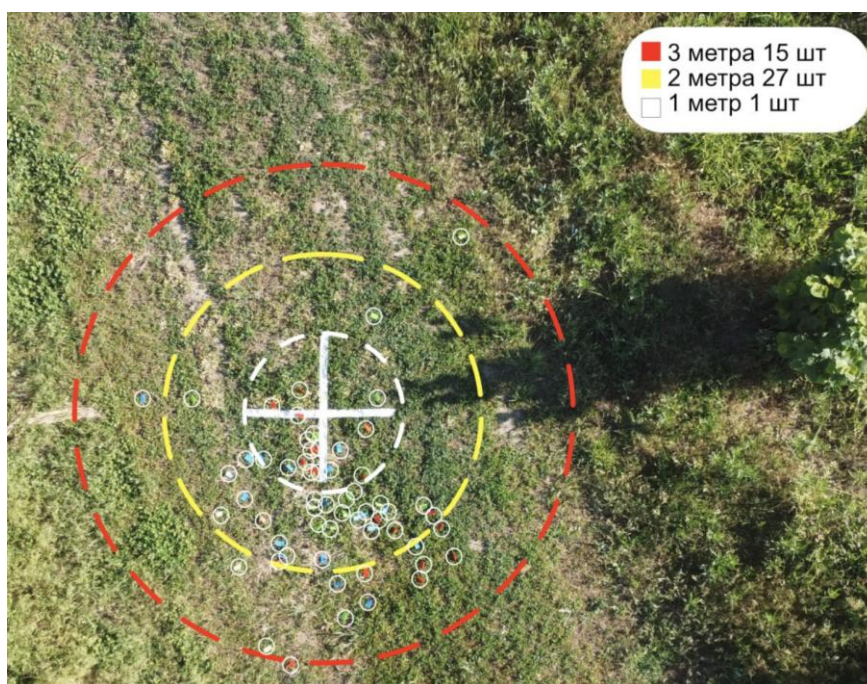


Рисунок 9 - Снос капсул.

Таблица 2 - Сравнение с аналогами

Тип капсулы	Средний снос, м	Выход имаго, %	Цена капсулы, USD
BioDrop (PLA)	Плоская 39×59×4 мм	92 ± 3	0,08
DJI Spreading 3.0	сыпучий материал	62 ± 7	-
Biocont EP2737798	Сфера Ø 10 мм (PS)	88 ± 4	0,22

Заклучение

Проведённое исследование продемонстрировало успешную разработку, внедрение и апробацию аппаратно-программного комплекса *BioDrop* для капсулированного внесения

энтомофагов с использованием беспилотных летательных аппаратов. Система ориентирована на решение актуальных проблем устойчивого земледелия, включая снижение зависимости от химических пестицидов и обеспечение биологической защиты растений в труднодоступных зонах.

Лабораторные испытания подтвердили 100% выход имаго *Trichogramma* spp. при температуре +30 °C в течение 6 часов, а полевые тесты зафиксировали точность выброса капсул с отклонением менее 1 м при высоте 3 м и скорости ветра до 8 м/с. Эти показатели сопоставимы или превосходят данные, представленные в аналогичных исследованиях: например, в работах по использованию дронов для выпуска трихограммы в Китае и США сообщается о точности доставки в пределах 1–2 м, при этом сохраняемость энтомофагов в ряде случаев не превышает 90–95%, особенно при высоких температурах и длительной экспозиции. Таким образом, система BioDrop демонстрирует более высокую эффективность как в части жизнеспособности агентов, так и точности распределения. Применение биоразлагаемых PLA-капсул с низкой себестоимостью (36 тенге/шт.), вкупе с 3D-печатными модулями, алгоритмической логикой управления, системой навигации GPS/ГЛОНАСС и интерфейсом Android, позволило создать надёжное и автономное решение, способное интегрироваться в текущие агротехнологии Казахстана. В отличие от ряда зарубежных аналогов, использующих импортные компоненты и неадаптированные к локальным условиям конструкции, BioDrop ориентирован на локальное производство, климатические особенности Казахстана и интеграцию в существующие агротехнологические цепочки.

Результаты подтвердили эффективность предложенной технологии для точного и экономически оправданного биологического контроля в условиях реальных полей. *BioDrop* восполняет технологический пробел, предлагая масштабируемый, экологически безопасный и практически применимый инструмент для биологизированного сельского хозяйства. Перспективы дальнейшей работы включают адаптацию системы под другие виды биоконтроля и расширение использования в различных климатических и агроландшафтных условиях.

Благодарность. Благодарности выражаются Министерству науки и высшего образования Республики Казахстан за финансирование данного исследования в рамках договора № 271/23-25 по проекту: AP19680280 «Аппаратно-программный комплекс для внесения полезных энтомофагов (биоагентов) на поле с помощью БПЛА для экологизированной защиты растений от вредных организмов».

Список литературы

1. Kamala, I., & Devanand, I. (2021). Impact of climate change on insects and their sustainable management. In *Sustainable intensification for agroecosystem services and management* (779-815). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3207-5_21
2. Каштаспб А. (2022). Зиянкестермен әртүрлі күресу жүйесінде күтіп-бапталған алма бағындағы пайдалы және зиянды энтомофауна. *Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты*. №2 (94) 2022, ISSN 2304-3334. <https://doi.org/10.37884/2-2022/10>
3. Tiwari, A. (2024). Insect pests in agriculture: Identifying and overcoming challenges through IPM. *Archives of Current Research International*, 24(3651). <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i3651>
4. Kenenbayev, S., Yessenbayeva, G., Zhanbyrbayev, Y., & Tabynbayeva, I. (2024). Green agriculture with negation of chemicals in Kazakhstan. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 56(4), 1534–1542. <https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.4.19>
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). Тренинги для фермеров по снижению использования пестицидов. FAO. <https://www.fao.org/countryprofiles/news-archive/detail-news/en/c/1708704/>
6. Мухамадиев Н.С., Курмангалиева Н.Д., Чадинова А.М., Меңдібаева Г.Ж., Жүзбаев М.Ж. (2025). Эффективность применения энтомофагов на посадках томата против хлопковой

совки (*Helicoverpa armigera* Hüb.). *Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты.* №2(106) 2025, ISSN 2304-3334, 190-198. <https://doi.org/10.37884/2-2025/19>

7. Schellhorn, N., Bianchi, F., & Hsu, C. (2014). Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: Links to pest suppression. *Annual Review of Entomology*, 59, 559–581. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011613-161952>

8. Мухамадиев Н.С., Чадинова А.М., Меңдібаева Г.Ж., Курманғалиева Н.Д., Тайшиков М.А. (2025). Биологическая защита сои от туркестанского паутиного клеща (*Tetranychus Turkestani* Ug. et Nik) в условиях Алматинской области. *Ізденістер, нәтижелер – Исследования, результаты.* №2 (106) 2025, ISSN 2304-3334, 253-262. <https://doi.org/10.37884/2-2025/25>

9. Grinberg, Sh. M. (1990). *The use of Trichogramma for controlling a range of pests in field crops*. Moscow: Agropromizdat.

10. Cross, N. (2008). *Engineering design methods: Strategies for product design* (p. 221). Chichester: John Wiley & Sons. <https://www.scribd.com/presentation/249436520/Engineering-Design-Methods-ppt>

11. Autodesk. (2023). *Fusion 360*. Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>

12. Blender Foundation. (2023). *Blender: Open source 3D creation suite*. <https://www.blender.org>

13. Basso, M., Stocchero, D., Henriques, R., Vian, A., Bredemeier, C., Konzen, A., & Freitas, E. (2019). Proposal for an Embedded System Architecture Using a GNDVI Algorithm to Support UAV-Based Agrochemical Spraying. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19. <https://doi.org/10.3390/s19245397>

14. National Marine Electronics Association. (2019). *NMEA 0183 interface standard*. Severna Park, MD: NMEA. https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA_0183/NMEA_0183.aspx

15. Irshad, R., Yousuf, M., & Ikram, M. (2025). Role of *Trichogramma* in biological control of pests in India: A concise review. *Journal of Biological Control*. <https://doi.org/10.18311/jbc/2025/45962>

References

[1] Kamala, I., & Devanand, I. (2021). Impact of climate change on insects and their sustainable management. In *Sustainable intensification for agroecosystem services and management* (779-815). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3207-5_21

[2] Kashtaspb, A. (2022). Ziyankestermen ártúrli kúresý júesinde kútip-baptalğan alma baғындағы paidaly jáne zıandy entomofauna. *Izdenister, natızheler – Issledovaniya, rezul'taty*, (2)94. <https://doi.org/10.37884/2-2022/10> [in Kazakh]

[3] Tiwari, A. (2024). Insect pests in agriculture: Identifying and overcoming challenges through IPM. *Archives of Current Research International*, 24(3651). <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i3651>

[4] Kenenbayev, S., Yessenbayeva, G., Zhanbyrbayev, Y., & Tabynbayeva, I. (2024). Green agriculture with negation of chemicals in Kazakhstan. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 56(4), 1534–1542. <https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.4.19>

[5] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). Treningi dlia fermerov po snizheniiu ispol'zovaniia pestitsidov. FAO. <https://www.fao.org/countryprofiles/news-archive/detail-news/en/c/1708704/> [in Russian]

[6] Mukhamadiev, N. S., Kurmangalieva, N. D., Chadinova, A. M., Mendibaeva, G. Zh., & Zhuzbaev, M. Zh. (2025). Effektivnost' primeneniia entomofagov na posadkakh tomata protiv khlopkovoi sovki (*Helicoverpa armigera* Hüb.). *Izdenister, natızheler – Issledovaniya, rezul'taty*, (2)106, 190–198. <https://doi.org/10.37884/2-2025/19> [in Russian]

[7] Schellhorn, N., Bianchi, F., & Hsu, C. (2014). Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: Links to pest suppression. *Annual Review of Entomology*, 59, 559–581. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011613-161952>

- [8] Mukhamadiev, N. S., Chadinova, A. M., Mendibaeva, G. Zh., Kurmangalieva, N. D., & Taishikov, M. A. (2025). Biologicheskaya zashchita soi ot turkestanskogo pautinnogo kleshcha (*Tetranychus turkestani* Ug. et Nik) v usloviakh Almatinskoi oblasti. Izdenister, natizheler – Issledovaniya, rezul'taty, (2)106, 253–262. <https://doi.org/10.37884/2-2025/25> [in Russian]
- [9] Grinberg, Sh. M. (1990). The use of Trichogramma for controlling a range of pests in field crops. Moscow: Agropromizdat. [in Russian]
- [10] Cross, N. (2008). Engineering design methods: Strategies for product design (p. 221). Chichester: John Wiley & Sons. <https://www.scribd.com/presentation/249436520/Engineering-Design-Methods-ppt>
- [11] Autodesk. (2023). Fusion 360. Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>
- [12] Blender Foundation. (2023). Blender: Open source 3D creation suite. <https://www.blender.org>
- [13] Basso, M., Stocchero, D., Henriques, R., Vian, A., Bredemeier, C., Konzen, A., & Freitas, E. (2019). Proposal for an embedded system architecture using a GNDVI algorithm to support UAV-based agrochemical spraying. Sensors (Basel, Switzerland), 19. <https://doi.org/10.3390/s19245397>
- [14] National Marine Electronics Association. (2019). NMEA 0183 interface standard. Severna Park, MD: NMEA. https://www.nmea.org/content/STANDARDS/NMEA_0183/NMEA_0183.aspx
- [15] Irshad, R., Yousuf, M., & Ikram, M. (2025). Role of Trichogramma in biological control of pests in India: A concise review. Journal of Biological Control. <https://doi.org/10.18311/jbc/2025/45962>

А. М. Рысбекова*, З. Б. Бекназарова,

Р. Р. Фазылбеков, М. Д. Болтаев, А. П. Никоноров

Ж. Жиёмбаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ғылыми-зерттеу институты, Алматы қ., АЗ0М0Н6, Қазақстан, rysbekova949r@gmail.com, maliktaishikov777@gmail.com, fazylbekov@gmail.com, aniko.inbox@gmail.com, zibash_bek@mail.ru, boltayevmarat81@gmail.com

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТЫН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ЭНТОМОФАГТАРДЫ КАПСУЛА ТҮРІНДЕ ЕНГІЗУ: ӨСІМДІКТЕРДІ БИОЛОГИЯЛЫҚ ҚОРҒАУ ТӘСІЛІ

Аңдатпа

Қазіргі ауыл шаруашылығы химиялық пестицидтерді қолдануды азайтуға бағытталған орнықты технологияларға көшіп жатыр. Энтомофагтарды қолдануға негізделген биологиялық бақылау – экологиялық жағынан қауіпсіз балама болып табылады, алайда оны кең ауқымда енгізу қолмен таратудың еңбекқорлығымен және кейбір егіс алқаптарының қолжетімсіздігімен шектеледі. Бұл жұмыста энтомофагтарды биоыдырайтын PLA-капсулалар арқылы дәл таратуды қамтамасыз ететін BioDrop атты аппараттық-бағдарламалық кешені ұсынылды. Ол — ұшқышсыз ұшу аппараттарына (ҰҰА) арналған аспалы құрылғы. Жобада жедел прототиптеу әдістемесі (3D-модельдеу, FDM-баспа), Raspberry Pi → ESP32 базасындағы басқару архитектурасы, GPS/ГЛОНАСС навигациясы және Android-қосымшасы сипатталған. Лабораториялық және далалық сынақтар жүргізілді. Нәтижесінде +30 °C температурада 6 сағат ішінде *Trichogramma* spp. имаголарының 100 % шығыны және 3 м биіктікте 8 м/с жел кезінде капсулаларды тарату дәлдігінің 1 м-ден аспайтыны анықталды. Капсуланың өзіндік құны – 36 теңге/дана. Зерттеу нәтижелері энтомофагтарды автоматтандырылған жағдайда тарату технологиясының далалық жағдайларда тиімді екенін растады.

Осылайша, BioDrop аппараттық-бағдарламалық кешені энтомофагтарды автоматты түрде тарату үшін жоғары тиімділігі мен практикалық маңыздылығын көрсетті. PLA-капсулаларды пайдалану, дәл навигация және құрылғының әртүрлі ауа райы жағдайларындағы тұрақты жұмысы бұл технологияны өсімдіктерді қорғаудың химиялық әдістеріне орнықты әрі экономикалық жағынан тиімді балама ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. *Trichogramma* spp. имаголарының 100 % шығыны, капсулаларды тарату дәлдігінің

төмен болуы және капсуланың өзіндік құнының аздығы – осы технологияны биологиялық егіншілік жүйелеріне кеңінен енгізуге болатындығын дәлелдейді.

Кілт сөздер: энтомофагтар, өсімдіктерді биологиялық қорғау, ұшқышсыз ұшу аппараттары, PLA-капсулалар, дәлдікті енгізу, аппараттық-бағдарламалық кешен, биологиялық бақылау, құрылғы, бағдарламалық қамтамасыз ету, BioDrop

**A.M.Rysbekova*, Z.B.Beknazarova,
R.R.Fazylbekov, M.D.Boltayev, A.P.Nikonorov**

Kazakh Research Institute of Plant Protection and Quarantine named after Zh. Zhiembayev,
Almaty A30M0H6, Kazakhstan, rysbekova949r@gmail.com, maliktaishikov777@gmail.com,
fazylbekov@gmail.com, aniko.inbox@gmail.com, zibash_bek@mail.ru,
boltayevmarat81@gmail.com

CAPSULE-BASED APPLICATION OF ENTOMOPHAGES USING UAVS: AN APPROACH TO BIOLOGICAL PLANT PROTECTION

Abstract

Modern agriculture is undergoing a transition toward sustainable technologies, which involve reducing the use of chemical pesticides. Biological control using entomophages offers an eco-friendly alternative; however, its widespread implementation is limited by the labor intensity of manual distribution and the inaccessibility of certain agricultural areas. This paper presents the development of the BioDrop hardware–software system—an attachable device for unmanned aerial vehicles (UAVs) that enables precise distribution of entomophages in biodegradable PLA capsules. The methodology of rapid prototyping (3D modeling, FDM printing), control system architecture based on Raspberry Pi → ESP32 with GPS/GLONASS navigation and an Android application, as well as laboratory and field tests, are described. A 100% emergence rate of *Trichogramma* spp. imagos was achieved at +30 °C within 6 hours, with a capsule drop deviation of less than 1 m in wind conditions up to 8 m/s at a height of 3 m. The production cost of one capsule was 36 KZT. The results confirm the effectiveness of automated entomophage distribution under field conditions.

Thus, the developed BioDrop hardware–software system has demonstrated high efficiency and practical applicability for automated entomophage deployment in agricultural fields. The use of PLA capsules, accurate navigation, and stable device performance under varying weather conditions confirm its potential as a sustainable and economically viable alternative to chemical plant protection methods. The obtained results—100% emergence rate of *Trichogramma* spp., minimal drop deviation, and low capsule cost—highlight the promise of this technology for large-scale integration into biological farming systems.

Keywords: entomophages, biological plant protection, unmanned aerial vehicles, PLA capsules, precision application, hardware–software system, biological control, device, software, BioDrop

Вклад авторов: А. М. Рысбекова: Концептуализация, методология, написание – первоначальный проект, редактирование. З. Б. Бекназарова: Руководство проектом, энтомологические исследования, курирование данных. Р. Р. Фазылбеков: Программное обеспечение, обработка и визуализация данных, участие в редактировании текста. М. Д. Болтаев: Полевые исследования, сбор и систематизация данных. А. П. Никоноров: Программное обеспечение, интеграция с БПЛА, визуализация. Все авторы участвовали в обсуждении результатов и одобрили окончательный вариант рукописи.