

**АЛГОРИТМ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ GERT-
СЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ВНЕСЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ И УДОБРЕНИЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА**
<https://doi.org/10.5281/zenodo.18334443>

Маматов Н.С., Мухамедиева Д.Т., Ковалев Д.И.

Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров
ирригации и механизации сельского хозяйства»

Аннотация. В статье рассматривается алгоритм моделирования технологического процесса точного внесения пестицидов и удобрений с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на основе GERT-сетевого подхода. Предложенная модель учитывает все стадии — от сбора данных и мониторинга до анализа информации и последующего дифференцированного внесения препаратов. GERT-сеть позволяет описывать вероятностную структуру технологических операций, включая циклы и альтернативные сценарии. Представлен алгоритм, отражающий взаимодействие между дронами, наземными станциями, спутниковыми системами и сенсорами. Проведён вычислительный эксперимент, подтверждающий работоспособность модели и её применимость для автоматизации управления агротехнологическим процессом. Полученные результаты способствуют повышению точности и эффективности использования ресурсов в системах точного земледелия.

Ключевые слова: точное земледелие, GERT-сети, БПЛА, дифференцированное внесение, агроценоз, моделирование, пестициды, удобрения, алгоритм, автоматизация агротехнологий

1. Введение. Современное сельское хозяйство всё активнее интегрирует цифровые технологии, направленные на повышение эффективности, устойчивости и рентабельности агропроизводства. Одним из ключевых направлений в этом процессе становится точное земледелие — подход, основанный на использовании данных, сенсорных систем и автоматизированных механизмов для локализованного управления агротехнологическими операциями. В этом контексте особую актуальность приобретает применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), способных выполнять мониторинг состояния посевов, почвы, а также осуществлять точечное внесение удобрений и пестицидов. Использование БПЛА позволяет значительно повысить точность обработки полей, сократить издержки и минимизировать вредное воздействие на окружающую среду за счёт дифференцированного подхода к агротехническим мероприятиям.

Однако эффективное управление таким технологическим процессом требует чёткого алгоритмического описания всех этапов, включая их вероятностные характеристики и возможные ответвления в процессе выполнения операций [1-3].

В данной работе в качестве методологической основы предлагается использовать GERT-сетевое моделирование (Graphical Evaluation and Review Technique) — подход, позволяющий описывать сложные процессы с учётом случайных факторов, повторяющихся операций и логических развилок. Такой подход даёт возможность построить реалистичную и гибкую модель технологического процесса внесения удобрений и пестицидов с использованием БПЛА. Целью настоящего исследования является разработка алгоритма и реализация вычислительного эксперимента GERT-модели, описывающей весь цикл дифференцированного внесения, начиная с мониторинга и заканчивая точным распылением препаратов. Также рассматриваются вопросы взаимодействия различных технических компонентов системы — сенсоров, спутниковых данных, наземных станций и самих дронов [4,5].

В работе [6] представлен материал по использованию беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. Показано, что для различных направлений точного земледелия использование дронов решает совокупность задач, среди которых авторы выделяют: инвентаризацию сельхозугодий, создание электронных карт полей, оценку объема работ и контроля их выполнения, оперативный мониторинг состояния посевов, оценку всхожести сельскохозяйственных культур, охрану сельхозугодий, обработку посевов пестицидами для борьбы с вредными насекомыми и вредителями. Отмечено, что в ближайшее время беспилотная авиатехника, активно проникая во все сферы жизнедеятельности человека, в том числе и в сельское хозяйство, значительно увеличивают производительность труда на фоне снижения издержек производства [7].

Интерес для точного земледелия представляет модель роевой обработки полей, когда рой дронов с распылителями используется для внесения удобрений или обработки посевов пестицидами [8-11].

В работе [8] авторы отмечают, что такая система сталкивается с важной проблемой, заключающейся в расчете множества оптимальных траекторий для каждого дрона-распылителя. Решение этой проблемы позволило бы управлять многими дронами в автономном режиме. Это позволяет экономить заряд батареи между подзарядками и выполнять несколько задач одновременно. Данная проблема решалась авторами экспериментально. Ряд экспериментов по управлению БПЛА позволил сделать рекомендации по организации общего управления роем БПЛА, так как в отличие от индивидуального управления, в этом случае сокращается время полета. Это обеспечивает оптимизацию общего транспортно-технологического цикла [9], однако задачи производительности БПЛА в этой работе не исследовались.

В работе [10] рассмотрено моделирование и симуляция совместного планирования и восприятия распределенного роя БПЛА. Отмечается

сложность проектирования и тестирования таких систем из-за неопределенности датчиков и возникновения неопределенности в общении и восприятии при применении распределенного коллективного роя.

Существует множество вариантов использования дронов в точном земледелии, ведь БПЛА способны выполнять несколько разнообразных функций: от регулярной и детализированной аэрофотосъемки до тщательного распыления химических препаратов. Дроны — это полезный инструмент, прежде всего, для картографирования и визуализации, ведь они обеспечивают более высокую точность по сравнению с другими потенциальными технологиями для этой работы, например, спутниковыми изображениями. Снимок со спутника, независимо от качества камеры, все равно поступает с орбиты. Дрон способен пролетать непосредственно над полями, поэтому обеспечивает гораздо большее разрешение изображения. Кроме того, изображения со спутников могут быть устаревшим, а дрон предоставляет актуальную информацию в режиме реального времени, что позволяет правильно определять, какие удобрения и пестициды необходимы в данный момент. Дроны, оснащенные современными датчиками, помогают получить многоспектральные изображения с более подробной информацией о состоянии конкретной культуры. Таким образом можно получить больше важных данных, по сравнению со снимками со стандартной камеры, в том числе в ближнем инфракрасном диапазоне. Это обеспечивает возможность фермерам создавать более информативные карты засухи и уделять должное внимание урожаю.

Мультиспектральные карты — это далеко не единственный вид аэрофотоснимков, которые можно делать с помощью дрона. Стандартные карты, выполненные в красно-зелено-синем (RGB) формате, могут показать фермерам, как растут те или иные растения. Для точного земледелия важно, чтобы эти фотографии были получены с дронов, а не спутников. Большое разрешение дает более точную и детализированную картину состояния посевов, что позволяет использовать индивидуализированные стратегии точного земледелия. Дроны могут не только быть «глазами» для фермеров, но они также способны принимать непосредственное участие в точном земледелии. Возможность следовать карте полета позволяет дрону также выполнять функции посева или опрыскивания. Некоторые универсальные платформы могут выполнять несколько функций одновременно: вносить посевной материал, повторно засеивать отдельные территории или распылять средства защиты растений на точно выбранных участках.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для точного земледелия, в частности, для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений связывает эти компоненты с технологическими параметрами. БПЛА используется для мультиспектрального мониторинга сельскохозяйственных полей и тестовых площадок, а также для передачи данных в базу данных. Данные с БПЛА комбинируются с результатами лабораторных анализов для калибровки и создания карт агрохимического состояния поля. Представлено уравнение, которое включает массу

конструкции, силовой установки, бортового оборудования, топлива и полезной нагрузки, а также технологические параметры дифференцированного внесения жидких средств. Уравнение позволяет более точно определять взлетную массу БПЛА с учетом всех составляющих и параметров полета.

2. Методы. Технологический процесс дифференцированного внесения пестицидов и удобрений включает в себя мониторинг, анализ и передачу данных, а также управление процессом внесения через БПЛА. Вся информация передается в компьютерные блоки анализа и обработки, что позволяет управлять обработкой сельскохозяйственных полей. Для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений предпочтительны БПЛА многоразового использования, без аэродромного базирования, с вертикальным взлетом и посадкой, с автопилотом и системой распределения жидкостей по программе. Установлено, что для точного земледелия необходимо иметь систему, которая будет включать БПЛА для мониторинга, получения и анализа данных, а также для дифференцированного внесения удобрений и пестицидов. Для описания технологического процесса внесения пестицидов и удобрений используется GERT-сетевые модели, которые учитывают все взаимосвязанные операции, от мониторинга и зондирования до внесения удобрений. Для реализации технологии дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с использованием БПЛА, согласно описанию блок-схемы, нам нужно построить программу, которая будет следовать логике работы всех элементов системы, взаимодействуя с БПЛА, различными датчиками, спутниками и наземными системами.

Алгоритм может включать следующие этапы:

Шаг 1. Сбор данных с сельскохозяйственного поля.

Шаг 2. Зондирование и мониторинг почвы с использованием БПЛА (сельскохозяйственного дрона).

Шаг 3. Сбор данных о состоянии агроценозов (поля).

Шаг 4. Обработка и анализ данных.

Шаг 5. Определение потребностей в удобрениях и пестицидах для каждого участка поля.

Шаг 6. Доставка нужных препаратов с использованием второго БПЛА для внесения удобрений и пестицидов.

Шаг 7. Согласование с координатами наземной опорной станции DGPS для точности внесения.

Псевдокод программы

ПРОЦЕДУРА Main()

// Инициализация беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)

СОЗДАТЬ UAV_monitoring(тип = 1, вместимость = 0)

СОЗДАТЬ UAV_application(тип = 2, вместимость = 100)

// Инициализация наземной станции и спутников

СОЗДАТЬ GroundStation()

СОЗДАТЬ Satellite_1(ID = 1)

СОЗДАТЬ Satellite_2(ID = 2)

```
// Определение участков поля
field_sections ← СОЗДАТЬ СПИСОК ["участок_1", "участок_2",
"участок_3", "участок_4", "участок_5"]
```

```
// Инициализация блока анализа данных
СОЗДАТЬ DataAnalysisUnit()
```

```
// Сбор данных о состоянии поля
field_data ← DataAnalysisUnit.collect_field_data(field_sections)
```

```
// Анализ данных и принятие решений по обработке
decisions ← DataAnalysisUnit.analyze_field_data(field_data)
```

```
// Перемещение и выполнение задач БПЛА
uav_positions ← СОЗДАТЬ ПУСТОЙ СПИСОК
ДЛЯ каждого section В decisions
```

```
    ЕСЛИ decisions[section] == TRUE ТО
```

```
        // БПЛА для мониторинга перемещается к участку
```

```
        x ← СЛУЧАЙНОЕ_ЧИСЛО(1, 10)
```

```
        y ← СЛУЧАЙНОЕ_ЧИСЛО(1, 10)
```

```
        UAV_monitoring.move_to_position(x, y)
```

```
        ДОБАВИТЬ (x, y) В uav_positions
```

```
    // Сбор данных о почве
```

```
    condition ← UAV_monitoring.collect_data()
```

```
    // Передача данных на наземную станцию
```

```
    GroundStation.receive_data(condition)
```

```
    // Анализ данных на наземной станции
```

```
    ЕСЛИ GroundStation.analyze_data(condition) == TRUE ТО
```

```
        // БПЛА для внесения перемещается и применяет вещество
```

```
        x ← СЛУЧАЙНОЕ_ЧИСЛО(1, 10)
```

```
        y ← СЛУЧАЙНОЕ_ЧИСЛО(1, 10)
```

```
        UAV_application.move_to_position(x, y)
```

```
        UAV_application.apply_substance("удобрения/пестициды")
```

```
    КОНЕЦ ЕСЛИ
```

```
ИНАЧЕ
```

```
    ВЫВЕСТИ "Участок", section, "не требует обработки."
```

```
    КОНЕЦ ЕСЛИ
```

```
КОНЕЦ ДЛЯ
```

```
// Визуализация состояния поля и траектории движения БПЛА
```

```
ЕСЛИ uav_positions НЕ ПУСТ ТО
```

```

    last_position ← ПОСЛЕДНИЙ_ЭЛЕМЕНТ(uav_positions)
ИНАЧЕ
    last_position ← (0, 0)
КОНЕЦ ЕСЛИ
    plot_field_and_uav(field_data, last_position)
КОНЕЦ ПРОЦЕДУРЫ

// Процедура для моделирования состояния поля и отображения БПЛА
ПРОЦЕДУРА plot_field_and_uav(field_data, uav_position)
    ОПРЕДЕЛИТЬ field_size ← (10, 10)
    СОЗДАТЬ графическое окно (X: 0 до field_size[0], Y: 0 до field_size[1])

    // Отображение состояния поля
    ДЛЯ каждого section, condition В field_data
        x ← СЛУЧАЙНОЕ_ЧИСЛО(1, 10)
        y ← СЛУЧАЙНОЕ_ЧИСЛО(1, 10)
        color ← ЕСЛИ condition == "хорошее" ТО "green" ИНАЧЕ ЕСЛИ
condition == "среднее" ТО "yellow" ИНАЧЕ "red"
        ОТОБРАЗИТЬ ТОЧКУ (x, y) цветом color
    КОНЕЦ ДЛЯ
    // Отображение позиции БПЛА
    uav_x ← uav_position[0]
    uav_y ← uav_position[1]
    ОТОБРАЗИТЬ БПЛА в точке (uav_x, uav_y) цветом "blue" и маркером "*"
    ПОДПИСЬ ГРАФИКА ("Состояние поля и позиция БПЛА")
    ВЫВЕСТИ ГРАФИК
КОНЕЦ ПРОЦЕДУРЫ

// Входная точка программы
ЕСЛИ __name__ == "__main__" ТО
    Main()
КОНЕЦ ЕСЛИ

```

3. Результат. Процесс работы программы состоит из следующих этапов. Первый БПЛА (для мониторинга состояния почвы) перемещается на поле, собирает данные о состоянии почвы и передает их на наземную станцию для анализа. Наземная станция анализирует полученные данные о почве и определяет, нужно ли вносить удобрения или пестициды (по состоянию почвы: хорошее, плохое или среднее). Второй БПЛА (для внесения веществ) загружается необходимым количеством удобрений или пестицидов и перемещается на нужные участки для их внесения в соответствии с анализом состояния поля. Сначала первый БПЛА (тип 3 — для мониторинга) перемещается на участок поля и собирает данные о состоянии почвы (случайно выбирается одно из состояний: "плохое", "хорошее" или "среднее"). Затем данные передаются в блок анализа, который обрабатывает полученную информацию. Если состояние почвы плохое или среднее, будет принято решение о внесении удобрений или пестицидов. Второй БПЛА (тип 4 — для

внесения удобрений) загружается нужными веществами, перемещается на тот же участок и вносит препараты. Этот процесс повторяется для всех нуждающихся в обработке участков поля.

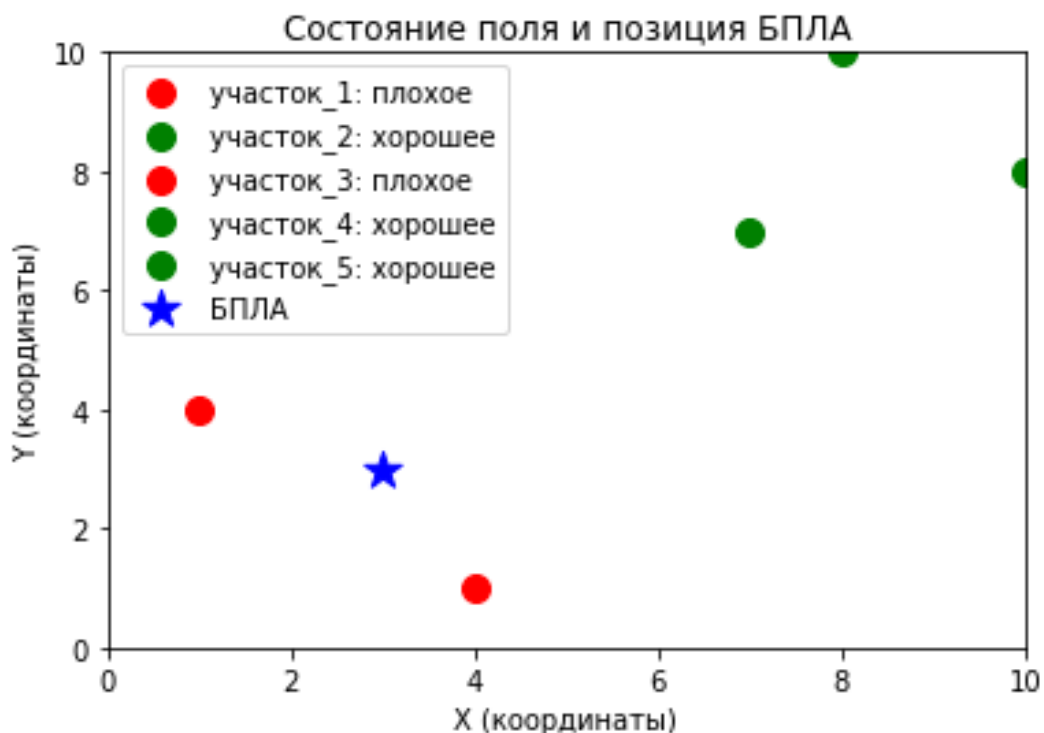
Программа моделирует технологию использования БПЛА для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с учетом состояния почвы на различных участках поля. Ожидаемый результат — точное и эффективное применение удобрений и пестицидов в зависимости от состояния почвы, что способствует улучшению агрономических процессов и оптимизации использования химических веществ. БПЛА для мониторинга собирает данные о состоянии почвы. Данные передаются на наземную станцию для анализа. В зависимости от анализа, принимается решение о внесении удобрений/пестицидов. БПЛА для внесения перемещается на нужный участок и применяет вещества. Поле отображается с помощью scatter, где каждый участок имеет цвет в зависимости от состояния почвы:

Зеленый: Хорошее состояние.

Желтый: Среднее состояние.

Красный: Плохое состояние.

Позиция БПЛА отображается синим маркером в виде звезды. Можно визуализировать текущие координаты БПЛА и состояние поля.



БПЛА перемещается в точку (4, 6).

Состояние почвы: плохое.

Данные получены на наземной станции: плохое.

БПЛА перемещается в точку (9, 4).

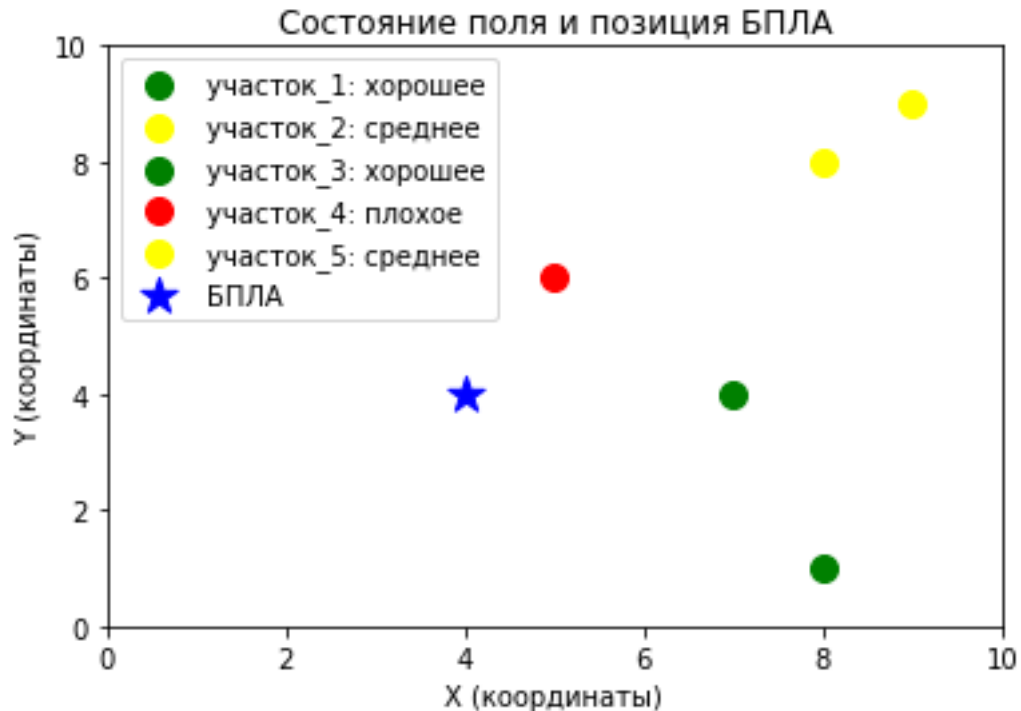
Применение удобрения/пестициды на поле с координатами (9, 4).

Участок участок_2 не требует обработки..

БПЛА перемещается в точку (3, 3).

Состояние почвы: плохое.

Данные получены на наземной станции: плохое.



Участок участок_1 не требует обработки.

БПЛА перемещается в точку (4, 2).

Состояние почвы: хорошее.

Данные получены на наземной станции: хорошее.

Участок участок_3 не требует обработки.

БПЛА перемещается в точку (9, 3).

Состояние почвы: среднее.

Данные получены на наземной станции: среднее.

БПЛА перемещается в точку (3, 2).

Применение удобрения/пестициды на поле с координатами (3, 2).

БПЛА перемещается в точку (4, 4).

Состояние почвы: хорошее.

Данные получены на наземной станции: хорошее.

Программа моделирует систему управления сельскохозяйственными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

4.Заключение. В данной работе представлен алгоритм GERT-сетевого моделирования технологического процесса дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Разработанная модель позволила формализовать логические связи между этапами агропроизводственной цепочки, учесть вероятностный характер выполнения операций и определить временные характеристики всего цикла. Благодаря использованию GERT-сети была достигнута высокая гибкость описания технологического процесса, включая возможность моделирования повторных действий, отказов и альтернативных траекторий. Алгоритм позволил не только проанализировать эффективность

существующего технологического решения, но и выявить потенциальные узкие места, влияющие на общее время выполнения миссии и расход ресурсов.

Результаты вычислительного эксперимента подтвердили применимость предложенного подхода для адаптивного управления процессами точного земледелия, особенно в условиях динамически изменяющихся параметров окружающей среды. Применение GERT-моделей совместно с БПЛА открывает перспективы для дальнейшего автоматизированного планирования сельскохозяйственных операций и интеграции интеллектуальных систем управления. В дальнейшем планируется расширение модели за счёт включения экономических показателей, а также разработка программной платформы для визуализации и оптимизации GERT-сетей в реальном времени при управлении флотом БПЛА.

Использованная литература

1. Мохаммад Н., Воронова Л.И., Воронов В.И. Разработка имитационной модели использования роя беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве. Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022; 14(3): 55-61.
2. Хорт Д.О., Личман Г.И., Филиппов Р.А., Беленков А.И. Применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) в точном земледелии. Фермер. Поволжье. 2016; 7: 34-37.
3. Смирнов И.Г., Марченко Л.А., Личман Г.И., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017; 3: 10-16. DOI:10.22314/2073-7599-2017-3-10-16
4. Марченко Л.А., Артюшин А.А., Смирнов И.Г., Мочкова Т.В., Спиридонов А.Ю., Курбанов Р.К. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019;13(5):38-45. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-5-38-45>
5. Кайсина И.А.. "МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ БПЛА ПРИ МУЛЬТИПОТОКОВОЙ ПЕРЕДАЧЕ" Труды учебных заведений связи, vol. 6, no. 1, 2020, pp. 100-108.
6. Дорохов Алексей Семенович, Старостин Иван Александрович, Ещин Александр Вадимович, and Курбанов Рашид Курбанович. "ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ" Агроинженерия, vol. 24, no. 3, 2022, pp. 12-18.
7. Спиридонов, А. Ю. Обоснование параметров беспилотного летательного аппарата для дифференцированного внесения трихограммы / А. Ю. Спиридонов, Р. К. Курбанов // Вестник ВИЭСХ. – 2018. – № 4(33). – С. 101-106. – EDN YTHPFR.
8. Cao, G., Zhang, Q., Chen, C., Zhang, M., Zhang, J., Huang, Y. (2019). Scheduling model of UAV plant protection team based on multi-objective

optimization. *Trans. Chin. Soc Agric. Mach.* 50 (11), 92–101. doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.010

9. Carlton, J. B. (1999). Technique to reduce chemical usage and concomitant drift from aerial sprays: U. s. *Patent* 5, 975, 425, pp 08–15.

10. Chen, S., Lan, Y., Bradley, K. F., Jiyu, L. I., Aimin, L. I. U., Yuedong, M. A. O. (2017a). Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV. *Trans. Chin. Soc Agric. Mach.* 48 (8), 105–113. doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011

11. Chen, S., Lan, Y., Li, J., Xu, X., Wang, Z., Peng, B. (2017b). Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection UAV. *Trans. Chin. Soc Agric. Eng.* 33 (7), 82–0. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.011

12. C. W. Ahn and R. S. Ramakrishna, "A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, pp. 566–579, 2002.