



АЛГОРИТМ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ GERT-СЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВНЕСЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ И УДОБРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18334388>

Маматов Нарзулло Солиджонович^{1,2}, Мухамедиева Дилноз

Тулкуновна^{1,2}, Ковалев Дмитрий Игоревич¹

¹Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»

²Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

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

ALGORITHM AND COMPUTATIONAL EXPERIMENT OF GERT-NETWORK MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF APPLYING PESTICIDES AND FERTILIZERS USING UAV-SPRAYER

Mamatov Narzullo Solidjonovich^{1,2}, Mukhamedieva Dilnoz Tulkunovna^{1,2},

Kovalev Dmitriy Igorevich¹

¹«Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers» National Research University

²Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi

Abstract. The article considers an algorithm for modeling the technological process of precision application of pesticides and fertilizers using unmanned aerial vehicles (UAVs) based on the GERT network approach. The proposed model takes into account all stages - from data collection and monitoring to information analysis and subsequent differentiated application of preparations. The GERT network allows describing the probabilistic structure of technological operations, including cycles and alternative scenarios. An algorithm is presented that reflects the interaction between drones, ground stations, satellite systems and sensors. A computational experiment was conducted confirming the operability of the model and its applicability for automation of the agro-technological process control. The obtained results contribute to increasing the accuracy and efficiency of resource use in precision farming systems.

Keywords: precision farming, GERT networks, UAV, differentiated application, agroecology, modeling, pesticides, fertilizers, algorithm, automation of agricultural technologies

PESTITSID VA O'GITLARNI BERISH TEXNOLOGIK JARAYONLARNI GERT-TARMOQ MODELLARI ASOSIDA UCHUVCHISIZ UCHISH QURILMA YORDAMIDA AMALGA OSHIRISH ALGORITHMI VA HISOBLASH TAJRIBASI

Mamatov Narzullo Solijonovich^{1,2}, Muxamedieva Dilnoz Tulkunovna^{1,2},

Kovalev Dmitriy Igorevich¹

¹“Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti”
Milliy tadqiqot universiteti

²Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti

Annotatsiya. Ushbu maqolada GERT tarmoq yondashuvi asosida uchuvchisiz uchish apparatlari (UUA) yordamida pestitsidlar va o‘g‘itlarni aniq qo‘llashning texnologik jarayonini modellashtirish algoritmi ko‘rib chiqilgan. Taklif etilgan model barcha bosqichlarni — ma’lumotlarni to‘plash va monitoring qilishdan tortib, axborotni tahlil qilish va undan keyingi tayyorgarlik hamda tabaqalashtirilgan qo‘llashgacha bo‘lgan jarayonlarni hisobga oladi. GERT tarmog‘i texnologik operatsiyalarning ehtimoliy tuzilishini, jumladan, sikllar va muqobil stsenariylarni tavsiflash imkonini beradi. Shuningdek, sizda dronlar, yer osti stansiyalari, sun‘iy yo‘ldosh tizimlari va sensorlar o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirni aks ettiruvchi algoritm taqdim etilgan. Modelning ishlashini hamda agrotehnologik jarayonlarni boshqarishni avtomatlashtirishda qo‘llanilishini tasdiqlovchi hisoblash tajribasi o‘tkazilgan. Olingan natijalar aniq dehqonchilik tizimlarida resurslardan foydalanishning aniqligi va samaradorligini oshirishga yordam beradi.

Kalit so‘zlar: aniq dehqonchilik, GERT tarmoqlari, UUA, tabaqalashtirilgan qo‘llash, agrosenoz, modellashtirish, pestitsidlar, o‘g‘itlar, algoritmi, qishloq xo‘jaligi texnologiyalarini avtomatlashtirish.

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 многократного 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.

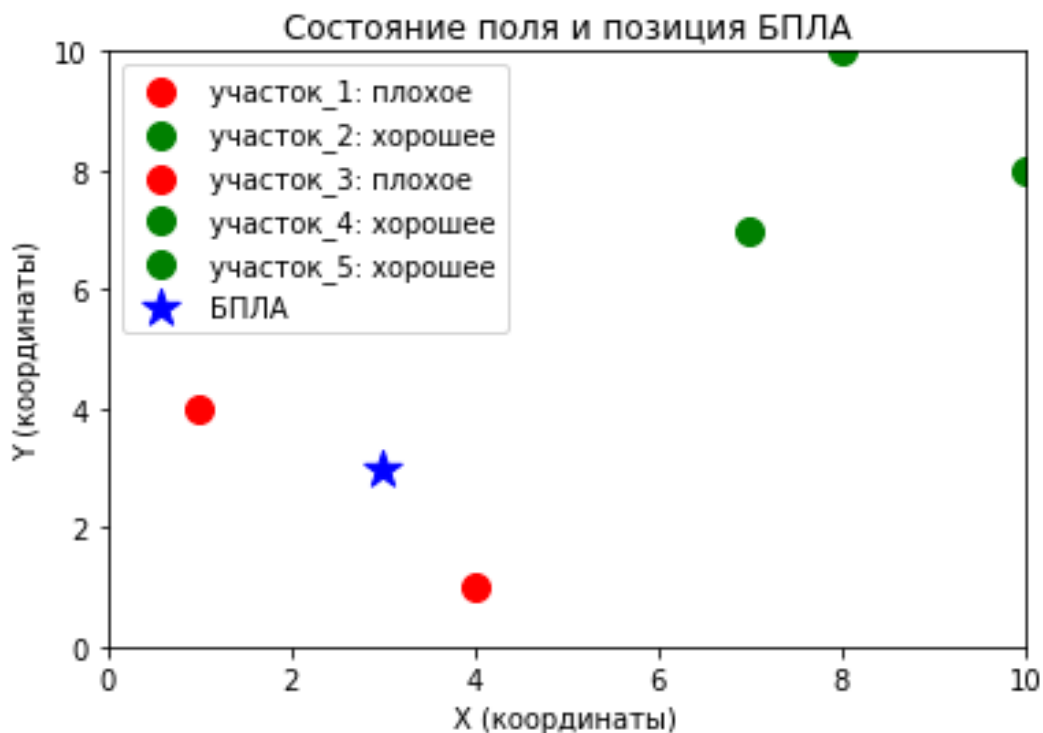
Программа моделирует технологию использования БПЛА для дифференцированного внесения пестицидов и удобрений с учетом состояния почвы на различных участках поля. Ожидаемый результат — точное и эффективное применение удобрений и пестицидов в зависимости от состояния почвы, что способствует улучшению агрономических 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).

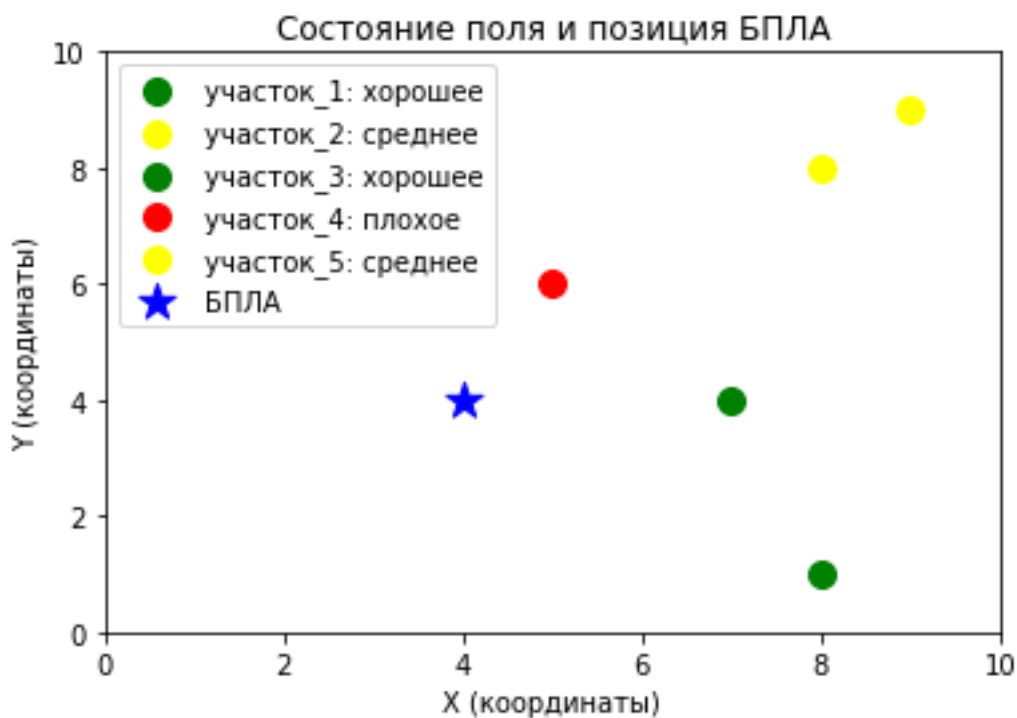
Применение удобрения/пестициды на поле с координатами (9, 4).

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.