

и электробезопасности благодаря интеллектуальным алгоритмам защиты, а также открытость и легкая интеграция в существующие или проектируемые системы АСУ ТП. Предложенная архитектура обладает высокой степенью масштабируемости и может быть адаптирована для объектов с большим количеством учетных точек или другими специфическими требованиями.

#### Список использованных источников

1. МЭК 61131-3:2013 Программируемые контроллеры - Часть 3: Языки программирования (IEC 61131-3:2013, «Programmable controllers – Part 3: Programming languages», IET)
2. OWEN. CODESYS 3.5 FAQ – Руководство пользователя версия 2.4 [Электронный ресурс]. – URL: [https://ftp.owen.ru/CoDeSys3/11\\_Documentation/03\\_3.5.11.5/CDSv3.5\\_Faq\\_v.2.4.pdf](https://ftp.owen.ru/CoDeSys3/11_Documentation/03_3.5.11.5/CDSv3.5_Faq_v.2.4.pdf) (дата обращения 18.04.2026).
3. W. Bolton, Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering (Paperback). - London: 2003, 592p.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025684583 РФ. Программа для оптимизации информационных потоков в системах управления: опубл. 16.09.2025 / В. Д. Павлидис, М. В. Чкалова, Е. В. Яковлева, А. С. Иноземцев.

**УДК 004.94**

**В.Д. Павлидис**, канд. физ.-мат. наук, профессор

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный аграрный университет», г. Оренбург  
e-mail: pavlidis@mail.ru*

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТОВ БПЛА ДЛЯ МНОГОЗОНАЛЬНОЙ АЭРОСЪЕМКИ СЕЛЬХОЗУГОДИЙ

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты (БПЛА), планирование маршрута, многозональная аэросъемка, адаптивный алгоритм, региональный мониторинг

**Key words:** unmanned aerial vehicles (UAVs), route planning, multi-zone aerial photography, adaptive algorithm, regional monitoring

**Аннотация:** Статья посвящена решению актуальной задачи адаптивного планирования полетов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для проведения многозональной аэросъемки сельхозугодий. Целью исследования является разработка и верификация интеллектуального алгоритма, обеспечивающего максимальное качество данных съемки в условиях переменных атмосферных явлений и разнообразного рельефа Оренбург-

ской области. Разработанный алгоритм позволяет находить субоптимальный маршрут, минимизирующий время и энергозатраты при полном покрытии заданной площади и предназначен для внедрения в системы автоматизированного планирования аэросъемочных работ в сельском хозяйстве и экологическом мониторинге.

**Summary:** The article is devoted to solving the urgent problem of adaptive flight planning of unmanned aerial vehicles (UAVs) for multi-zone aerial surveys of farmlands. The aim of the research is to develop and verify an intelligent algorithm that ensures maximum quality of survey data in conditions of variable atmospheric phenomena and diverse terrain of the Orenburg region. The developed algorithm makes it possible to find a suboptimal route that minimizes time and energy consumption while fully covering a given area and is intended for implementation in automated planning systems for aerial surveys in agriculture and environmental monitoring.

**Введение.** Современные системы планирования полетов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) сталкиваются с серьезным вызовом при проведении многозональной аэросъемки сельхозугодий в условиях переменных атмосферных явлений. Особую актуальность эта проблема приобретает в ветреных регионах с разнообразным рельефом.

Целью исследования является разработка и верификация интеллектуального алгоритма адаптивного планирования маршрутов и профилей полета БПЛА для многозональной аэросъемки, обеспечивающего максимальное качество данных в условиях переменных атмосферных явлений и сложного рельефа Оренбургской области.

В задачи исследования входит: разработка математической модели, интегрирующей прогноз ветра, цифровой модели рельефа и положения солнца для расчета оптимальных параметров полета, формирование практических рекомендаций по зонированию территории Оренбургской области по сложности ветрового режима для применения БПЛА различных классов.

**Материалы и методы исследования.** Современные системы планирования полетов БПЛА в основном используют статические алгоритмы, не учитывающие динамические изменения окружающей среды. Однако их применение для адаптивного планирования полетов БПЛА в условиях изменчивой атмосферы не эффективно [1, 2,3]. В контексте настоящего исследования особый интерес представляют метаэвристические методы, способные работать с многокритериальными задачами оптимизации.

В основе исследования лежит комплексный подход, сочетающий: математическое моделирование влияния атмосферных процессов на полет БПЛА; геоинформационное моделирование для учета рельефа местности; метаэвристические алгоритмы (ACO - ACO (Ant Colony Optimization)); инженерные расчеты энергобаланса и летно-технических характеристик БПЛА.

Исходные данные включают: открытые данные метеослужб (скорость и направление ветра, инсоляция); цифровые модели рельефа территории Оренбургской области; летно-технические характеристики БПЛА (аэродинамические коэффициенты, энергоемкость АКБ, параметры съемочной аппаратуры).

**Результаты и обсуждение.** Расчет угла солнца осуществлялся с использованием библиотеки `pysolar` в Python [3,4,5]. Это позволило определить азимут и высоту солнца для заданных координат и времени суток, что критически важно для минимизации бликов и обеспечения согласованности данных многозональной съемки. Для территории Оренбургской области было установлено, что оптимальное время для аэросъемки – с 10:00 до 14:00 по местному времени, когда высота солнца превышает 30 градусов [5].

Ветровая нагрузка рассчитывалась с помощью библиотек `pymru` и `scipy`. На основе данных API `OpenWeatherMap` решались уравнения баланса мощностей БПЛА. Для анализа влияния ветровых условий на энергопотребление был разработан специализированный алгоритм, который оценивает дополнительные энергозатраты при полете против ветра различной интенсивности. Результаты визуализированы на рисунке 1 [6,7].

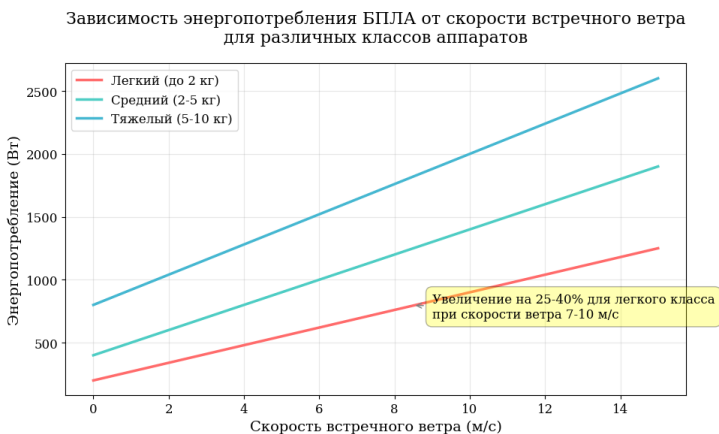


Рисунок 1. Зависимость энергопотребления БПЛА от скорости встречного ветра для различных классов аппаратов

Анализ результатов, представленных на рисунке 1, показывает, что даже умеренный ветер скоростью 7-10 м/с может увеличить энергопотребление БПЛА легкого класса на 25-40% при полете против ветра. Это подтверждает необходимость учета ветровых условий при планировании маршрутов и расчете необходимого энергозапаса.

В качестве целевой функции при оптимизации маршрута использовалась взвешенная сумма трех критериев: время полета, энергопотребление и покрытие площади [5,6,7]. Процесс оптимизации маршрута и результат визуализированы на рисунке 2.

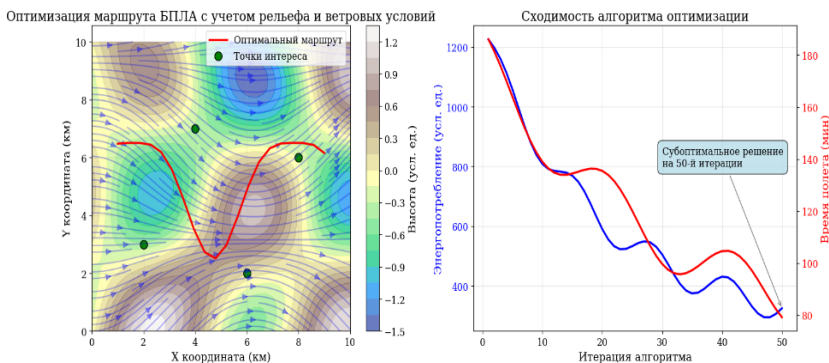


Рисунок 2. Визуализация процесса оптимизации маршрута БПЛА с учетом рельефа и ветровых условий

Алгоритм показал сходимость к субоптимальному решению на 50-й итерации при времени расчета менее 5 минут для района площадью 100 км<sup>2</sup>. Важным преимуществом предложенного подхода является учет изменения ветровых условий вдоль маршрута, что особенно актуально для районов со сложным рельефом. Проведенный анализ чувствительности модели к изменению входных параметров (скорость ветра, инсоляция, рельеф) показал, что наибольшее влияние на энергопотребление и продолжительность полета оказывают ветровые условия.

Верификация модели проводилась на основе полевых испытаний в Оренбургской области с использованием БПЛА легкого и среднего класса. Расхождение между расчетными и фактическими значениями энергопотребления не превысило 12%.

На основе анализа многолетних метеоданных и цифровой модели рельефа была проведена классификация территории Оренбургской области по сложности ветрового режима для применения БПЛА, которая позволяет выделить четыре категории сложности ветрового режима: восточные и горные районы области характеризуются наиболее сложными условиями для полетов БПЛА, западные районы являются наиболее благоприятными. Данное зонирование позволяет заблаговременно выбирать тип БПЛА, минимизируя риски аварий и обеспечивая высокое качество данных аэросъемки.

**Заключение.** Разработанный в исследовании адаптивный алгоритм планирования маршрутов БПЛА для мониторинга сельхозугодий позволяет эффективно учитывать динамические изменения атмосферных

условий и рельефа местности, что подтверждается результатами математического моделирования и полевыми испытаниями в условиях Оренбургской области.

#### Список использованных источников

1. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. В 2-х кн. Кн. 2. – М.: Мир, 2018. – 325 с.
2. Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 26(1), 29–41.
3. Разработка автоматизированной системы управления энергопотреблением беспилотного воздушного судна при выполнении кадастровых и землеустроительных работ / В. Д. Павлидис, М. В. Чкалова, В. А. Шахов [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 10(340). – С. 18–21.
4. Павлидис, В. Д. Моделирование системы управления беспилотным воздушным судном / В. Д. Павлидис // Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, Оренбург, 14 ноября 2025 года. – Оренбург: ОГАУ, 2025. – С. 510-514.
5. Документация библиотеки PySolar. – Текст: электронный. – URL: <https://pysolar.readthedocs.io/> (дата обращения: 15.04.2026).
6. Климатические данные Оренбургской области [Электронный ресурс] // ФГБУ «Гидрометцентр России». – URL: <http://meteoinfo.ru/climate-climate-tables1/146-climate-rusfo/7336-climate-oren> (дата обращения: 15.04.2026).
7. Петров, В.М. Влияние переменных атмосферных условий на точность построения ортофотопланов по данным БПЛА-съемки / В.М. Петров, К.Н. Белов // Геодезия и картография. – 2022. – Т. 83, № 4. – С. 27–35.

УДК 633.2:631.524.84(476)

**Н.С. Яковчик**, *д-р с.-х. наук, д-р экон. наук, профессор*

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск*

*E-mail: yakovchik.ipk@bsatu.by*

**Н.Н. Зенькова**, *канд. с.-х. наук, доцент,*

**О.В. Зенькова**, *ст. преподаватель*

*Учреждение образования «Витебская ордена «Знак Почета»  
государственная академия ветеринарной медицины, г. Витебск*

#### ПРОДУКТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ЗЕЛЕННОЙ МАССЫ ПРОСО-СОРГОВЫХ КУЛЬТУР

**Ключевые слова:** однолетние культуры, сорго-суданковый гибрид, африканское просо, урожайность, сырой протеин, обменная энергия

**Key words:** annual crops, sorghum-sudangrass hybrid, African millet, yield, crude protein, and exchange energy