

ISSN 2518-1726 (Online),
ISSN 1991-346X (Print)



«ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҮЛТТЫҚ ФЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫ» РҚБ

ХАБАРЛАРЫ

ИЗВЕСТИЯ

РОО «НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН»

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF
SCIENCES OF THE REPUBLIC OF
KAZAKHSTAN

SERIES OF PHYSICS AND MATHEMATICS

2 (354)

APRIL – JUNE 2025

PUBLISHED SINCE JANUARY 1963
PUBLISHED 4 TIMES A YEAR

ALMATY, NAS RK

CHIEF EDITOR:

MUTANOV Galimkair Mutanovich, doctor of technical sciences, professor, academician of NAS RK, acting General Director of the Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

EDITORIAL BOARD:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, (Deputy Editor-in-Chief), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Advisor to the General Director of the Institute of Information and Computing Technologies of the CS MES RK, Head of the Laboratory (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

Mamyrbayev Orken Zhumazhanovich, (Academic Secretary), PhD in Information Systems, Deputy Director for Science of the Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

BAIGUNCHEKOV Zhumadil Zhanabaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Institute of Cybernetics and Information Technologies, Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

WOICIK Waldemar, Doctor of Technical Sciences (Phys.-Math.), Professor of the Lublin University of Technology (Lublin, Poland), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

SMOLARJ Andrej, Associate Professor Faculty of Electronics, Lublin polytechnic university (Lublin, Poland), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

KEILAN Alimkhan, Doctor of Technical Sciences, Professor (Doctor of science (Japan)), chief researcher of Institute of Information and Computational Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

KHAIROVA Nina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Institute of Information and Computational Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

OTMAN Mohamed, PhD, Professor of Computer Science Department of Communication Technology and Networks, Putra University Malaysia (Selangor, Malaysia), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

NYSANBAYEVA Saule Yerkebulanovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

BIYASHEV Rustam Gakashevich, doctor of technical sciences, professor, Deputy Director of the Institute for Informatics and Management Problems, Head of the Information Security Laboratory (Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603642864>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802016>

KAPALOVA Nursulu Aldazharovna, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory cybersecurity, Institute of Information and Computing Technologies CS MES RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>,

KOVALYOV Alexander Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk, Ukraine), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

MIKHALEVICH Alexander Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

TIGHINEANU Ion Mihailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician, President of the Academy of Sciences of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

Series of Physics and Mathematics

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Owner: RPA «National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan» (Almaty).

Certificate No. KZ20VPY00113741 on the re-registration of the periodical printed and online publication of the information agency, issued on 28.02.2025 by the Republican State Institution «Information Committee» of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan

Subject area: *information and communication technologies*.

Currently: *included in the list of journals recommended by the CCSES MSHE RK in the direction of «Information and communication technologies».*

Periodicity: 4 times a year.

Editorial address: 28, Shevchenko str. of. 219, Almaty, 050010, tel. 272-13-19

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

БАС РЕДАКТОР:

МУТАНОВ Фалымқайыр Мұтаңұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰҒА академигі, КР ФЖБМ ФК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының м.а. (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

ҚАЛИМОЛДАЕВ **Максат** **Нұрділұлы**, (бас редактордың орынбасары), физика-математика ғылымда-рының докторы, профессор, КР ҰҒА академигі, КР ФЖБМ РК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының кенесшісі, зертхана менгерушісі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

МАМЫРБАЕВ Әркен Жұмақанұлы (ғалым ҳатшы), Ақпараттық жүйелер саласындағы техникалық дарындырылғыш (PhD) докторы, КР ФЖБМ ФК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» директорының ғылым жөніндегі орынбасары (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

БАЙГУНЧЕКОВ Жұмаділ Қарабайұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, КР YFA академиги. Кибернетика және ақпараттық технологиялар институты, Қолданбалы механика және инженерлік графика кафедрасы, Сәтбаев университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

ВОЙЧИК Вальдемар, техника ғылымдарының докторы (физ-мат), Любедин технологиялык университетин профессоры (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

СМОЛАРЖ Анджей, Люблин політехнічний університетінің електроніка факультетінің доценті (Люблін, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

КЕЙЛАН Элімхан, техника ғылымдарының докторы, профессор (ғылым докторы (Жапония)), КР ФЖБМ FК «Ақпараттық жөн есептөр технологиялары институтының» бас ғылыми қызметкері (Алматы, Казакстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

ХАЙРОВА Нина, техника ғылымдарының докторы, профессор, КР ФЖБМ ФК «Акпараттық және есептегу технологиялар институтының» бал ғылыми қызметкери (Алматы, Казақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

ОТМАН Мухаммед, PhD, Информатика, Коммуникациялык технологиялар және желілер кафедрасының профессоры, Путра университеті Малайзия (Селангор, Малайзия), <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55262881709>

uri?authorId=56036884700, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>
НЫСАНБАЕВА Сауле Еркебұланқызы, техника ғылымдарының докторы, доцент, КР ФЖБМ ФК «Ақпараттық және есептөр технологиялары институтының» аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

БИЯШЕВ Рустам Гакашевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Информатика және басқару мәселелері институты директорының орынбасары, Ақпараттық қауіпсіздік зертханасының мәнгерүшісі (Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603642864>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802016>

КАПАЛОВА Нұрсұлу Алдажарқызы, техника ғылымдарының кандидаты, ҚР ФЖБМ ФК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты», Кіберқауіпсіздік зертханасының меншерушісі (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>,

КОВАЛЕВ ¹Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина Үлттых Ғылым академиясының академигі, Колданбай математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author-record/38481396>

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь Үлттүк Ғылым академиясының академигі (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

ТИГИНИЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым Академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

«ҚР ҰҒА Хабарлары. Физика-математика сериясы». ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print) Меншіктеуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РКБ (Алматы). Ақпарат агенттігінің мерзімді баспа сез басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды қайта есепке қою туралы КР Мәдениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі 28.02.2025 ж. берген №KZ20VPY00113741 Қуалып.

Такырыптык бағыты: *«ақпараттық-коммуникациялық технологиялар*
Казіргі уақытта: *«ақпараттық-коммуникациялық технологиялар»* бағыты бойынша ҚР БФМ БЕСБК

жынынан журналдар тізіміне енді.
Мерзімділгі: жысъына 4 рет.
Реквизиттер: № 050010, Астана, пр. Шевченко көші, 28, 210 бап, төрт: 272, 13, 16

10, Алматы қ., Шевченко қш., 28, 219 000, тел.: 272-15-19
[z/index.php/en/](#)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

МУТАНОВ Галимкаир Мутанович, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, и.о. генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, советник генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК, заведующий лабораторией (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

МАМЫРБАЕВ Оркен Жумажанович, (ученый секретарь), доктор философии (PhD) по специальности «Информационные системы», заместитель директора по науке РГП «Институт информационных и вычислительных технологий» Комитета науки МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55967630400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1774027>

БАЙГУНЧЕКОВ Жумадил Жанабаевич, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Институт кибернетики и информационных технологий, кафедра прикладной механики и инженерной графики, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506823633>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1923423>

ВОЙЧИК Вальдемар, доктор технических наук (физ.-мат.), профессор Люблинского технологического университета (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

СМОЛАРЖ Анджей, доцент факультета электроники Люблинского политехнического университета (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56249263000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1268523>

КЕЙЛАН Алимхан, доктор технических наук, профессор (Doctor of science (Japan)), главный научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

ХАЙРОВА Нина, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

ОТМАН Мохамед, доктор философии, профессор компьютерных наук, Департамент коммуникационных технологий и сетей, Университет Путра Малайзия (Селангор, Малайзия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

НЫСАНБАЕВА Саule Еркебулановна, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55453992600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802041>

БИЯШЕВ Рустам Гакашевич, доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института проблем информатики и управления, заведующий лабораторией информационной безопасности (Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6603642864>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/3802016>

КАПАЛОВА Нурсулу Алдажаровна, кандидат технических наук, заведующий лабораторией кибербезопасности РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларусь (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая».

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Собственник: Республикаансое общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы).

Свидетельство о постановке на переучет периодического печатного издания, информационного агентства и сетевого издания № KZ20VPY00113741. Дата выдачи 28.02.2025

Тематическая направленность: информационно-коммуникационные технологии.

В настоящее время: вошел в список журналов, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК по направлению «информационно-коммуникационные технологии».

Периодичность: 4 раза в год.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, оф. 219, тел.: 272-13-19
<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан», 2025

CONTENTS

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

O. Auyelbekov, E. Bostanov, R. Berkutbayeva, A. Seididayeva, I. Musabekova ANALYSIS OF AGRICULTURAL YIELDS IN KAZAKHSTAN USING UNMANNED AERIAL VEHICLES AND AI.....	12
S.T. Akhmetova, S.U. Ismailov, A.A. Batyrbekov, A.S. Ismailova PREREQUISITES FOR CREATION OF A VIRTUAL 3D MODEL OF AN UNMANNED UNIVERSAL CROPPING TRACTOR.....	33
A. Bekarystankzyz, O. Mamyrbayev, D. Oralbekova, A. Yerimbetova, M. Turdalyuly TESTING THE AUDIO-TEXT DATASET FOR KAZAKH LANGUAGE USING THE CONFORMER ENCODER.....	50
G. Bekmanova, M. Kantureeva, A. Omarbekova, B. Ergesh, A. Zakirova THE USE AND IMPACT ASSESSMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN HIGHER EDUCATION.....	61
N.S. Yesmukhamedov, S. Sapakova, Syed Abdul Rahman Al-Haddad, D. Daniyarova DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM ARCHITECTURE FOR HEALTHCARE INSTITUTIONS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE.....	74
T. Zhukabayeva, V. Desnitsky, Y. Mardenov, N. Karabayev INFORMATION SECURITY INCIDENT MANAGEMENT IN IIOT SYSTEMS WITH EDGE COMPUTING.....	92
M. Ilesbay, A. Tynymbayev, S. Mambetov, A. Barakova, O. Joldasbayev INTEGRATED METHOD OF INFORMATION PROTECTION BASED ON DATA COMPRESSION, ENCRYPTION AND SEPARATION.....	107
B.A. Karibayev, N. Meirambekuly, M. Ibraim, A.S. Baikenov, G.B. Ikhsan DESIGN OF A SIX-ELEMENT S-BAND ANTENNA ARRAY FOR CUBESAT.....	125
N. Karymsakova, K. Ozhikenov, M. Bolysbek, R. Beisembekova ARCHITECTURE OF THE MEDICAL REHABILITATION PLATFORM.....	140

D. Kuanyshbay, A. Shoiynbek, K. Rabbany, A. Bekarystankzyz, A. Mukhametzhanov COMPARISON OF MACHINE LEARNING AND REINFORCEMENT LEARNING FOR DEPRESSION RECOGNITION FROM SPEECH.....	155
E. Nysanov, Zh. Kemelbekova, E. Abdrashova, S. Kurakbaeva, A. Baydibekova MODELING AND CALCULATION OF THE FLOW OF THREE-PHASE MEDIA WITH VARIABLE CONCENTRATIONS.....	169
B. Orazbaev, Z. Kuzhukhanova, K. Orazbaeva, A. Kishubaeva DEVELOPMENT OF MODELS OF ATMOSPHERIC AND RECTIFICATION COLUMNS IN PRIMARY OIL REFINING.....	181
D. Rakhimova, A. Sarsenbayeva, A. Turarbek, A. Auezova THE USE OF DEEP LEARNING TO IMPROVE THE ACCURACY OF ANSWERS IN MULTILINGUAL QUESTION-AND-ANSWER SYSTEMS...	196
L. Rzayeva, D. Pogolovkin, A. Myrzatay DEVELOPMENT OF A MODULAR NLP-BASED CORRESPONDENCE ANALYSIS SERVICE FOR DIGITAL FORENSICS.....	212
A.T. Sankibayev, I. Makhambayeva, K. Kanibaikyzy, A. Temirbek MODELING OF VIBRATIONAL PROCESSES IN WOLFRAM MATHEMATICA SYSTEM.....	234
N.M. Temirbekov, A.K. Turarov NUMERICAL SOLUTION OF THE DIRECT AND INVERSE PROBLEM OF GAS LIFT OIL PRODUCTION PROCESS BY THE METHOD OF CONJUGATE EQUATIONS.....	251
Z. Utemaganbetov, Kh. Ramazanova, K. Bizhanova, R. Assylbayeva AN ANALYTICAL AND NUMERICAL METHOD FOR TRANSFERRING BOUNDARY CONDITIONS FOR A ONE-DIMENSIONAL DIFFUSION EQUATION.....	280
M. Khizirova, K. Chezhimbayeva, A. Kassimov, M. Yermekbayev RESEARCH ON DISTRIBUTION TRAFFIC AND DISTRIBUTION METHODS IN VANET NETWORKS.....	294
K. Yakunin, D. Kusain, R.I. Mukhamediev, N. Yunicheva, N. Kuldeyev INTEGRATION OF FLIGHT PATH PLANNING PROGRAMS AND CONTROL SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES.....	317

МАЗМУНЫ

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

Ө. Әуелбеков, Е. Бостанов, Р. Беркутбаева, А. Сейдилдаева, И. Мусабекова ҚАЗҚАСТАНДА АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ӨНІМДІЛІГІН ҮШҚЫШСЫЗ ҮШУ АППАРАТТАРЫ МЕН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ҚӨМЕГІМЕН ТАЛДАУ.....	12
С.Т. Ахметова, С.У. Исмаилов, А.А. Батырбеков, А.С. Исмаилова ЖУРГІЗУШІСІЗ ӘМБЕБАП ЕГІН ЕГЕТИН ТРАКТОРДЫҢ ВИРТУАЛДЫ 3D МОДЕЛІН ҚҰРУДЫҢ АЛҒЫ ШАРТТАРЫ.....	33
А. Бекарыстанқызы, О. Мамырбаев, Д. Оралбекова, А. Еримбетова, М. Тұрдалықызы CONFORMER ШИФРЛАУШЫСЫН ҚОЛДАНЫП ҚАЗАҚ ТІЛІНДЕ АУДИО- МӘТІН ТҮРІНДЕ ЖИНАЛҒАН МӘЛІМЕТТЕР ҚОРЫН СЫНАУ.....	50
Г.Т. Бекманова, М.А. Кантуреева, А.С. Омарбекова, Б. Ж. Ергеш, А.Б. Закирова ЖОҒАРЫ БІЛІМ БЕРУДЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТТІ ҚОЛДАНУ ЖӘНЕ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ.....	61
Н.С. Есмұхамедов, С. Сапақова, Сайд Абдул Рахман Әл-Хаддад, Д. Даниярова, МЕДИЦИНАЛЫҚ МЕКЕМЕЛЕРГЕ АРНАЛҒАН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТТІ ҚОЛДАНАТЫН АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕ АРХИТЕКТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ.....	74
Т. Жукабаева, В. Десницкий, Е. Марденов, Н. Карабаев ПОТ-ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ АҚПАРАТТЫҚ ҚАУПІСІЗДІК ИНЦИДЕНТТЕРІН ШЕТКІ ЕСЕПТЕУЛЕРДІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП БАСҚАРУ.....	91
М.А. Ілесбай, Ә.Б. Тынымбаев, С.Т. Мамбетов, А.Ш. Баракова, О.К. Джолдасбаев ДЕРЕКТЕРДІ СЫФУ, ШИФРЛАУ ЖӘНЕ БӨЛУ НЕГІЗІНДЕ АҚПАРАТТЫ ҚОРҒАУДЫҢ БІРІКТІРІЛГЕН ӘДІСІ.....	107
Б.А. Карибаев, Н. Мейрамбекұлы, М. Ибраим, А.С. Байкенов, Г.Б. Ихсан CUBESAT ҮШІН АЛТЫ ЭЛЕМЕНТТІ S-ДИАПАЗОНДЫ АНТЕННА ТОРЫН ЖОБАЛАУ.....	125
Н.Т. Карымсакова К.А. Ожикенов М.Е. Болысбек, Р.Н. Бейсембекова МЕДИЦИНАЛЫҚ ӨҢАЛТУ ПЛАТФОРМА АРХИТЕКТУРАСЫ.....	140

Д. Қуанышбай, А. Шойынбек, К. Раббани, А. Мұхаметжанов, Б. Мералиев СӨЙЛЕУ АРҚЫЛЫ ДЕПРЕССИЯНЫ ТАНУ ҮШИН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ МЕН КУШЕЙТУ АРҚЫЛЫ ОҚЫТУДЫ САЛЫСТАРУ.....	155
Е.А. Нысанов, Ж.С. Кемельбекова, Э.Т. Абдрашова, С.Ж. Куракбаева, А.О. Байдибекова АЙНЫМАЛЫ КОНЦЕНТРАЦИЯЛЫ ҮШ ФАЗАЛЫ ОРТАЛАРДЫҢ АҒЫНЫН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ.....	169
Б. Оразбаев, Ж. Кужуханова, К. Оразбаева, А. Кишубаева МҰНАЙДЫ БАСТАПҚЫ ӨҢДЕУ КЕЗІНДЕ АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖӘНЕРЕТИФИКАЦИЯЛЫҚКОЛОНОЛАРЫНЫҢ МОДЕЛЬДЕРІН ӘЗІРЛЕУ.....	181
Д. Рахимова, А. Сарсенбаева, Э. Тураарбек, Э. Ауезова КӨП ТІЛДІ СҰРАҚ-ЖАУАП ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ ЖАУАПТАРДЫҢ ДӘЛДІГІН АРТТАРЫУ ҮШИН ТЕРЕҢ ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАNU.....	196
Л. Рзаева, Д. Поголовкин, А.Мырзатай ЦИФРЛЫҚ КРИМИНАЛИСТИКА ҮШИН NLP НЕГІЗІНДЕГІ МОДУЛЬДІК ХАТ АЛМАСУДЫ ТАЛДАУ ҚЫЗМЕТІН ӘЗІРЛЕУ.....	212
А.Т. Санкибаев, И. Махамбаева, К. Канибайкызы, А. Темирбек ТЕРБЕЛІСТЕР ҮДЕРІСІН WOLFRAM МАТЕМАТИКА ЖҮЙЕСІНДЕ МОДЕЛДЕУ.....	234
Н.М. Темирбеков, А.К. Турапов МҰНАЙ ӨНДІРУДІҢ ГАЗЛИФТТІК ПРОЦЕСІНІҢ ТУРА ЖӘНЕ КЕРІ ЕСЕПТЕРІН ТҮЙІНДЕС ТЕҢДЕУЛЕР ӘДІСІМЕН САНДЫҚ ШЕШУ.....	251
З. Утемаганбетов, Х. Рамазанова, К. Бижанова, Р. Асылбаева БІРӨЛШЕМДІ ДИФФУЗИЯ ТЕҢДЕУІ ҮШИН ШЕКАРАЛЫҚ ШАРТТАРДЫ КӨШПРУДІҢ АНАЛИТИКАЛЫҚ-САНДЫҚ ӘДІСІ.....	280
М. Хизирова, К. Чежимбаева, А. Касимов, М. Ермекбаев VANET ЖЕЛІЛЕРІНДЕ ТАРАТУ ТРАФИГІН ЖӘНЕ ТАРАТУ ӘДІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ.....	294
К. Яқунин, Д. Құсайын, Равиль И. Мухамедиев, Н. Юничева, Н. Кульдеев ҮШУ МАРШРУТТАРЫН ЖОСПАРЛАУ БАҒДАРЛАМАЛАРЫ МЕН ҮШҚЫШСЫЗ ҮШУ АППАРАТТАРЫН БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІН ҮШТАСТАРЫУ.....	317

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

О. Ауелбеков, Е. Бостанов, Р. Беркутбаева, А. Сейдилдаева, И. Мусабекова АНАЛИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ УРОЖАЙНОСТИ В КАЗАХСТАНЕ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИИ.....	12
С.Т. Ахметова, С.У. Исмаилов, А.А. Батырбеков, А.С. Исмаилова ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ 3Д МОДЕЛИ БЕСПИЛОТНОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО ПРОПАШНОГО ТРАКТОРА.....	33
А. Бекарыстанкызы, О. Мамырбаев, Д. Оралбекова, А. Еримбетова, М. Турдалыулы ТЕСТИРОВАНИЕ КОРПУСА ДАННЫХ В ВИДЕ АУДИО-ТЕКСТ НА КАЗАХСКОМ ЯЗЫКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CONFORMER	50
Г.Т. Бекманова, М.А. Кантуреева, А.С. Омарбекова, Б.Ж. Ергеш, А.Б. Закирова ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ.....	61
Н.С. Есмухамедов, С. Сапакова, Сайед Абдул Рахман Аль-Хаддад, Д. Даниярова РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА.....	74
Т. Жукабаева, В. Десницкий, Е. Марденов, Н. Карабаев УПРАВЛЕНИЕ ИНЦИДЕНТАМИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ПОТ-СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАНИЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ.....	92
М.А. Илесбай, А.Б. Тынымбаев, С.Т. Мамбетов, А.Ш. Баракова, О.К. Джолдасбаев ИНТЕГРИРОВАННЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ СЖАТИЯ, ШИФРОВАНИЯ И РАЗДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ.....	107

Б.А. Карибаев, Н. Мейрамбекулы, М. Ибраим, А.С. Байкенов, Г.Б. Ихсан ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШЕСТИЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ S-ДИАПАЗОНА ДЛЯ CUBESAT	125
Н.Т. Карымсакова К.А. Ожикенов, М.Е. Болысбек, Р.Н. Бейсембекова АРХИТЕКТУРА ПЛАТФОРМЫ МЕДИЦИНСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ.....	140
Д. Куанышбай, А. Шойынбек, К. Раббани, А. Бекарыстанкызы, А. Мухаметжанов СРАВНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕПРЕССИИ ПО РЕЧИ.....	155
Е.А. Нысанов, Ж.С. Кемельбекова, Э.Т. Абдрашова, С.Ж. Куракбаева, А.О. Байдибекова МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ СРЕД С ПЕРЕМЕННЫМИ КОНЦЕНТРАЦИЯМИ.....	169
Б. Оразбаев, Ж. Кужуханова, К. Оразбаева, А. Кишубаева РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРНЫХ И РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТИ.....	181
Д. Рахимова, А. Сарсенбаева, А. Туарбек, А. Ауезова ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОТВЕТОВ В МУЛЬТИЯЗЫЧНЫХ ВОПРОСНО-ОТВЕТНЫХ СИСТЕМАХ.....	196
Л. Рзаева, Д. Поголовкин, А. Мырзатай РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОГО СЕРВИСА АНАЛИЗА ПЕРЕПИСОК НА ОСНОВЕ NLP ДЛЯ ЦИФРОВОЙ КРИМИНАЛИСТИКИ.....	212
А.Т. Санкибаев, И. Махамбаева, К. Канибайкызы, А. Темирбек МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ WOLFRAM MATHEMATICA.....	234
Н.М. Темирбеков, А.К. Туаров ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГАЗЛИФТНОГО ПРОЦЕССА ДОБЫЧИ НЕФТИ МЕТОДОМ СОПРЯЖЕННЫХ УРАВНЕНИЙ.....	251

З. Утемаганбетов, Х. Рамазанова, К. Бижанова, Р. Асылбаева АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ПЕРЕНОСА КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОДНОМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ.....	280
М. Хизирова, К. Чежимбаева, А. Касимов, М. Ермекбаев ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАФИКА И МЕТОДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СЕТЯХ VANET.....	294
К. Якунин, Д. Кусайын, Р.И. Мухамедиев, Н. Юничева, Н. Кульдеев СОПРЯЖЕНИЕ ПРОГРАММ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ПОЛЕТА И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	317

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 2. Number 354 (2025). 317–335

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.359>

UDC 004.4, 004.8, 004.6

©K. Yakunin^{1,2}, D. Kusain^{1,2}, R.I. Mukhamediev^{1,2}, N. Yunicheva^{1,3*}, N. Kuldeyev², 2025.

¹Institute of Information and Computational Technologies MSHE RK,
Almaty, Kazakhstan;
²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan;
³Almaty University of Power Engineering and Telecommunications,
Almaty, Kazakhstan.
E-mail: naduni@mail.ru

INTEGRATION OF FLIGHT PATH PLANNING PROGRAMS AND CONTROL SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Yakunin Kirill — PhD, Senior Researcher of the Institute of High Technologies of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan and K.I. Satpayev KazNITU, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: yakunin.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7378-9212>;

Mukhamediev Ravil — PhD, professor, Institute of Information and Computational Technologies MSHE RK and K.I. Satpayev KazNITU, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: ravid.muhamedev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3727-043X>;

Yunicheva Nadiya — PhD, leading researcher of the Institute of High Technologies of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan and Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (AUPET), Almaty, Kazakhstan,

E-mail: naduni@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6351-3450>;

Kusain Dias — Bachelor of Computer Science, software-engineer MES RK, ORCID ID, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: diac.kusain@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2680-5443>;

Nursultan Kuldeyev — Master of Management in Information systems, Engineer, K.I. Satpayev KazNITU, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: kuldeevnursultan129@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-5906-1040>.

Abstract. The paper reviews current unmanned aerial vehicle (UAV) control systems with built-in mission planners, identifies their limitations when heterogeneous UAV groups and a mobile ground support complex are employed, and presents the Swarmown + PlanMaker suite that implements a genetic-algorithm route optimiser and automatically passes the resulting waypoints to QGroundControl. Implemented in Python, the toolkit runs on commodity hardware, reuses standard MAVLink messages, and can be incorporated into existing QGroundControl workflows without firmware changes or additional electronics. Its modular architecture simplifies future algorithm swaps, facilitates cloud-based batch optimisation experiments, and shortens field calibration loops for agricultural deployments.

Results. A mission-planning module based on a genetic algorithm was developed to balance task allocation among multiple UAVs; the PlanMaker converter was created to generate *.plan* files and link them with QGroundControl; field trials confirmed successful execution of monitoring missions by a UAV group and the ground complex. *Scientific novelty.* A multi-criteria fitness function that minimises total mission cost—route length, time and energy consumption—for a heterogeneous UAV fleet is introduced, a universal coupling scheme that connects the planner to standard flight-control software without source-code modification is proposed, broadening the application of genetic algorithms in precision agriculture. *Practical value.* The suite reduces planning time to a few minutes, automates mission upload to QGroundControl, lowers operator workload, improves energy efficiency and flight accuracy, and facilitates large-scale deployment of UAV-based monitoring and agrotechnical operations.

Keywords: unmanned aerial vehicle, control, mission planning, genetic algorithm, program software

©К. Якунин^{1,2}, Д. Құсайын^{1,2}, Равиль И. Мухамедиев^{1,2}, Н. Юничева^{1,3*},
Н. Кульдеев², 2025.

¹Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы, Қазақстан;

²Сәтпаев университеті, Алматы, Қазақстан;

³Ф. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы, Қазақстан.

E-mail: naduni@mail.ru

ҰШУ МАРШРУТТАРЫН ЖОСПАРЛАУ БАҒДАРЛАМАЛАРЫ МЕН ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫН БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІН ҮШТАСТЫРУ

Якунин Кирилл — PhD, КР БФМ FK АЕТИ және ҚазҰТУ бас ғылыми қызметкери, Алматы, Қазақстан,

E-mail: yakunin.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7378-9212>;

Мұхамедиев Равиль Ильгизович — инженерия ғылымдарының докторы, КР БФМ FK АЕТИ және ҚазҰТУ профессоры, Алматы, Қазақстан,

E-mail: ravid.muhamediyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3727-043X>;

Юничева Надия Рафкатовна — т.ғ.к., доцент, КР БФМ FK АЕТИ және Ф. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің жетекші ғылыми қызметкери, Алматы, Қазақстан,

E-mail: naduni@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6351-3450>;

Құсайын Диас Русланұлы — Computer Science бакалавры, инженер-программист АЕТИ-МОН КР YFA, Алматы, Қазақстан,

E-mail: diac.kusain@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2680-5443>.

Кульдеев Нұрсұлтан — «Ақпараттық жүйелер менеджменті» мамандығының магистрі, инженер, ҚазҰТУ, Алматы, Қазақстан,
kuldeevnursultan129@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-5906-1040>.

Аннотация. Бұл мақалада миссияны жоспарлау модульдері бар заманауи ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) басқару жүйелері қарастырылып, әртүрлі дрондар мен жылжымалы жерусті кешенінің бірлескен жұмысы

кезіндегі шектеулер анықталды, сондай-ақ QGroundControl жүйесіне жол нұктелерін автоматты түрде жіберуді жүзеге асыратын маршруттарды оңтайландырудың генетикалық алгоритмі негізінде құрылған Swarmtown + PlanMaker кешені ұсынылды. Python тілінде толық жазылған бұл құралдар жинағы көдімгі аппараттық қамтамасыз етуде жұмыс істейді, стандартты MAVLink хабарларын пайдаланады және QGroundControl жұмыс процесстеріне микробағдарламаны өзгертпей-ақ оңай ендіріледі. Оның модульдік архитектурасы болашақта алгоритмдерді ауыстыруды жеңілдетеді, бұлтта пакеттік оңтайландыру эксперименттерін іске асыруға мүмкіндік береді және агротехникалық өрістердегі калибрлеу циклдерін жеделдетеді.

Нәтижелері. Генетикалық алгоритмге негізделген миссияны жоспарлау модулі әзірленіп, бірнеше ҰҰА арасында тапсырмаларды біркелкі болу қамтамасыз етілді, .plan файлдарын құрастырып, оларды QGroundControl жүйесімен біріктіретін PlanMaker конвертері жасалды, дала жағдайында жүргізілген сұнаптар нәтижесінде дрондар тобы мен жерүсті кешенімен мониторинг миссияларының сәтті орындалуы расталды.

Ғылыми жаңалығы. Гетерогенді ҰҰА тобы үшін миссияның жиынтық шығынын (маршрут ұзындығы, уақыт және энергия шығыны) минимизациялайтын мультикритериалды лайықтылық функциясы енгізілді, сондай-ақ жоспарлаушыны басқару жүйелеріне олардың бастанқы кодын өзгертусіз қосудың әмбебап схемасы ұсынылды, бұл генетикалық алгоритмдерді дәл егіншілік саласында қолдану аясын көздейтеді.

Практикалық құндылық. Кешен жоспарлау уақытын бірнеше минутқа дейін қыскартып, миссияларды QGroundControl жүйесіне автоматты түрде жүктеуді қамтамасыз етеді, операторлардың еңбек шығындарын төмендетеді, ұшу энергия тиімділігі мен дәлдігін арттырады, бұл ұшқышсыз мониторинг пен агротехникалық жұмыстарды кең ауқымды аумақтарда қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: ұшқышсыз ұшу аппараты, басқару, миссияны жоспарлау, генетикалық алгоритм, бағдарламалық қамтамасыз ету

**©К. Якунин^{1,2}, Д. Кусайын¹, Р.И. Мухамедиев^{1,2}, Н. Юничева^{1,3*},
Н. Кульдеев², 2025.**

¹Институт информационных и вычислительных технологий МНВО РК,
Алматы, Казахстан;

²КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан;

³Алматинский Университет энергетики и связи им. Г. Даукеева,
Алматы, Казахстан.

E-mail: naduni@mail.ru

СОПРЯЖЕНИЕ ПРОГРАММ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ ПОЛЕТА И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Якунин Кирилл — PhD, старший научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий МНВО РК и КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: yakunin.k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7378-9212>;

Мухамедиев Равиль Ильгизович — д.инж.н., профессор Института информационных и вычислительных технологий МНВО РК и КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: ravid.muhamedyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3727-043X>;

Юничева Надия Рафкатовна — к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий МНВО РК и Алматинского Университета энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан, E-mail: naduni@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6351-3450>;

Кусайын Диас Русланулы — бакалавр Computer Science, инженер-программист Института информационных и вычислительных технологий МНВО РК, Алматы, Казахстан, E-mail: diac.kusain@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2680-5443>;

Кульдеев Нурсултан — магистр по специальности «Менеджмент информационных систем», инженер КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: kuldeevnursultan129@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-5906-1040>.

Аннотация. В статье рассмотрены современные системы управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) с модулями планирования миссий, выявлены их ограничения при совместной работе разнородных дронов и мобильного наземного комплекса, а также представлен разработанный комплекс Swarmtown + PlanMaker, реализующий генетический алгоритм оптимизации маршрутов с последующей автоматической передачей путевых точек в QGroundControl. Полностью реализованный на Python, комплект работает на стандартном оборудовании, использует типовые сообщения MAVLink и потому легко встраивается в привычные процессы QGroundControl без изменения прошивки или дополнительной бортовой электроники. Её модульная архитектура упрощает последующую замену алгоритмов, позволяет проводить пакетные эксперименты оптимизации в облаке и ускоряет полевые циклы калибровки для агротехнических применений. **Результаты.** Разработан модуль планирования миссий на базе генетического алгоритма, обеспечивающий равномерное распределение задач между несколькими БЛА, создан конвертер PlanMaker, формирующий файлы *.plan* и интегрирующий их с QGroundControl, проведены полевые испытания, подтвердившие успешное выполнение миссий мониторинга группой дронов и наземного комплекса. **Научная новизна.** Введена мультикритериальная функция приспособленности, минимизирующая совокупную стоимость миссии (длина маршрута, время и энергозатраты) для гетерогенной группы БЛА, а также предложена универсальная схема сопряжения планировщика с существующими системами управления без изменения их исходного кода, что расширяет применение генетических алгоритмов в точном земледелии. **Практическая ценность.** Комплекс сокращает время планирования до нескольких минут, автоматизирует загрузку миссий в QGroundControl, снижает трудозатраты операторов, повышает энергоэффективность и точность полётов, способствуя масштабированию беспилотных технологий мониторинга и агротехнических работ на большие площади.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, управление, планирование миссии, генетический алгоритм, программное обеспечение

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №АР23488745 «Оперативная оценка засоленности почвы с применением маловысотных беспилотных летательных платформ», № BR21881908 «Комплекс экологического сопровождения городской агломерации» и № BR24992908 «Система поддержки агротехнических мероприятий в растениеводстве на базе комплекса средств мониторинга и методов искусственного интеллекта (Agroscope)»).

Введение

В последние годы технологии беспилотных летательных аппаратов (БЛА) переживают стремительный рост, находя применение в разнообразных сферах — от сельского хозяйства и экологии до промышленности и сферы безопасности (Mukhamediev, et al., 2021; Oksenenko, et al., 2024). Одной из сфер продуктивного применения БЛА является точное земледелие (precision agriculture -PA). Каждое поле при реализации PA рассматривается по отдельности, так что каждый его участок может обрабатываться несколько иначе с применением точно выверенного количества ресурсов (Finger, et al., 2019). Точное земледелие требует сбора большого количества актуальных по времени и пространству данных для реализации агротехнических мероприятий. БЛА могут использоваться как один из важных средств мониторинга для сбора информации, создания карт полей с их спектральными характеристиками, определения влажности почвы, выявление вредителей и т.п. Важным фактором успешного использования дронов является эффективное планирование полётов и надёжная интеграция планировщиков с полётными контроллерами. Это обеспечивает точность выполнения миссий, оптимизацию ресурсов и повышение общей эффективности операций. Современные системы управления БЛА имеют встроенные модули планирования полетов, но они как правило предназначены для полета одного БЛА решающего задачу покрытия. В случае сложных миссий группы БЛА требуется более точное планирование, поскольку могут выполняться не только задачи покрытия (Li, et al., 2023), но и задачи поиска (Jasim, et al., 2024), распыления удобрений или гербицидов, мониторинга выделенных участков (Vélez, et al., 2025) (например живых изгородей) и др.

Цель данной статьи заключается в анализе современных систем планирования полетов БЛА и их сопряжения системами управления полетами. Для этого, мы во-первых, рассмотрим системы управления полетами, имеющие подсистемы планирования миссий, во-вторых, обсудим основные паттерны и алгоритмы планирования и оптимизации сложных миссий, и, в третьих, представим комплекс планирования и сопряжения

обеспечивающий планирование миссии нескольких разнородных БПЛА совместно с передвижным наземным комплексом обеспечения и управления. Актуальность темы обусловлена растущей потребностью в оптимальных решениях для планирования полётов и взаимодействия с контроллерами полетов в условиях быстро развивающихся технологий БЛА. В статье рассматриваются достоинства и недостатки существующих систем планирования маршрутов облетов и основных алгоритмов оптимизации, описывается метод планирования и сопряжения, основанный на генетическом алгоритме, а также представлены полученные результаты, включая опыт практического применения системы. В заключении описаны ограничения системы и задачи будущих исследований.

Краткий обзор некоторых публикаций, посвященных данной тематике. К некоторым, наиболее популярным системам управления полетом БПЛА, имеющим модуль планирования, относится система QGroundControl. QGroundControl (программное обеспечение, необходимое для прошивки, настройки и калибровки полетного контроллера) - обеспечивает контроль полета и планирование миссии для любого дрона с поддержкой MAVLink. QGroundControl относится к системам с открытым исходным кодом (QGroundControl, 2024) и имеет следующие преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести способность выполнять следующие функции:

- Поддержка различных платформ (Windows, macOS, Android, iOS).
- Гибкость интерфейса: удобное визуальное отображение полётного пути, показанного на рис. 1:

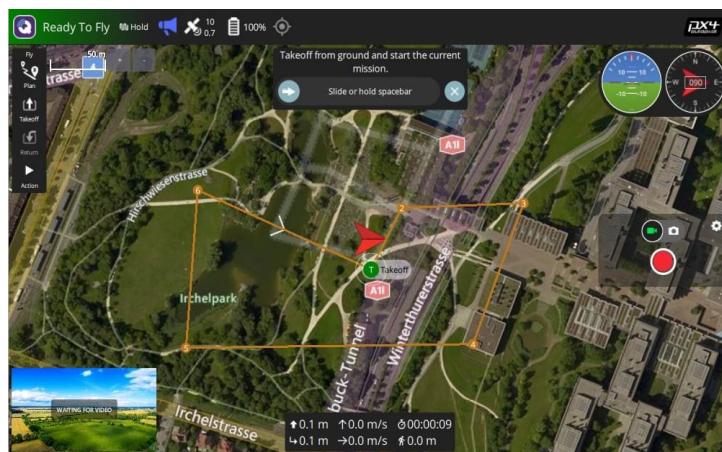


Рис. 1 - Маршрут, построенный в QGroundControl

- Поддержка различных типов дронов и контроллеров, таких как PX4 и ArduPilot.
- Возможность настройки параметров полёта в реальном времени.
- Открытый исходный код и поддержка сообщества.

В тоже время имеются некоторые недостатки, такие как:

– Ограниченные возможности для продвинутого анализа данных после миссий.

– Требуется обучение, так как интерфейс насыщен функциями.

QGroundControl позволяет автоматически спланировать миссию облета одного БПЛА для чего достаточно задать зону облета, показанную на рис.2:

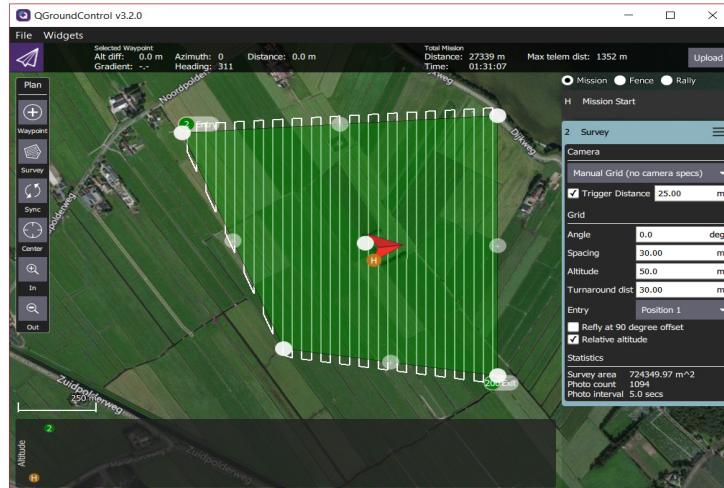


Рис. 2 - Выделение области интереса и планирование миссии по паттерну Замбони в QGroundControl

Система DroneKit - DroneKit-Python (ранее DroneAPI-Python) содержит реализацию языка Python для DroneKit. API позволяет разработчикам создавать приложения Python, которые взаимодействуют с транспортными средствами через MAVLink. Он обеспечивает программный доступ к телеметрии, состоянию и параметрам подключенного транспортного средства, а также позволяет как управлять миссией, так и напрямую контролировать движение и операции транспортного средства. API в первую очередь предназначен для использования в бортовых компьютерах-компаньонах (для поддержки расширенных вариантов использования, включая компьютерное зрение, планирование пути, 3D-моделирование и т. д.). Его также можно использовать для приложений наземных станций, взаимодействующих с транспортными средствами по радиоканалу.

Преимущества:

– Открытый исходный код и поддержка сообщества, большая гибкость.

– Прямое программное управление дронами через Python, что даёт больше возможностей для автоматизации миссий.

– Поддержка ArduPilot и его Mission Planner, что делает его полезным инструментом для работы с популярными контроллерами. На рис. 3 показана формальная схема взаимодействия упомянутых компонентов.

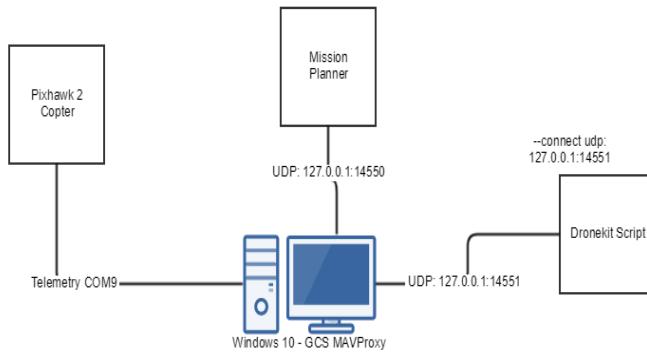


Рис. 3 - Схема взаимодействия ArduPilot u Dronekit

- Возможность симуляции миссий для тестирования.

Недостатки:

- Не является графическим интерфейсом, требуется программирование.

Фрагмент кода показан на рис. 4:

```
1  from dronekit import connect
2
3  # Connect to the Vehicle.
4  print("Connecting to vehicle")
5  vehicle = connect("COM8", wait_ready=True, baud=115200)
6  print("Connected")
7
8  # Get some vehicle attributes (state)
9  print("Get some vehicle attribute values:")
10 print(" GPS: %s" % vehicle.gps_0)
11 print(" Battery: %s" % vehicle.battery)
12 print(" Last Heartbeat: %s" % vehicle.last_heartbeat)
13 print(" Is Armable?: %s" % vehicle.is_armable)
14 print(" System status: %s" % vehicle.system_status.state)
15 print(" Mode: %s" % vehicle.mode.name)    # settable
16
17 # Close vehicle object before exiting script
18 vehicle.close()
19 print("Completed")
```

Рис. 4 - Скрипт для подключения к дронам

- Ограниченнaя поддержка для некоторых сложных сценариев управления.

Далее кратко рассмотрим систему UgCS (Universal Ground Control Software)

- многоплатформенное программное обеспечение для планирования полетов для дронов. Поддерживает дроны разных производителей, включая DJI, FreeFly, Inspired Flight и другие из списка Blue UAS (Ugcs, 2024).

К преимуществам платформы можно отнести следующее:

- Поддержка различных платформ (Windows, macOS, Ubuntu).
- Поддержка сложных миссий, многократных дронов показано на рис.5:

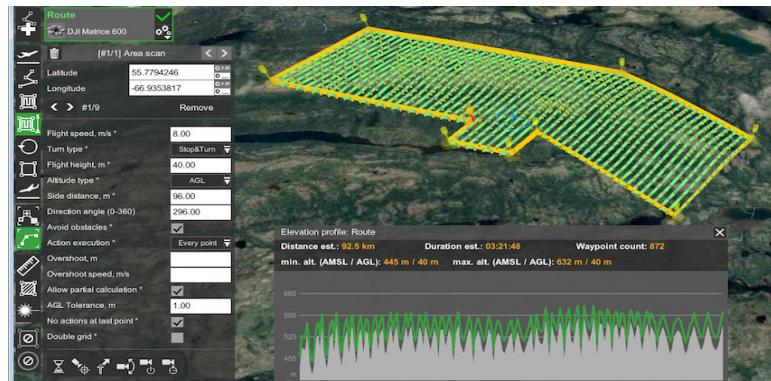


Рис. 5 - Интерфейс UgCS

– Возможность интеграции с различными типами оборудования и контроллеров.

– Возможность использования 3D-карт и данных о местности.

Недостатки:

– Платное ПО, ограниченные функции в бесплатной версии.

– Сравнительно сложный интерфейс для новичков, требуется обучение.

Еще одной универсальной системой автопилотирования с открытым исходным кодом, является система ArduPilot, которая поддерживает широкий спектр транспортных средств: мультикоптеры, вертолеты, самолеты, лодки, подводные лодки и вездеходы. Разрабатывается большим сообществом профессионалов и энтузиастов. Имеет модульную архитектуру. Позволяет осуществлять автономную навигацию, поддерживает различные датчики и системы управления, стабилизацию и удержание позиции, а также интеграцию с системами предотвращения столкновений.

Преимущества:

○ Открытый исходный код.

○ Широкая поддержка сообществом, большое количество инструкций.

○ Возможность работы с разными типами беспилотных систем показана на рис. 6:

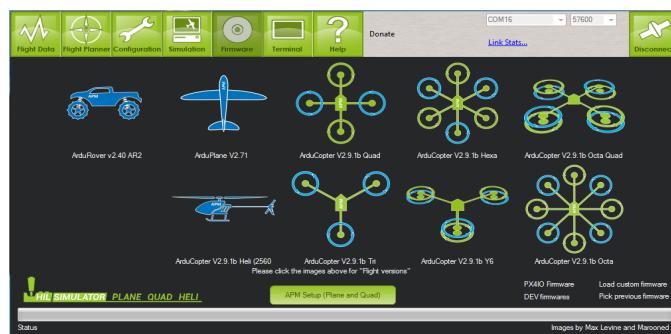


Рис. 6 - Виды беспилотных систем, поддерживаемые ArduPilot (Ardupilot, 2024)

Недостатки:

- Требуется высокая квалификация специалиста для полноценной настройки. Схема взаимодействия показана на рис. 7.
- Ограниченные возможности для интеграции с коммерческими системами.

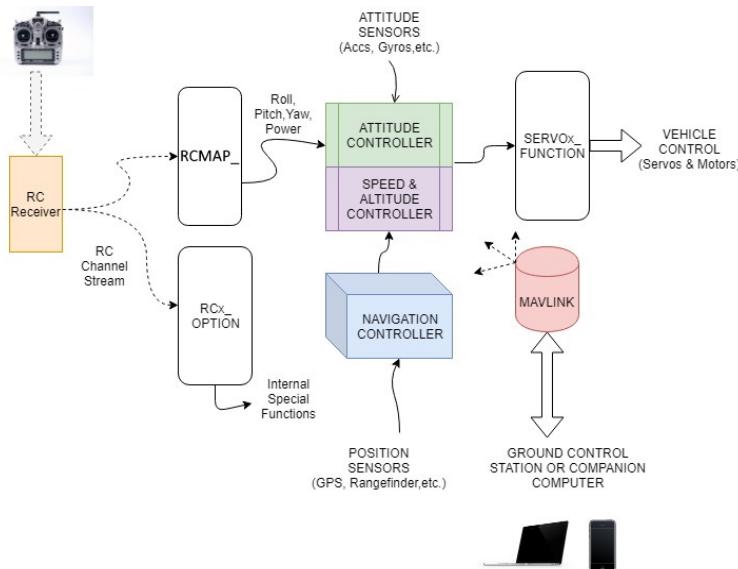


Рис. 7 - Схема взаимодействия компонентов беспилотной системы при использовании ArduPilot (Naubot)

Основным недостатком рассмотренных систем является их ограничение в планировании миссии нескольких разнородных БПЛА совместно с передвижным наземным комплексом обеспечения и управления (Mukhamediev, et al., 2023). Поэтому продолжаются разработки методов и алгоритмов планирования сложных миссий (Kumar, et al., 2023), например по распылению гербицидов в предварительно найденных зонах (Jasim, et al., 2024), внесению удобрений, точечного опрыскивания (Plessen, 2023), повышению энергоэффективности и т.п.

Методы и материалы.

Алгоритмы планирования маршрутов движения БПЛА.

К наиболее распространённым алгоритмам, используемым для планирования миссии мониторинга с помощью БЛА, относится, к примеру, планирование облета на основе паттерна Замбони.

Паттерн «Back-and-Forth/Zamboni» (также известный как «Зигзаг» или «Зигзагообразный») представляет собой метод генерации маршрута, при котором БЛК перемещается по заданной зоне, совершая параллельные проходы (Cabreira, et al., 2019). Перемещение показано на рис. 8:



Рис. 8 - Движение с использованием паттерна «Back-and-Forth»

Этот паттерн особенно удобен для быстрого покрытия относительно небольших геометрически простых зон облета, таких как городские районы или сельскохозяйственные поля. Преимущество паттерна в быстрой и экономичной генерации маршрутов и простоте реализации. Поэтому «Back-and-Forth» используется как генератор маршрутов по умолчанию для случаев, где зоны облета не слишком масштабные и не требуют комплексного планирования с учетом движения нескольких БЛА, ограничений, связанных с препятствиями и т.п. Однако он не подходит для сложных и масштабных зон облета, когда требуется учет дополнительных ограничений по времени, трудозатратам, препятствиям и т.п.

Также используется прямое планирование на основе грид-системы.

Прямое планирование на основе грид-системы включает деление области облета на равномерные сетки и последующее выполнение полетов по этим сеткам (Apostolidis, et al., 2023). Метод легко реализуется, не требует сложных вычислений и обеспечивает равномерное покрытие заданной области, показанной на рис. 9:

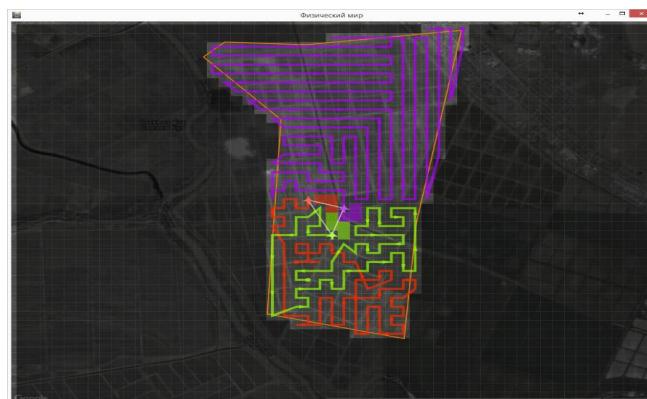


Рис. 9 - Пример сетки облета, сгенерированного на основе грид-системы (Apostolidis, et al., 2023)

Однако, как и в предыдущем случае, построенные маршруты могут быть избыточными и неэкономичными с точки зрения времени и энергозатрат. Метод не учитывает особенности ландшафта и препятствия.

Алгоритм оптимизации роя частиц (PSO).

Еще одним из распространенных алгоритмов является алгоритм оптимизации роя частиц (Particle Swarm Optimization).

Алгоритм оптимизации роя частиц (PSO) использует поведение роя для нахождения оптимальных решений в многомерных пространствах поиска (Muslimov, et al., 2018). PSO довольно легко реализуется, подходит как для непрерывных, так и дискретных задач оптимизации, сравнительно быстро сходится. Однако, как и другие эвристические алгоритмы имеет проблемы с локальными экстремумами оптимизации, то есть «частицы» могут «застрять» в локальных минимумах функции стоимости. Кроме того, качество работы алгоритма существенно зависит эмпирических параметров (коэффициенты обучения, инерционный коэффициент). На рис. 10 показан пример движения нескольких БЛА на сетке из частиц.

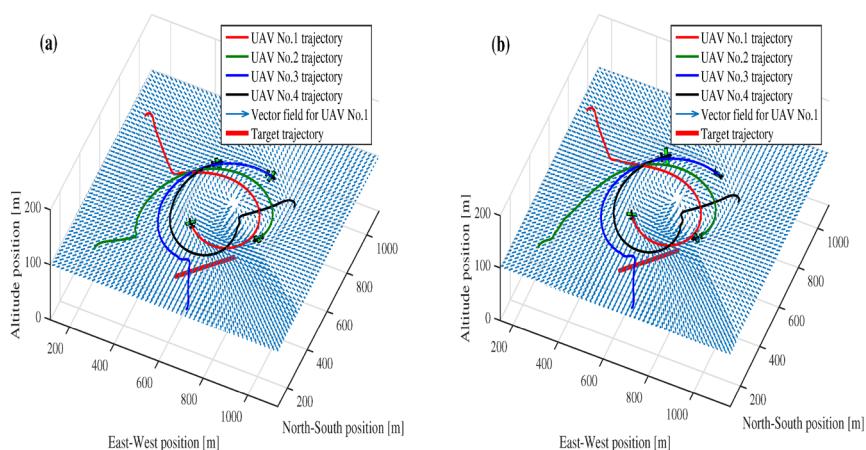


Рис. 10 - Симуляция полёта дронов с использованием PSO (Muslimov et al., 2018)

Алгоритм оптимизации муравьиной колонии (Ant Colony Optimization – ACO) моделирует поведение муравьев в природе для нахождения оптимальных маршрутов (Perez-Carabaza, et al., 2018). По своей сути этот алгоритм предназначен для нахождения кратчайшего маршрута на графе, способен избегать локальных минимумов и может адаптироваться к изменению условий. Однако, для его реализации требуется настройка эвристических параметров. Алгоритм требует значительное количество вычислительных ресурсов. Но самым важным является то этот алгоритм хорошо подходит для минимизации длины маршрута, в случае если задачу можно представить в виде графа. В тоже время его применение для решения задач мониторинга не очевидно.

Также актуальным является использование генетических алгоритмов. Генетический алгоритм (ГА) имитирует дарвиновский принцип естественного отбора. ГА подразумевает наличие некоторых возможных решений, которые обычно называются особями, решениями, хромосомами и т. д. В ходе выполнения ГА размер популяции особей не меняется, а плохие решения (особи) заменяются лучшими с помощью стохастического отбора на основе функции приспособленности (Mirjalili, et al., 2019). Алгоритм использует операторы скрещивания и мутации, которые комбинируют и изменяют хромосомы для создания нового поколения решений. В процессе выполнения алгоритма популяция решений оптимизируется за счет вычисления функции приспособленности, псевдослучайного отбора, скрещивания и мутации в течение множества циклов. По завершении алгоритма в популяции остаются маршруты, обеспечивающие максимальное значение функции приспособленности. Генетические алгоритмы способны находить глобальные оптимальные решения (точнее близкие к ним) в сложных многомерных пространствах поиска, избегая локальных оптимумов. Их можно адаптировать для решения различных типов задач, включая планирование маршрутов, оптимизацию ресурсов, распределение задач. Также как алгоритм муравьиной колонии генетический алгоритм допускает параллельное выполнение операций, то есть скорость его вычислений можно значительно повысить в среде многопроцессорных (многопоточных) систем. Вместе с тем, в стандартных системах эти алгоритмы требуют много времени и, как и для других эвристических алгоритмов, нуждаются в настройке параметров.

Основным недостатком перечисленных эвристических алгоритмов, за исключением генетического, является необходимость подбора некоторых эмпирических параметров. Генетический алгоритм в силу своей гибкости и уникальной способности решать мультикритериальные задачи широко используется для решения задачи планирования миссий БПЛА. В качестве параметров функции приспособленности используются длина маршрута, энергоэффективность (Shivgan, et al., 2020), продолжительность полета (Coombes, et al., 2018), вероятность столкновений. В работе (Mukhamedieva, et al., 2023) предложено формировать функцию приспособленности из расчета полной стоимости миссии нескольких разнородных БЛА совместно с передвижным наземным комплексом обеспечения и управления. В результате был разработан пакет планирования маршрутов движения Swarmown (SwarMown, 2024).

Метод планирования и сопряжения.

Система планирования маршрутов движения Swarmown используются две основные модели: математическую модель маршрута и модель распределения задач. Математическая модель маршрута позволяет находить оптимальные маршруты, минимизируя затраты энергии и времени, а модель распределения задач обеспечивает равномерное распределение задач между дронами, учитывая их технические характеристики и текущее состояние.

Система оперирует следующими основными сущностями: дроны, поля, миссии, путевые точки. Множество путевых точек является результатом оптимизации. По существу, они представляют собой пары – широта-долгота, привязанные к определённой миссии и БПЛА заданного типа, полученные в результате запуска алгоритма оптимизации. Рис. 11 иллюстрирует процесс симуляции маршрута по облёту поля для решения задачи покрытия (границы поля обозначены красным цветом, а маршрут – зелёной ломанной линией, проходящей через красные путевые точки/waypoints).

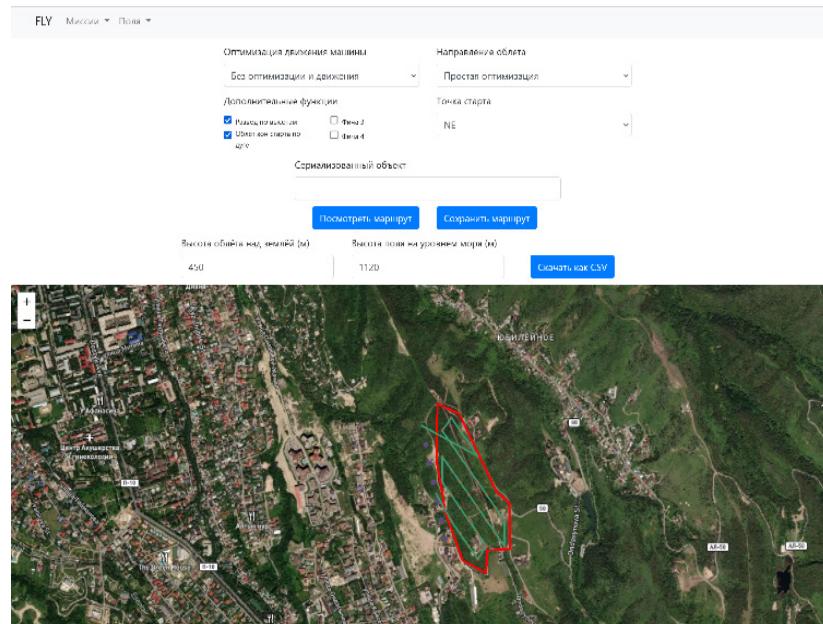


Рис.11 - Процесс симуляции облета в системе Swarmown

Система построена на базе следующего программного стека:

Язык программирования Python 3.11

Веб-Фреймворк Django версии 3.0.3

Фронтенд – Django templates + custom plain JavaScript

База данных PostgreSQL (для локального тестирования и разработки
возможна работа с SQLite)

В качестве библиотеки для решения численных задач оптимизации использовалась библиотека deap версии 1.3. В связи с ограничениями языка Python (невозможность прямой мультипоточности из-за механизма глобальной блокировки интерпретатора (Global Interpreter Lock, GIL)), для запуска оптимизации с использованием нескольких ядер процессора использовалась библиотека scoop версии 0.7.1.1.

Особенностью разработанной системы является то, что её функционирование происходит в двух режимах:

1) Веб-приложение. Веб-интерфейс Swarmown позволяет получать доступ к данным системы, вносить изменения (создавать миссии по облёту территорий, добавлять дроны и т.п.) и проводить визуализацию данных. В этом режиме для развертки в продуктовой среде рекомендуется использование следующих инструментов:

unicorn – WSGI HTTP сервер для масштабирования Django-приложения

nginx – реверс-прокси для настройки доступа к Django приложению, статическим файлам (JavaScript, CSS, изображения и т.п.) и медиафайлам (пользовательские данные).

2) В качестве CLI команды. Оптимизация выполняется на сервере через запуск консольных команд. Оптимизация выполняется сравнительно долго и необходим способ, не зависящий от возможных проблем с сетевым соединением и от ограничений протоколов HTTP/TCP.

Полученные результаты и их обсуждение.

Для преобразования маршрутов, сгенерированных с помощью алгоритмов Swarmown, в формат .plan, была разработана специальная программа-конвертер (PlanMaker). PlanMaker обеспечивает передачу сгенерированного набора путевых точек, записанных в формате csv в программу управления полетом. В качестве программы управления полетом используется QGroundControl, которая, как отмечено выше, является программным обеспечением с открытым исходным кодом, предназначенным для управления БПЛА.

Программа PlanMaker принимает на вход координаты путевых точек и другие параметры полета, представленных в Табл. 1, а на выходе формирует файл .plan, который может быть загружен в QGC.

Табл. 1 - Структура файла, сгенерированного с помощью Swarmown.

lat	lon	height	drone_id	drone_name	drone_model	speed	acceleration	spray_on
43.24595	76.85559	10	203	DJI Phantom 4	DJI Phantom 4	30	0	False
43.24721	76.86647	10	203	DJI Phantom 4	DJI Phantom 4	30	0	True
43.24721	76.86647	10	203	DJI Phantom 4	DJI Phantom 4	30	0	True
...
43.24383	76.86051	10	203	DJI Phantom 4	DJI Phantom 4	30	0	True
43.24447	76.85987	10	203	DJI Phantom 4	DJI Phantom 4	30	0	True
43.24742	76.86383	10	203	DJI Phantom 4	DJI Phantom 4	30	0	False

Структура файла .plan примерно следующая:

```
{
  "fileType": "Plan",
  "geoFence": {
    "circles": [],
    "polygons": [],
    "version": 2
  },
}
```

```

"groundStation": "QGroundControl",
"mission": {
    "cruiseSpeed": 15,
    "firmwareType": 12,
    "globalPlanAltitudeMode": 1,
    "hoverSpeed": 5,
    "items": [
        {
            "autoContinue": true,
            "command": 16,
            "doJumpId": 1,
            "frame": 3,
            "params": [0, 0, 0, null, 43.237004871432, 76.933279371122, 50],
            "type": "SimpleItem"
        }
    ],
    "plannedHomePosition": [43.237004871432, 76.933279371122, 0],
    "vehicleType": 2,
    "version": 2
},
«rallyPoints»: {
    «points»: [],
    «version»: 2
},
«version»: 1
}

```

На рис. 12 показан результат выполнения кода, создающего полётные миссии.

	lat	lon	height	height_global	drone_id	drone_name
0	43.159441	76.802158	450.0	1110.0	203	DJI Phantom 4
1	43.156702	76.819974	450.0	1110.0	203	DJI Phantom 4
2	43.156702	76.819974	450.0	1110.0	203	DJI Phantom 4
3	43.157343	76.819333	450.0	1110.0	203	DJI Phantom 4
4	43.157337	76.818046	450.0	1110.0	203	DJI Phantom 4

	drone_model	speed	acceleration	spray_on
0	DJI Phantom 4	30	0	False
1	DJI Phantom 4	30	0	True
2	DJI Phantom 4	30	0	True
3	DJI Phantom 4	30	0	True
4	DJI Phantom 4	30	0	True

```

Plan file 'bigrectangle_Mod_drone_203.plan' created successfully.
Plan file 'bigrectangle_Mod_drone_204.plan' created successfully.
Plan file 'bigrectangle_Mod_drone_205.plan' created successfully.

```

Рис. 12 - Результат работы программы-конвертера

На рис. 13 представлен один из вариантов полетной миссии загруженный в среду QGroundControl.

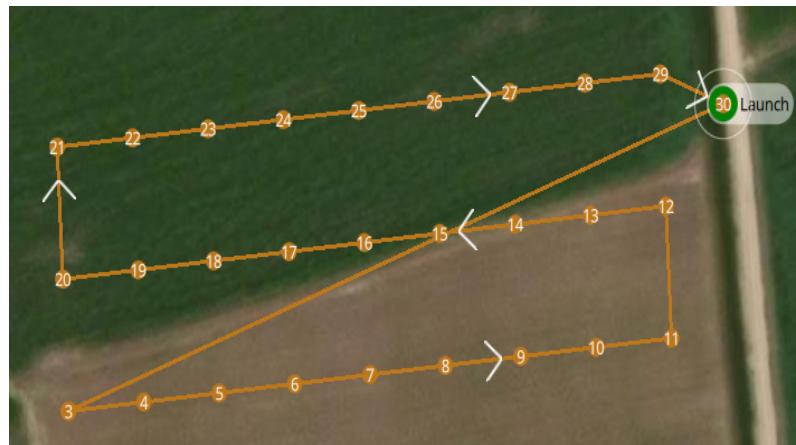


Рис. 13 – Полетная миссия для проверки работы конвертера в реальных условиях

На рис. 14 показан автоматический полет БПЛА, спланированный с помощью Swarmown и переданный в программы управления с помощью PlanMaker.



Рис.14 - Полетная миссия для проверки работы конвертера в реальных условиях

Заключение

В представленной статье рассмотрены основные программные системы и среды управления БПЛА, обеспечивающие планирование полета. Ограничением существующих систем является невозможность планирования миссии нескольких разнородных БПЛА совместно с передвижным наземным комплексом обеспечения и управления. Для решения специальных задач планирования миссий БПЛА применяются алгоритмы роя частиц, муравьиной

колонии, генетический и др. С целью планирования миссии нескольких БПЛА и передвижного наземного комплекса обеспечения и управления разработана система Swarmtown реализующая паттерн движения Замбони.

Полученный результат необходимо было апробировать в реальных условиях.

С этой целью был разработан конвертер плана миссии в формат .plan совместимый с системой управления QGroundControl. Поставленная задача была выполнена. В совокупности полученные модули позволяют выполнить планировании миссии, перенести совокупность путевых точек миссии в QGroundControl и выполнить полеты БПЛА. Полученные результаты описаны в настоящей работе. Несмотря на положительный результат можно отметить некоторые ограничения выполненной работы, которые могут служить целями будущих исследований:

1. В реальных условиях применения планирование миссии должно занимать несколько минут. Разработанное программное обеспечение планирования миссий требует ускорения путем дальнейшего распараллеливания выполнения алгоритма планирования.

2. Конвертер миссии разработан и апробирован только для одной из возможных систем управления полетом. Необходимо оценить возможность и спроектировать подобные конвертеры и для других систем (DroneKit, UgCS, ArduPilot).

Приведенные ограничения тем не менее на критичны. Разработанный комплекс, несмотря на ограничения, можно использовать при планировании миссий группы разнородных БПЛА.

Одной из будущих задач проводимого исследования является интеграция комплекса в состав системы мониторинга производства растительных кормов.

Литература

Apostolidis S.D., Vougiatzis G., Kapoutsis A.C., Chatzichristofis S.A., Kosmatopoulos E.B. (2023). Systematically improving the efficiency of grid-based coverage path planning methodologies in real-world uavs' operations. *Drones*, 7(6). — 399 p. (in Eng.).

Ardupilot - <https://ardupilot.org/planner/docs/common-loading-firmware-onto-pixhawk.html> (Date of access 07.11. 2024) (in Eng.).

Cabreira T.M., Brisolara L.B., Paulo E.J. (2019). Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. *Drones*, 3(1). — 4 p. (in Eng.).

Coombes M., Fletcher T., Chen W. H., Liu C. (2018). Optimal polygon decomposition for UAV survey coverage path planning in wind. *Sensors*, 18(7). — 2132 p. (in Eng.).

Finger R., Swinton S.M., El Benni N., Walter A. (2019). Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11(1), — P.313-335. (in Eng.).

Jasim A.N., Fourati L.C. (2024). Guided genetic algorithm for solving capacitated vehicle routing problem with unmanned-aerial-vehicles. *IEEE Access*, 12. — 106333-106358, (in Eng.).

Kumar K., Kumar N. (2023). Region coverage-aware path planning for unmanned aerial vehicles: A systematic review. *Physical Communication*. — 59 p. — 102073. (in Eng.).

Li J., Sheng H., Zhang J., Zhang H. (2023). Coverage Path Planning Method for Agricultural Spraying UAV in Arbitrary Polygon Area. *Aerospace*. — 10(9). — 755p. (in Eng.).

Mirjalili S. (2019). Evolutionary algorithms and neural networks. Studies in computational intelligence. — 780. — P. 43-53. (in Eng.).

Mukhamediev R.I., Symagulov A., Kuchin Y., Zaitseva E., Bekbotayeva A., Yakunin K., Tabynbaeva L. (2021). Review of some applications of unmanned aerial vehicles technology in the resource-rich country. *Applied Sciences*, 11(21). — 10171p. (in Eng.).

Mukhamediev R. I., Yakunin K., Aubakirov M., Assanov I., Kuchin Y., Symagulov A., Amirkaliyev Y. (2023). Coverage path planning optimization of heterogeneous UAVs group for precision agriculture. *IEEE Access*, 11. — P. 5789-5803. (in Eng.).

Muslimov T. (2023). Particle Swarm Optimization for Target Encirclement by a UAV Formation. *Engineering Proceedings*. — 33(1). — 15p. (in Eng.).

Perez-Carabaza S., Besada-Portas E., Lopez-Orozco J. A., de la Cruz J. M. (2018). Ant colony optimization for multi-UAV minimum time search in uncertain domains. *Applied Soft Computing*, 62. — P. 789-806. (in Eng.).

Plessen M. (2024). Path planning for spot spraying with uavs combining tsp and area coverages. *arXiv preprint arXiv:2408.08001*. (in Eng.).

QGroundControl - <http://qgroundcontrol.com/> (Date of acces 07.11. 2024) (in Eng.).

Shivgan R.,Dong Z. (2020). Energy-efficient drone coverage path planning using genetic algorithm. In 2020 IEEE 21st International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR) (pp. 1-6). IEEE. (in Eng.).

SwarMown. GitHub.URL:<https://github.com/uavkz/SwarMown/tree/dependabot/pip/django-3.2.24> (Date of acces 18.11. 2024) (in Eng.).

Ugcs - <https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs> (Date of acces 07.11. 2024) (in Eng.).

Vélez S., Mier G., Ariza-Sentís M., Valente J. (2025). Integrated framework for multipurpose UAV Path Planning in hedgerow systems considering the biophysical environment. *Crop Protection*. — 187. — 106992. (in Eng.).

Okseenko A.A., Erimbetova A.S., Kuanaev A.A., Muhamediev R.I., Kuchin Y.I. (2024) Tekhnicheskie sredstva distancionnogo monitoringa s pomoshch'yu bespilotnyh letatel'nyh platform. *Izvestiya NAS RK. Series physico-mathematical*. — №3. — P. 152-173. (in Eng.).

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайтах:

www:nauka-nanrk.kz

<http://physics-mathematics.kz/index.php/en/archive>

ISSN2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Директор отдела издания научных журналов НАН РК *А. Ботанқызы*

Редакторы: *Д.С. Аленов, Ж.Ш.Әден*

Верстка на компьютере *Г.Д.Жадыранова*

Подписано в печать 20.06.2025.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать –ризограф.

20,0 п.л. Заказ 2.

Национальная академия наук РК

050010, Алматы, ул. Шевченко, 28, т. 272-13-19