

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

**ACADEMIC SCIENTIFIC
JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE**

**№1
2026**

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



CENTRAL ASIAN ACADEMIC
RESEARCH CENTER



**ACADEMIC SCIENTIFIC
JOURNAL OF COMPUTER
SCIENCE**

1 (357)

JANUARY – MARCH 2026

**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, (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>

MAMYRBAEV 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>

USATOVA Olga Alexandrovna, PhD, Associate Professor, Chief Scientific Secretary of the Institute of Information and Computing Technologies of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

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>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Owner: «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty).

Certificate № **KZ77VPY00121154** on the re-registration of the periodical printed and online publication of the information agency, issued on **05.06.2025** 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.*

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

© «Central Asian Academic Research Center» LLP, 2026

БАС РЕДАКТОР:

МУТАНОВ Ғалымқайыр Мұтанұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506682964>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1423665>

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

КАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәділұлы, (бас редактордың орынбасары), физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының кеңесшісі, зертхана меңгерушісі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

МАМЫРБАЕВ Өркен Жұмажанұлы (ғалым хатшы), Ақпараттық жүйелер саласындағы техника ғылымдарының (PhD) докторы, ҚР ҒЖБМ ҒК «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 Жаңабайұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, 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), Люблин технологиялық университетінің профессоры (Люблин, Польша), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7005121594>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/678586>

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

КЕЙЛАН Әлімхан, техника ғылымдарының докторы, профессор (ғылым докторы (Жапония)), ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының» бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8701101900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1436451>

ХАЙРОВА Нина, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының» бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=37461441200>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1768515>

ОТМАН Мохаммед, PhD, Информатика, Коммуникациялық технологиялар және желілер кафедрасының профессоры, Путра университеті Малайзия (Селангор, Малайзия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

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

УСАТОВА Ольга Александровна, PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҒЖБМ "Ақпараттық және есептеу технологиялары институтының" бас ғалым хатшысы (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

КАПАЛОВА Нұрсұлу Алдажарқызы, техника ғылымдарының кандидаты, ҚР ҒЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты», Киберқауіпсіздік зертханасының меңгерушісі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191242124>,

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина Ұлттық Ғылым академиясының академигі, Қолданбалы 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 Ұлттық Ғылым академиясының академигі (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004159952>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/46249977>

ТИГИНЯНУ 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>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Меншіктеуші: «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС (Алматы).

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасөз басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды қайта есепке қою туралы ҚР Мәдениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі **05.06.2025** ж. берген № **KZ77VPY00121154** Куәлік.

Тақырыптық бағыты: *ақпараттық-коммуникациялық технологиялар*

Қазіргі уақытта: *«ақпараттық-коммуникациялық технологиялар» бағыты бойынша ҚР БҒМ БҒСБК ұсынған журналдар тізіміне енді.*

Мерзімділігі: *жылына 4 рет.*

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

© «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС, 2026

Главный редактор:

МУТАНОВ Галимканр Мутанович, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/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/author/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 Сагпаева (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/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/author/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/author/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/author/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/author/detail.uri?authorId=56036884700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/747649>

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

УСАТОВА Ольга Александровна, PhD, ассоциированный профессор, Главный ученый секретарь «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/author/detail.uri?authorId=57204581062>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/JCO-3058-2023>

КАПАЛОВА Нурсулу Алдажаровна, кандидат технических наук, заведующий лабораторией кибербезопасности РГП «Института информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/author/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/author/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/38481396>

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси (Минск, Беларусь), <https://www.scopus.com/author/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/author/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

Academic Scientific Journal of Computer Science

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Собственник: *ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр» (г. Алматы).*

Свидетельство о постановке на переучет периодического печатного издания, информационного агентства и сетевого издания № **KZ77VPU00121154**. Дата выдачи **05.06.2025**

Тематическая направленность: *информационно-коммуникационные технологии.*

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

Периодичность: *4 раза в год.*

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

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2026

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE

Akhmetova S.T., Yunussova A.A., Alisheva S.S., Olzhataeva B.T., Mussirepova E.B. Social network data mining for automated offensive language detection.....	13
Amanov A.N., Kazbekova G.N., Zhunissov N.M., Abibullayeva A.A., Aben A.B. Artificial intelligence-based intrusion detection for DDOS attacks in Software Defined Networking.....	30
Amanzholova S.T., Ussatova O.A., Mutanov G.M., Mukhanov S.B., Aitmukash D. Backend architecture of a hybrid blockchain-based academic credential verification system.....	52
Amirkhanova G.A., Nurgazy T.N., Amirkhanov B.S., Tokhtassyn M.M., Nurgazy N.N. Developing a predictive digital twin for a food product based on Edge ML and IoT sensors.....	73
Bekarystankyzy A., Ussen D., Kassenkhan A., Chinibayev Y. Cold-start in educational recommender systems: classical and LLM-Era strategies.....	91
Bimoldina Zh., Mussiraliyeva Sh., Bagitova K., Tereikovska L. Detection of cyber-propaganda content using machine learning and semantic models....	106
Chezhimbayeva K.S. Forecasting key 5G network KPIs using MLP and LSTM neural network models.....	129
Dauitbayeva A.O., Konyrbaev N.B., Abildayeva Zh.T., Yessirkepova A.U., Karim N.A. Development of an application to optimize the process of employment of graduates.....	148
Dzhsupbekova G., Othman M., Ordabayeva G. Comparative analysis of artificial intelligence algorithms to detect network attacks.....	167
Issakhov A., Orazmoldayev N., Zharkynbek Y., Abylkassymova A. Numerical modeling of the spread of viral infection by airborne droplets in confined spaces.....	182
Kantureeva M., Omarova G.S., Duisen Z.D., Shekerbek A.A., Tulebayev Y.B. Application of machine learning methods in forecasting and optimizing the processes of evacuation of people in high-rise buildings.....	202
Khusain B., Telmanov M., Khusain A.B., Brodskiy A.R., Sass A.S. Digital twin of an integrated emission purification and decarbonization system for thermal units.....	218
Kulakayeva A., Ashurov A., Zhumazhanov B., Daineko Ye., Zylgara A. Algorithm for determining the initial orbital parameters of KazeEOSat-1 for deorbiting.....	236

Mimenbayeva A.B., Turebayeva R.D., Ospanova T.T., Aruova A.B., Naizagarayeva A.A. Development and comparative analysis of machine learning models for urban traffic prediction.....	253
Naumenko V.V., Mukanova Zh.A., Kiseleva O.V., Maintser D.A., Nerezov A.K. The use of real-time polling to improve student academic performance.....	271
Nazyrova A.E., Kaderkeyeva Z.K., Bekmanova G.T., Milosz M., Lamasheva Zh. Transformation of education through digital technologies: advancing student academic performance across learning stages.....	287
Oralbekova D., Mamyrbayev O., Akhmediyarova A., Kassymova D., Alibiyeva Z. Development of a multi-level model for text summarization based on pretrained models.....	316
Orazbayev B.B., Zhumadillayeva A.K., Kurbangalieva N.B., Yessirkessinov R.Zh., Orazbayeva K.N. Synthesis of linguistic models for assessing sulfur quality and fuzzy modeling of the sulfur production process.....	337
Sarsenbayeva A.K., Rakhimova D.R., Shormakova A.N., Mansurova M.E., Adali E. Application of semantic methods in the field of legislation: an intellectual system for analysis of agglutinative texts.....	354
Serek A., Shoiynbek A., Sharipov K., Kuanyshbay D., Mukhametzhano A. Analysis and classification of telephone fraud based on lexical features of speech transcriptions.....	373
Shynzhigit B.B., Balabekova M.O., Amangeldy T.T. Analysis and forecasting of brick product sales using machine learning models.....	393
Tokhayeva A.O., Alzhanov A.K., Nezh Önal, Ziyatbekova G.Z., Begaliev K.B. Formation of students virtualization competencies in higher education based on Proxmox VE.....	412
Tukenova L.M., Auyelbekov O.A., Sapakova S.Z., Sametova A.A., Bostanov E.L. Modelling and optimisation of hybrid power plant operating modes for unmanned aerial vehicles.....	430
Yerimbetova A., Berzhanova U., Daiyrbayeva E., Sakenov B., Sambetbayeva M. Sign language recognition using temporal convolutional network and MediaPipe.....	443
Zhukabayeva T.K., Benkhelifa E., Mardenov Y.M., Baumuratova D., Karabayev N. Decision support for responding to attacks in cyber-physical industrial internet-of-things systems.....	461

МАЗМҰНЫ

ИНФОРМАТИКА

Ахметова С.Т., Юнусова А.А., Алишева С.С., Олжатаева Б.Т., Мүсірепова Э.Б. Әлеуметтік желідегі бейәдеп пікірлерді автоматты анықтауда деректерді интеллектуалды талдау.....	13
Аманов А.Н., Казбекова Г.Н., Жунисов Н.М., Абибуллаева А.А., Абен А.Б. Бағдарламалық жасақтамамен анықталған желідегі DDOS шабуылдары үшін жасанды интеллектке негізделген шабуылдарды анықтау.....	30
Аманжолова С.Т., Усатова О.А., Мутанов Г.М., Муханов С.Б., Айтмукаш Д. Гибридтік блокчейнге негізделген академиялық сенімдік деректерді тексеру жүйесінің бекендік архитектурасы.....	52
Амирханова Г.А., Нұрғазы Т.Н., Амирханов Б.С., Нұрғазы Н. Н. EDGE ML және IOT сенсорлары негізінде азық-түлік өнімінің предиктивті цифрлық егізін әзірлеу.....	73
Бекарыстанқызы А., Үсен Д., Қасенхан А., Чинибаев Е. Білім беру саласындағы ұсынымдық жүйелеріндегі «Cold-start» мәселесі: классикалық әдістер және LLM дәуірінің стратегиялары.....	91
Бимолдина Ж.А., Мусиралиева Ш.Ж., Багитова К.Б., Терейковская Л.З Кибернасихаттық контентті анықтау үшін машиналық оқыту және семантикалық модельдер қолдану.....	106
Чечимбаева К.С. MLP және LSTM нейрондық желі модельдерін қолдана отырып, 5G желісінің негізгі KPI-лерін болжау.....	129
Дәуітбаева А.О., Қоңырбаев Н.Б., Әбілдаева Ж.Т., Есіркепова А.У., Кәрім Н.Ә. Бітіруші түлектердің жұмысқа орналастыру процесін оңтайландыру үшін қосымша әзірлеу.....	148
Джусупбекова Г., Othman M., Ордабаева Г. Жасанды интеллект алгоритмдерін желілік шабуылдарды анықтау үшін салыстырмалы талдау.....	167
Исахов А.А., Оразмолдаев Н., Жаркынбек Е., Абылкасымова А. Ауа тамшылары арқылы вирустық инфекцияның шектеулі кеңістікте таралуын сандық модельдеу.....	182
Қантүреева М.А., Омарова Г.С., Дүйсен Ж.Д., Шекербек А.Ә., Түлебаев Е.Б. Биік ғимараттардағы адамдарды эвакуациялау процестерін болжау және оңтайландыруда машиналық оқыту әдістерін қолдану.....	202

Хусаин Б., Тельманов М.М., Хусаин А.Б., Бродский А.Р., Сасс А.С. Жылу қондырғыларының шығарындыларын кешенді тазалау және декарбонизациялау жүйесінің цифрлық егізі.....	218
Кулакаева А.Е., Ашуров А.Е., Жумажанов Б.Р., Дайнеко Е.А., Зылғара А.Е. КАZEOSAT-1 ғарыш аппаратының деорбитациясын жүзеге асыру үшін бастапқы орбиталық параметрлерін анықтау алгоритмі.....	236
Мименбаева А.Б., Туребаева А.Д., Оспанова Т.Т., Аруова А.Б., Найзағарасва А.А. Қалалық көлік ағынын болжауға арналған машиналық оқыту модельдерін әзірлеу және салыстырмалы талдау.....	253
Науменко В.В., Муканова Ж.А., Киселева О.В., Майнцер Д.А., Нерезов А.К. Білім алушылардың үлгерімін арттыру үшін real-time сауалнамаларын қолдану.....	271
Назырова А.Е., Кадеркеева З.К., Бекманова Г.Т., Милош М., Ламашева Ж.Б. Цифрлық білім және студенттердің академиялық жетістіктері: деңгейлер бойынша білім беруді дамыту.....	287
Оралбекова Д., Мамырбаев О., Ахмедиярова А., Қасымова Д.З, Алибиева Ж., Алдын ала оқытылған модельдер негізінде мәтінді резюмелеуге арналған көпдеңгейлі модельді әзірлеу.....	316
Оразбаев Б.Б., Жумадиллаева А.К., Курбанғалиева Н.Б., Оразбаева К.Н. Күкірт сапасын бағалаудың лингвистикалық модельдерін синтездеу және күкіртті өндіру процесін бұлыңғыр модельдеу.....	337
Сарсенбаева А.К., Рахимова Д.Р., Шормакова А.Н., Мансурова М.Е., Адали Э. Семантикалық әдістерді заңнама саласында қолдану: агглютинативті мәтіндерді талдауға арналған интеллектуалды жүйе.....	354
Серек А., Шойынбек А., Шарипов К., Қуанышбай Д., Мухаметжанов А. Сөйлеу транскрипцияларының лексикалық белгілеріне негізделген телефон алаяқтықтарын талдау және жіктеу.....	373
Шынжігіт Б.Б., Балабекова М.О., Амангелді Т.Т. Кірпіш өнімдерін сату көлемдерін машиналық оқытуда талдау және болжамдау.....	393
Тохаева А.О., Альжанов А.К., Nezir Ö., Зиятбекова Г.З., Бегалиева К.Б. PROXMOX VE негізінде жоғары оқу орындарында білім алушыларды виртуалдандыру құзыреттерін қалыптастыру.....	412

Төкенова Л.М., Әуелбеков О.А., Сапақова С., Саметова А.А., Бостанов Е.Л.
Пилотсыз ұшу аппараттарына арналған гибриді электр станцияларының жұмыс режимдерін модельдеу және оңтайландыру.....430

Еримбетова А.С., Бержанова У.Г., Дайырбаева Э.Н., Сәкенов Б.Е., Самбетбаева М.А.
Уақытша конволюциялық желі мен media pipe көмегімен ым тілін тану.....443

Жукабаева Т.К., Бенхелифа Э., Марденов Е.М., Баумуратова Д., Карабаев Н.
Киберфизикалық өнеркәсіптік интернет заттары жүйелеріндегі шабуылдарға әрекет ету кезінде шешім қабылдауды қолдау.....461

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА

Ахметова С.Т., Юнусова А.А., Алишева С.С., Олжатаева Б.Т., Мүсірепова Э.Б. Интеллектуальный анализ данных для автоматического выявления языка ненависти в социальных сетях.....	13
Аманов А.Н., Казбекова Г.Н., Жунисов Н.М., Абибуллаева А.А., Абен А.Б. Обнаружение вторжений на основе искусственного интеллекта для DDoS-атак в программно-определяемых сетях.....	30
Аманжолова С.Т., Усатова О.А., Мутанов Г.М., Муханов С.Б., Айтмукаш Д. Бэкенд-архитектура гибридной системы проверки академических достижений на основе блокчейна.....	52
Амирханова Г.А., Нургазы Т.Н., Амирханов Б.С., Нургазы Н.Н. Разработка предиктивного цифрового двойника пищевого продукта на основе Edge ML и IoT-сенсоров.....	73
Бекарыстанқызы А., Үсен Д., Қасенхан А., Чинибаев Е. Холодный старт в системах рекомендаций в области образования: классические подходы и стратегии эпохи LLM.....	91
Бимолдина Ж.А., Мусиралиева Ш.Ж., Багитова К.Б., Терейковская Л. Использование машинного обучения и семантических моделей для обнаружения киберпропагандистского контента.....	106
Чечимбаева К.С. Прогнозирование ключевых KPI сетей 5G на основе нейросетевых моделей MLP и LSTM.....	129
Даутбаева А.О., Конырбаев Н.Б., Абильдаева Ж.Т., Есиркепова А.У., Карим Н.А. Разработка приложения для оптимизации процесса трудоустройства выпускников.....	148
Джусупбекова Г., Othman M., Ордабаева Г. Сравнительный анализ алгоритмов искусственного интеллекта для обнаружения сетевых атак.....	167
Исахов А.А., Оразмолдаев Н., Жаркынбек Е., Абылкасымова А. Численное моделирование распространения вирусной инфекции воздушно-капельным путём в замкнутых помещениях.....	182

Кантуреева М.А., Омарова Г.С., Дүйсен Ж.Д., Шекербек А.Ә., Тулебаев Е.Б. Использование методов машинного обучения для прогнозирования и оптимизации процессов эвакуации людей в высотных зданиях.....	202
Хусаин Б., Тельманов М.М., Хусаин А.Б., Бродский А.Р., Сасс А.С. Цифровой двойник комплексной системы очистки и декарбонизации выбросов тепловых установок.....	218
Кулакаева А.Е., Ашуров А.Е., Жумажанов Б.Р., Дайнеко Е.А., Зылгара А.Е. Алгоритм определения начальных орбитальных параметров KazEOSat-1 для деорбитации.....	236
Мименбаева А.Б., Туребаева А.Д., Оспанова Т.Т., Аруова А.Б., Найзагараева А.А. Разработка и сравнительный анализ моделей машинного обучения для прогнозирования городского трафика.....	253
Науменко В.В., Муканова Ж.А., Киселёва О.В., Майнцер Д.А., Нерезов А.К. Применение опросов в режиме реального времени для повышения успеваемости обучающихся.....	271
Назырова А.Е., Кадеркеева З.К., Бекманова Г.Т., Милош М., Ламашева Ж.Б. Цифровое образование и академическая успеваемость учащихся: межуровневый анализ.....	287
Оралбекова Д., Мамырбаев О., Ахмедиярова А., Касымова Д., Алибиева Ж. Разработка многоуровневой модели для абстрактивного резюмирования текста на основе предварительно обученных моделей.....	316
Оразбаев Б.Б., Жумадиллаева А.К., Курбангалиева Н.Б., Есиркесинов Р.Ж., Оразбаева К.Н. Синтез лингвистических моделей оценки качества серы и нечёткое моделирование процесса её производства.....	337
Сарсенбаева А.К., Рахимова Д.Р., Шормакова А.Н., Мансурова М.Е., Адали Э. Применение семантических методов в юридическом анализе: интеллектуальная система для обработки агглютинативных текстов.....	354
Серек А., Шойынбек А., Шарипов К., Куанышбай Д., Мухаметжанов А. Анализ и классификация телефонного мошенничества на основе лексических признаков речевых транскрипций.....	373
Шынжігіт Б.Б., Балабекова М.О., Амангелді Т.Т. Анализ и прогнозирование объёмов продаж кирпичной продукции с использованием машинного обучения.....	393

Тохаева А.О., Альжанов А.К., Nezih Ö., Зиятбекова Г.З., Бегалиева К.Б.
Формирование компетенций в области виртуализации у обучающихся
в высшем образовании на основе платформы Proxmox VE.....412

Тукенова Л.М., Ауелбеков О.А., Сапакова С.З., Саметова А.А., Бостанов Е.Л.
Моделирование и оптимизация режимов работы гибридных силовых установок
для беспилотных летательных аппаратов.....430

**Еримбетова А.С., Бержанова У.Г., Дайырбаева Э.Н., Сакенов Б.Е.,
Самбетбаева М.А.**
Распознавание языка жестов с использованием временных свёрточных
сетей и MediaPipe4.....43

Жукабаева Т.К., Бенхелифа Э., Марденов Е.М., Баумуратова Д., Карабаев Н.
Поддержка принятия решений при реагировании на атаки в киберфизических
промышленных системах интернета вещей.....461

ACADEMIC SCIENTIFIC JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE
ISSN 1991-346X
Volume 1.
Number 357 (2026). 73–90

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1726.402>

IRSTI 28.23.29
UDC 004.89

© **Amirkhanova G.A., Nurgazy T.N.* , Amirkhanov B.S.,
Nurgazy N.N., 2025.**

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: nurgazytomiris@gmail.com

DEVELOPING A PREDICTIVE DIGITAL TWIN FOR A FOOD PRODUCT BASED ON EDGE ML AND IOT SENSORS

Amirkhanova Gulshat — PhD, associate professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: gulshat.aa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3933-5476>;

Nurgazy Tomiris — Master's student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: nurgazytomiris@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6650-5517>;

Amirkhanov Bauyrzhan — Doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: amirkhanov.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4915-0347>;

Nurgazy Nurbol — Doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: nurgazynurbol1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2858-1176>.

Abstract. This paper examines the research on developing a predictive digital twin for food products, aiming to reduce food losses and establish the basis for intelligent quality management. The extent to which the proposed study is relevant is largely due to the necessity to address the world problem of food loss and the need to introduce the technologies of Industry 4.0 into the agri-food industry. The main idea is to work out a solution in the context of which a product status in real-time will be monitored with the help of edge computing (Edge ML) by means of using the data provided by IoT sensors and forecasting its quality, e.g., the remaining shelf life. The approaches include smart sensors (temperature, humidity, gas level), ESP32 microcontroller as transmitters of collected data, MQTT protocol to transfer data, and Raspberry Pi 5 firmware used to process data in locations. Predictive analysis by use of XGBoost (Extreme Gradient Boosting). The experiments carried out on the Golden Delicious apples showed that the Gradient Boosting model produced very high prediction accuracy because the R² Score was 0.9936 in the training set. These results validate the great potential of Edge ML technology as a means of creating reliable, energy-efficient, and dynamic digital twins based on real-time data. The practical value of the given work is predicated on the fact that

the proposed prototype can serve as the foundation for the creation of commercial monitoring systems. The advantage of such systems is that they would also help producers and retailers manage inventory and logistics proactively, thereby reducing losses due to spoilage and making the food industry more sustainable.

Keywords: digital twin, Edge ML, smart sensors, shelf life prediction, food safety

For citations: Amirhanova G.A., Nurgazy T.N., Amirhanov B.S., Tokhtassyn M.M., Nurgazy N.N. Developing a predictive digital twin for a food product based on Edge ML and IoT sensors. Academic Scientific Journal of Computer Science, 2026. — No.1. – P. 73–90. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1726.402>

Financing. Funding: *This research was funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan grant number BR24992975. “Development of a Digital Twin for the Food Industry Enterprise Using Artificial Intelligence and IIoT Technologies.”.*

© **Амирханова Г.А., Нұрғазы Т.Н.* , Амирханов Б.С.,
Нұрғазы Н. Н., 2025.**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: nurgazytomiris@gmail.com

EDGE ML ЖӘНЕ IOT СЕНСОРЛАРЫ НЕГІЗІНДЕ АЗЫҚ-ТҮЛІК ӨНІМІНІҢ ПРЕДИКТИВТІ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІН ӘЗІРЛЕУ

Амирханова Гульшат — PhD, доцент, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: gulshat.aa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3933-5476>;

Нұрғазы Томирис — магистрант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: nurgazytomiris@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6650-5517>;

Амирханов Бауржан — докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: amirhanov.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4915-0347>;

Нұрғазы Нұрбол — докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

E-mail: nurgazynurbol1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2858-1176>.

Аннотация. Берілген мақала азық-түлік өнімдерінің ысыраптарын азайтуға және сапаны интеллектуалды басқарудың негізін құруға бағытталған азық-түлік өнімдерінің болжамды цифрлық егізін әзірлеу бойынша зерттеулерді қарастырады. Ұсынылып отырған зерттеудің өзектілігі көбінесе азық-түлік бүлінуі әлемдік мәселесін шешу қажеттілігімен және Индустрия 4.0 технологияларын агроазық-түлік өнеркәсібіне енгізу қажеттілігімен байланысты. Негізгі идея - IoT сенсорлары беретін деректерді пайдалану

және оның сапасын болжау арқылы, мысалы, қалған сақтау мерзімін болжау арқылы шеттік есептеулер (Edge ML) көмегімен нақты уақыт режимінде өнім күйі бақыланатын контекстте шешім әзірлеу. Әдістерге смарт сенсорлар (температура, ылғалдылық, газ деңгейі), жиналған деректерді таратқыш ретінде ESP32 микроконтроллері, деректерді тасымалдауға арналған MQTT протоколы және орындарда деректерді өңдеу үшін пайдаланылатын Raspberry Pi 5 микробағдарламасы кіреді. XGBoost (Extreme Gradient Boosting) көмегімен болжамды талдау. «Голден Делишес» алмаларында жүргізілген эксперименттер Gradient Boosting моделі болжамның өте жоғары дәлдігін беретінін көрсетті, себебі оқу жиынында R2 нәтижесі 0,9936 болды. Бұл нәтижелер нақты уақыт деректеріне негізделген сенімді, энергияны үнемдейтін және динамикалық цифрлық егіздерді жасау құралы ретінде Edge ML технологиясының үлкен әлеуетін растайды. Берілген жұмыстың практикалық құндылығы ұсынылған прототиптің коммерциялық мониторинг жүйелерін құру үшін негіз бола алатындығына негізделген. Мұндай жүйелердің артықшылығы, олар өндірушілер мен жеке саудагерлерге тауарлық-материалдық қорлар мен логистиканы белсенді басқаруға көмектеседі, осылайша бүлінуден болатын шығындарды азайтады және тамақ өнеркәсібін тұрақты етеді.

Түйін сөздер: цифрлық егіздер, Edge ML, ақылды сенсорлар, сақтау мерзімін болжау, азық-түлік қауіпсіздігі

© Амирханова Г.А., Нургазы Т.Н.* , Амирханов Б.С.,
Нургазы Н.Н., 2025.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Казахстан.

E-mail: nurgazytomiris@gmail.com

РАЗРАБОТКА ПРЕДИКТИВНОГО ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПИЩЕВОГО ПРОДУКТА НА ОСНОВЕ EDGE ML И ИОТ-СЕНСОРОВ

Амирханова Гульшат — PhD, доцент, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: gulshat.aa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3933-5476>;

Нургазы Томирис — магистрант, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: nurgazytomiris@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6650-5517>;

Амирханов Бауржан — докторант, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: amirkhanov.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4915-0347>;

Нургазы Нурбол — докторант, Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

E-mail: nurgazynurbol1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2858-1176>.

Аннотация. В статье рассматривается разработка предиктивного цифрового двойника пищевого продукта, направленного на сокращение потерь

и формирование основы для интеллектуального управления качеством. Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения глобальной проблемы продовольственных потерь, а также внедрением технологий Индустрии 4.0 в агропродовольственный сектор. Ключевая идея заключается в создании системы, обеспечивающей мониторинг состояния продукта в режиме реального времени с использованием периферийных вычислений (Edge ML) на основе данных, получаемых от сенсоров Интернета вещей, а также прогнозирование его качества, в частности остаточного срока годности. Предложенный подход включает использование интеллектуальных сенсоров (температуры, влажности, газовой среды), микроконтроллера ESP32 для передачи данных, протокола MQTT для их обмена и вычислительного узла на базе Raspberry Pi 5 для локальной обработки информации. Для предиктивного анализа применена модель XGBoost (Extreme Gradient Boosting). Экспериментальные исследования, проведённые на яблоках сорта Golden Delicious, показали высокую точность прогнозирования: коэффициент детерминации R^2 в обучающей выборке составил 0,9936. Полученные результаты подтверждают значительный потенциал технологии Edge ML для создания надёжных, энергоэффективных и адаптивных цифровых двойников, функционирующих в режиме реального времени. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования разработанного прототипа в качестве основы для коммерческих систем мониторинга. Такие системы позволяют производителям и розничным сетям проактивно управлять запасами и логистикой, снижая потери, связанные с порчей продукции, и повышая устойчивость пищевой отрасли.

Ключевые слова: цифровой двойник, Edge ML, умные сенсоры, прогнозирование срока хранения, пищевая безопасность

Кіріспе. Соңғы жылдары Индустрия 4.0 тұжырымдамасының негізгі элементі ретінде цифрлық егіз (ЦЕ) технологиясы зор танымалдылыққа ие болуда. ЦЕ – бұл физикалық нысанның немесе процестің нақты уақыттағы деректер арқылы үнемі жаңартылып отыратын динамикалық виртуалды көшірмесі. Азық-түлік өнеркәсібінде бұл технология өнім сапасын бақылау, ысырапты азайту және процестерді оңтайландыру үшін бірегей мүмкіндіктер ашады. Алайда, тез бұзылатын өнімдер үшін тиімді ЦЕ құрудың негізгі қиындығы – оның жай-күйін статикалық түрде көрсетіп қана қоймай, болашақтағы өзгерістерін, әсіресе жарамдылық мерзімін дәл болжай алуында жатыр. Мұндай предиктивті қабілетсіз цифрлық егіз толыққанды болмайды. Дәстүрлі бұлттық жүйелерде деректерді талдау кідірістерге әкеледі, бұл нақты уақыттағы синхрондауды қиындатады. Бұл мәселені шешу үшін деректерді пайда болған жерінде өңдейтін шеттегі есептеулер (Edge ML) технологиясы қажет.

Осы мақаланың негізгі мақсаты – азық-түлік өніміне арналған цифрлық егіздің предиктивті ядросын құрайтын Edge ML және IoT сенсорларына

негізделген прототипті әзірлеу. Бұл прототип сенсорлардан деректерді жинап, оларды жергілікті деңгейде талдайды және өнімнің қалған сақтау мерзімін жоғары дәлдікпен болжайды. Зерттеу нысаны ретінде алма жемісі алынып, оның сақтау мерзімін болжаудағы жүйенің тиімділігі эксперименталды түрде тексерілді.

Бұл жұмыс Edge ML технологиясының нақты уақыттағы деректерге негізделген сенімді цифрлық егіздерді құрудағы маңызды рөлін көрсетеді. Ұсынылған тәсіл азық-түлік ысырабын азайтуға және өнім сапасын басқаруды жақсартуға мүмкіндік беретін практикалық құрал болып табылады. Мақалада әдебиеттерге шолу, әзірленген прототиптің әдістемесі, алынған нәтижелер және олардың талқылануы ұсынылған.

Әдеби шолу. *Азық-түлік өнеркәсібіндегі цифрлық егіздер тұжырымдамасы.* Цифрлық егіз (ЦЕ) – бұл нақты уақыттағы деректер арқылы өзінің физикалық аналогымен үнемі синхрондалып отыратын, оның жай-күйін, жұмысын және өмірлік циклін сипаттайтын динамикалық виртуалды модель (Abdurrahman and Ferrari, 2025). Соңғы жылдары азық-түлік қауіпсіздігі мен тарату желілерінің тиімділігін арттыру ғаламдық мәселеге айналды. Vitkom цифрлық қауымдастығы мен Германияның тамақ және сусын өнеркәсібі федерациясының (BVE) сауалнамасы (Rohleder and Minhoff, 2019) 300-ден астам сұралған тамақ өнеркәсібі кәсіпорындарының 70%-ы көзден тұтынушыға дейін түпкілікті бақылауды маңызды басымдық деп санайтынын көрсетеді. Жасанды интеллект (AI) негізіндегі болжамдау модельдері азық-түліктің бұзылуын және сақтау мерзімін бағалауда дәстүрлі тәсілдерге қарағанда әлдеқайда тиімді шешімдер ұсынады (Shehzad, 2025). Заттар интернеті (IoT), AI және бұлттық есептеулер сияқты технологияларды біріктіретін ақылды жүйелер (Gupta et al., 2025) ЦЕ-дің толыққанды жұмыс істеуіне негіз болады.

Цифрлық егіздің сенсорлық-коммуникациялық деңгейі. Ақылды сенсорлар физикалық нысанның жай-күйі туралы деректерді жинап, оны цифрлық модельге жеткізетін негізгі құрал болып табылады (Gupta et al., 2025). Сенсорлар мен машиналық оқытуды біріктіретін «интеллектуалды сенсорлар» тұжырымдамасы өндіріс процестерін оңтайландыру үшін бірыңғай негіз ұсынады (Watson et al., 2021). Мұндай жүйелер температура, ылғалдылық, газ концентрациясы сияқты маңызды параметрлерді нақты уақыт режимінде өлшей алады (Baswoju et al., 2023; da Costa et al., 2023; Manimaran et al., 2025). IoT технологиясымен біріктірілген биосенсорларды азық-түлік қаптамаларына енгізу – тамақ қауіпсіздігі мен қадағалануын жақсартудағы маңызды серпіліс болып саналады (Sobhan et al., 2025). Бұл сенсорлар температура, ылғалдылық, қышқылдық (pH) және ұшпа органикалық қосылыстардың концентрациясы сияқты маңызды параметрлерді нақты уақыт режимінде өлшей алады. Мұндай жүйелер деректерді IoT желілері арқылы жіберіп, жеткізу тізбегінің барлық кезеңдерінде проактивті шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді (Sobhan et al., 2025). Көптеген зерттеушілер дрон сияқты IoT құрылғыларын ауыл

шаруашылығында (Kim et al., 2019) және топырақ жағдайын бақылау үшін киілетін сенсорларды (Yin et al., 2021) қолданудың тиімділігін көрсетті. Бұл тәсілдер тұрақты дамуға ықпал етеді. Осы сенсорлардан жиналған деректерді ЦЕ-дің орталық жүйесіне тиімді жеткізу үшін сенімді коммуникациялық протокол қажет. Біздің зерттеу тобымыздың жүргізген салыстырмалы талдауы MQTT over TCP протоколының ең төменгі кідірісті қамтамасыз ететінін көрсетті, бұл нақты уақыттағы ЦЕ үшін аса маңызды (Amirkhanov et al., 2025b).

Цифрлық егіздің аналитикалық және предиктивті ядросы. Машиналық оқыту алгоритмдері цифрлық егіздің аналитикалық ядросын құрайды. Олар сенсорлық деректер негізінде өнімнің сапасын бағалап, жарамдылық мерзімін болжауға мүмкіндік береді. Бұл салада әртүрлі модельдер, соның ішінде конволюциялық нейрондық желілер (CNN) (Baswoju et al., 2023), Random Forest және нейрондық желілер сияқты ансамбльдік әдістер (Manimaran et al., 2025) кеңінен қолданылады. Жалпы алғанда, AI негізіндегі болжамдау модельдері IoT сенсорларынан, спектроскопиядан және қоршаған ортаны бақылаудан алынған көптеген дереккөздерге сүйенеді (Shehzad, 2025). Бұл тәсілдер сақтау шарттарын бақылайтын сенсорлардан алынған деректердегі үлгілер мен аномалияларды анықтауға, сол арқылы азық-түліктің оңтайлы жағдайда сақталуын қамтамасыз етуге көмектеседі (Grazia, 2024). Сонымен қатар, жасанды интеллект (AI) технологияларын қолдану тамақ өнімдерінің қауіпсіздігін, сапасын және қорғалуын жақсартуға мүмкіндік беретін IoT-биосенсорлардың мүмкіндіктерін кеңейтеді (Sobhan et al., 2025). Ақылды орау жүйелері өнімнің бастапқы құрамы, микробтардың өсуі және сақтау шарттары туралы ақпаратты жинақтап, жеткізу тізбегінің барлық қатысушыларына маңызды деректер ұсынады (Rodrigues et al., 2021). Жақында жүргізілген зерттеулер аммиак буының детекциясы арқылы еттің балғындығын нақты уақытта бақылауға болатынын көрсетті (Ranjith et al., 2023). Алайда, машиналық оқыту модельдеріне жіберілетін деректердің қауіпсіздігі мен тұтастығын қамтамасыз ету – цифрлық егіз экожүйесінің маңызды аспектісі. Осы мақсатта, біздің зерттеу тобымыз қашықтан бақылау және қауіпсіздік қатерлерін анықтау үшін деректерді жинау мен сақтаудың кешенді жүйесін құрды (Adilzhanova et al., 2025 a). Сонымен қатар, жиналған деректер негізінде кибершабуылдардың түрлерін ажырату үшін машиналық оқыту алгоритмдері қолданылды (Adilzhanova et al., 2025 b).

Цифрлық егіздің предиктивті функцияларын тиімді іске асыру бірнеше негізгі қағидатты ескеруді талап етеді (Mamarazhabova and Shingisov, 2024; Krupitzer and Noack, 2022). Олардың біріншісі – сенсорлық деректер негізінде өнімнің бұзылу үлгілерін анықтайтын және оның болашақтағы жай-күйін болжайтын машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану болып табылады. Осы болжамның дәлдігін арттыру үшін әр өнімнің ерекшелігіне сай келетін оңтайлы модельді таңдау маңызды.

Сонымен қатар, цифрлық егіздің үздіксіз жұмысын қамтамасыз етуде

энергия тиімділігі шешуші рөл атқарады. Дәл осы жерде шеткі есептеулер (Edge ML) технологиясының артықшылығы көрінеді: ол сенсорлардың деректерді жинау және жіберу жиілігін онтайландыру арқылы энергия тұтынуды азайтуға мүмкіндік береді, бұл жүйенің тұрақты жұмыс істеуіне ықпал етеді.

Осы қағидаттарды біріктіру арқылы сенімді, дәл және энергия тиімді цифрлық егізді құруға болады, бұл өз кезегінде азық-түлік ысырабын азайтып, өнім сапасын басқаруды жақсартады.

Цифрлық егіздің визуализация деңгейі. Талдау нәтижелерін және болжамдарды пайдаланушыға түсінікті түрде ұсыну үшін жоғары сапалы 3D-визуализация қажет. Бұл цифрлық егізбен интерактивті жұмыс істеуге және өндірістік процестерді модельдеуге мүмкіндік береді. Осы мақсатта біздің зерттеу тобымыз Blender бағдарламасын (Amirkhanov et al., 2025a) пайдалана отырып, өндірістік жабдықтың нақты 3D-модельдерін жасау әдістемесін әзірледі. Бұл тәсілдер цифрлық егіздің шынайы және дәл виртуалды көшірмесін жасауға негіз болады.

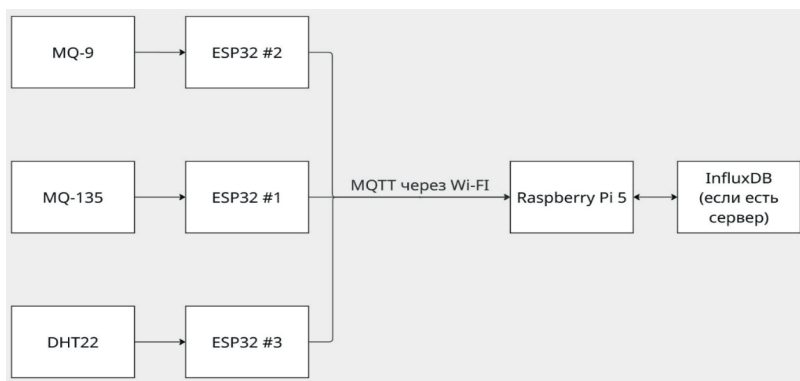
Зерттеудегі ғылыми олқылықты анықтау. Көптеген зерттеулерде модельдер бұлттық ортада жұмыс істейді, бұл кідірістерге және жоғары энергия тұтынуына әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, AI модельдерін енгізуде деректердің аздығы, модель дәлдігінің шектеулі болуы және енгізу құнының жоғары болуы сияқты қиындықтар бар (Shehzad, 2025). Жан-жақты шолулар көрсеткендей, IoT негізіндегі биосенсорларды енгізуде деректердің құпиялылығы, қауіпсіздігі, интеграцияның күрделілігі және энергиямен қамтамасыз ету сияқты бірқатар шешілмеген мәселелер бар (Manimaran et al., 2025). Шеттегі есептеулер деректерді бұлтқа жіберудегі кідірістерді жоюға және энергия тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді, бұл жеткізу тізбегіндегі автономды құрылғылар үшін аса маңызды. Осыған байланысты, біздің зерттеуіміз осы олқылықты толтыруға, яғни сенсорлардан алынған деректерді нақты уақытта өңдейтін, жарамдылық мерзімін болжайтын және энергияны үнемдейтін Edge ML негізіндегі прототипті әзірлеп, оның тиімділігін эксперименталды түрде дәлелдеуге бағытталған. Жоғарыда аталған жұмыстарда біздің зерттеу тобымыз цифрлық егіздің коммуникациялық (Amirkhanov et al., 2025 b), қауіпсіздік (Adilzhanova et al., 2025a, Adilzhanova et al., 2025b) және визуализация (Amirkhanov et al., 2025b) сияқты маңызды компоненттерін қарастырғанымен, оның аналитикалық ядросының, яғни Edge ML негізіндегі предиктивті модулінің практикалық іске асырылуы және эксперименталды түрде дәлелденуі басты назардан тыс қалды. Осыған байланысты, біздің зерттеуіміз осы олқылықты толтыруға бағытталған.

Материалдар мен әдістер. *Зерттеу нысаны және жалпы тәсіл.* Бұл мақала алма жемісінің цифрлық егізінің предиктивті ядросын құруға арналған прототиптік жүйенің әзірленуін қарастырады. Негізгі нәтижелерге смарт сенсорлардан (температура, ылғалдылық, газ концентрациясы) алынған деректерді, шеткі есептеулерде орындалатын машиналық оқыту (Edge ML)

алгоритмдерін біріктіру кіреді. Осының барлығы алма сияқты жемістердің сақталуын басқарудағы негізгі мәселелерді шешуге қабілетті, физикалық нысанның жай-күйін динамикалық түрде болжайтын интеллектуалды жүйені құруға мүмкіндік береді.

Мақалада қолданылатын әдістемелік тәсіл заманауи технологияларды: смарт сенсорларды (MQ-9, MQ-135, DHT22) және шеткі машинаны оқытуды (Edge ML) пайдалана отырып, алманың цифрлық егізінің негізгі компоненті болып табылатын прототипті әзірлеуді қамтиды. Негізгі назар алманың сақталуы кезіндегі ысырапты азайтуды қамтамасыз етуге және физикалық нысанның қалған сақтау мерзімін дәл болжау арқылы оның виртуалды көшірмесін үнемі жаңартып отыруға аударылады. Зерттеу барысында прототиптің аппараттық құрылымы жасалып, деректерді жинау, жіберу (MQTT) және сақтау (InfluxDB) механизмдері іске қосылды, сондай-ақ алманың сақтау мерзімін болжауға арналған XGBoost машиналық оқыту моделі әзірленіп, оның бастапқы өнімділігі бағаланды.

Прототиптің аппараттық құрылымы. Зерттеу барысында физикалық нысанның сақталу ортасының негізгі параметрлерін бақылауға арналған интеллектуалды жүйенің прототипі құрастырылды. Прототиптің жалпы аппараттық архитектурасының схемасы 1-суретте келтірілген.



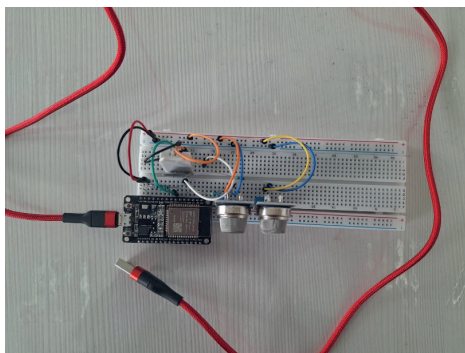
Сурет 1 — Прототиптің аппараттық құрылымының схемасы.

Прототиптің сенсорлық кешені қоршаған ортаның маңызды көрсеткіштерін үздіксіз өлшеуге бағытталған. Атап айтқанда, ауадағы көміртек тотығы (CO) және метан (CH₄) сияқты жанғыш газдардың концентрациясын анықтау үшін MQ-9 газ сенсоры қолданылды. Бұл сенсор CO газын 10 ppm-нен 1000 ppm-ге дейінгі (parts per million) және CH₄ газын 100 ppm-нен 10,000 ppm-ге дейінгі диапазонда анықтауға қабілетті. Жалпы ауа сапасын бағалау және аммиак (NH₃), азот оксидтері (NO_x), алкоголь булары, бензол (C₆H₆) және басқа да ұшпа органикалық қосылыстардың (VOCs) болуын бақылау мақсатында MQ-135 газ сенсоры таңдалды. Қоршаған ортаның температурасы мен салыстырмалы ылғалдылығын өлшеу үшін жоғары дәлдікті қамтамасыз

ететін DHT22 (AM2302) цифрлық сенсоры пайдаланылды. Бұл сенсор температураны -40°C -тан $+80^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі диапазонда $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ дәлдікпен, ал салыстырмалы ылғалдылықты 0%-дан 100%-ға дейінгі RH диапазонында $\pm 2\%$ RH дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді.

Әрбір сенсор тобы жеке ESP32 микроконтроллеріне қосылған. ESP32 микроконтроллерлері сенсорлардан деректерді жинап, алғашқы өңдеуден өткізіп, Wi-Fi желісі арқылы MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) протоколы бойынша орталық өңдеуші құрылғы – Raspberry Pi 5-ке жібереді. Raspberry Pi 5 алынған деректерді сақтау, машиналық оқыту болжамдарын жасау және жалпы жүйені басқару функцияларын атқарады.

Прототиптің бір сенсорлық түйінінің физикалық жүзеге асырылуының мысалы 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2 — ESP32 микроконтроллеріне қосылған MQ-9, MQ-135 және DHT22 сенсорлары бар прототиптік түйіннің құрастырылуы.

2-суретте көрсетілгендей, сенсорлар (екі MQ сериялы газ сенсоры және бір DHT температура/ылғалдылық сенсоры) макет тақтасына орнатылып, ESP32 WROOM-32 даму тақтасына жалғанған. ESP32 микроконтроллері сенсорлардан деректерді жинап, алғашқы өңдеуден өткізіп, Wi-Fi модулі арқылы MQTT протоколы бойынша орталық өңдеуші құрылғы – Raspberry Pi 5-ке жібереді. Прототипті USB кабелі арқылы қуаттандыруға болады. Мұндай бірнеше сенсорлық түйіндерді (1-суретте көрсетілгендей) әртүрлі жерлерге орналастыру арқылы кеңістікте таратылған деректерді жинауға болады.

Деректерді жинау, жіберу және сақтау. Прототиптегі сенсорлық деректерді жинау, орталық өңдеуші құрылғыға жіберу және кейіннен цифрлық егіздің виртуалды моделін жаңарту үшін сақтау процесі бірнеше негізгі технологиялар мен протоколдар арқылы жүзеге асырылды. Әрбір ESP32 микроконтроллері өзіне қосылған сенсорлар кешенінен (MQ-9, MQ-135, DHT22) деректерді жинап отырады. Газ сенсорларынан (MQ-9, MQ-135) алынатын аналогтық сигналдар ESP32-нің кіріктірілген аналогты-цифрлық түрлендіргіші (ADC) арқылы цифрлық мәндерге айналдырылады. DHT22 сенсорынан температура мен ылғалдылық туралы цифрлық деректер тікелей

оқылады. Әрбір ESP32 түйіні жиналған деректерді (сенсор көрсеткіштері, түйін идентификаторы, уақыт белгісі) бірыңғай форматқа келтіреді.

Дайындалған деректер пакеттері ESP32 түйіндерінен Raspberry Pi 5-ке Wi-Fi желісі арқылы MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) протоколы бойынша жіберіледі. MQTT протоколы IoT құрылғылары үшін өзінің жеңілдігімен, сенімділігімен және төмен өткізу қабілеттілігі бар желілерде тиімді жұмыс істеуімен таңдалды. Raspberry Pi 5 құрылғысында Mosquitto сияқты ашық кодты MQTT брокері орнатылған. Әрбір ESP32 түйіні өзінің деректерін белгілі бір MQTT тақырыбына жариялайды, ал Raspberry Pi-дегі Python скрипті осы тақырыптарға жазылып, хабарламаларды қабылдайды. 3-суретте Raspberry Pi-де жұмыс істейтін Python скриптінің MQTT брокерінен foodchain/esp32_node_1/data тақырыбы арқылы келіп түскен хабарламаны (`{«node_id»:«esp32_node_1», «temperature»:29.1, «humidity»:33.8, «mq9_raw»:188, «mq135_raw»:187}`) қабылдау процесі көрсетілген. Raspberry Pi-дегі Python скрипті MQTT арқылы қабылданған деректерді талдап, оларды InfluxDB уақыттық қатарлар дерекқорына сақтайды. InfluxDB сенсорлық деректерді уақыт белгілерімен тиімді сақтауға, оларға жылдам сұраныстар жасауға және визуализациялауға өте ыңғайлы болғандықтан таңдалды. Терминал шығысында (Сурет 3) көрсетілгендей, шикі сенсорлық деректер InfluxDB-дағы sensor_readings деп аталатын өлшемге жазылады. Бұл өлшемде node_id сияқты тегтер және temperature, humidity, mq9_raw, mq135_raw сияқты өрістер қолданылады. Машиналық оқыту моделі арқылы жасалған болжамдар бөлек shelf_life_predictions өлшеміне сақталады. Деректерді InfluxDB-ға жазу үшін InfluxDB-Client Python кітапханасы пайдаланылды. Бастапқыда, деректерді жазу кезінде кейбір өрістер үшін типтердің сәйкес келмеуіне («field type conflict») байланысты қателіктер туындады; бұл мәселе деректерді InfluxDB-ға жіберер алдында барлық сандық сенсорлық көрсеткіштерді float типіне алдын ала түрлендіру арқылы шешілді.

```

user@pi4:~/codes/tom_1_rice $ python3 mqtt_to_influx.py
Успешно подключено к InfluxDB, база данных: food_supply_chain
ML пайллайн '/home/user/codes/tom_1_rice/gradient_boosting_shelf_life_pipeline.pkl' успешно загружен.
Модель ожидает на вход следующие колонки (до препроцессинга): ['product_type', 'temperature', 'humidity', 'mq9_raw', 'mq135_raw', 'storage_condition_scenario']

Политка подключения к MQTT брокеру localhost:1883...
Успешно подключено к MQTT брокеру!
Успешная подписка на топик: [('foodchain/esp32_node_1/data', 0), ('foodchain/esp32_node_2/data', 0)]

Получено сообщение: '{"node_id":"esp32_node_1","temperature":29.1,"humidity":33.8,"mq9_raw":188,"mq135_raw":187}' из топика 'foodchain/esp32_node_1/data'
Сырые данные от 1 записаны в InfluxDB (sensor_readings).
Данные для предсказания (DataFrame):
  product_type  temperature  humidity  mq9_raw  mq135_raw  storage_condition_scenario
0  default_milk           29.1         33.8         188         187             ideal_refrigeration
ML Предсказание (оставшийся срок годности, дней) для 1: 3.94
Предсказание ML для 1 записано в InfluxDB (shelf_life_predictions).

Получено сообщение: '{"node_id":"esp32_node_1","temperature":29.1,"humidity":33.8,"mq9_raw":189,"mq135_raw":187}' из топика 'foodchain/esp32_node_1/data'
Исключение при записи сырых данных в InfluxDB: 400: {"error":"partial write: field type conflict: input field \"temperature\" on measurement \"sensor_readings\" is type integer, already exists as type float dropped=1"}
Данные для предсказания (DataFrame):
  product_type  temperature  humidity  mq9_raw  mq135_raw  storage_condition_scenario
0  default_milk           29         33.8         189         187             ideal_refrigeration
ML Предсказание (оставшийся срок годности, дней) для 1: 3.94
Исключение при записи предсказания ML в InfluxDB: 400: {"error":"partial write: field type conflict: input field \"input_temp\" on measurement \"shelf_life_predictions\" is type integer, already exists as type float dropped=1"}
^C
Скрипт остановлен пользователем.
Отключается от MQTT брокера...
Отключено от MQTT брокера.
user@pi4:~/codes/tom_1_rice $

```

Сурет 3 — MQTT арқылы деректерді қабылдау, ML болжамын жасау және InfluxDB-ға жазу процесінің терминал шығысының мысалы.

Машиналық оқыту моделін әзірлеу. Алма жемісінің тоңазытқыш жағдайындағы қалған сақтау мерзімін дәл болжау мақсатында осы өнім түріне мамандандырылған машиналық оқыту (ML) моделі әзірленді. Бұл процесс арнайы лабораториялық жағдайда деректер жиынтығын қалыптастырудан, маңызды белгілерді таңдаудан, модельді оқытудан, оның гиперпараметрлерін оңтайландырудан және алынған модельдің өнімділігін жан-жақты бағалаудан тұрды.

Модельді оқыту үшін арнайы лабораториялық жағдайда жиналған деректер жиынтығы пайдаланылды. Экспериментке «Голден Делишес» алма сортының 28 данасы алынды. Барлық алмалар стандартты тоңазытқыш жағдайына орналастырылды, мұнда температура 0°C-тан +5°C-қа дейінгі аралықта және салыстырмалы ылғалдылық 89-98,5% RH деңгейінде бақыланды. Бұл бақыланатын орта физикалық нысанның жай-күйі туралы сенімді деректер алуға мүмкіндік берді. Әрбір алманың жанына MQ-9, MQ-135 және DHT22 сенсорлары орнатылды. Деректерді жинау 2025 жылдың 5 мамырынан 2025 жылдың 6 маусымына дейінгі аралықта, демалыс күндерін қоспағанда, жұмыс күндері сағат 9:00-ден 18:00-ге дейін әрбір 30 минут сайын автоматты түрде жүргізілді. Осылайша, әр жұмыс күні бір алмадан 18 дерек нүктесі жиналды. Нәтижесінде, алмалардан 12545 жазба алынды және әр жазба 10 белгіден тұрды.

Модельге кіріс ретінде температура, салыстырмалы ылғалдылық, MQ-9 сенсорының шикі көрсеткіші, MQ-135 сенсорының шикі көрсеткіші, уақыттық факторлар, әрбір алманың нөмірі, сақтау мерзімі қарастырылған. Мақсатты айнымалы ретінде алманың нақты қалған сақтау мерзімі алынды. Нақты қалған сақтау мерзімі әрбір өлшеу сәтіндегі күннен бастап, алманың қаптамасында көрсетілген жарамдылық мерзімінің соңғы күніне дейінгі қалған күндер санын есептеу арқылы анықталды. Деректер жиынтығы модельді оқытуға дайындау үшін деректерді стандарттау, жетіспейтін мәндерді медианамен толтыру, секілді қажетті алдын ала өңдеу қадамдарынан өтті. Бұл процестер Scikit-learn кітапханасының Pipeline және ColumnTransformer құралдары арқылы жүзеге асырылып, оқытылған пайплайнға енгізілген.

Алманың қалған сақтау мерзімін болжау үшін XGBoost (Extreme Gradient Boosting) Regressor алгоритмі таңдалды. Бұл алгоритм цифрлық егіздің предиктивті моделі ретінде өзінің жоғары дәлдігімен, есептеу жылдамдығымен және күрделі тәуелділіктерді анықтау қабілетімен ерекшеленеді. Модельдің гиперпараметрлерін оңтайландыру және ең жақсы параметрлер жиынтығын табу үшін Scikit-learn кітапханасындағы RandomizedSearchCV әдісі қолданылды. Жиналған деректертердің 80%-ы оқытуға, ал қалған 20% тестілеуге бөлінді.

Модельдің өнімділігін оқыту және тестілеу жиынтықтарында бағалау үшін орташа квадраттық қателік (MSE), түбірлік орташа квадраттық қателік (RMSE) және детерминация коэффициенті (R^2 Score) сияқты стандартты регрессиялық

метрикалар пайдаланылды. Барлық деректерді өңдеу, модельдерді оқыту, оңтайландыру және бағалау Python бағдарламалау тілінде, негізінен Pandas, NumPy және Scikit-learn, XGBoostRegressor кітапханаларын қолдану арқылы жүзеге асырылды.

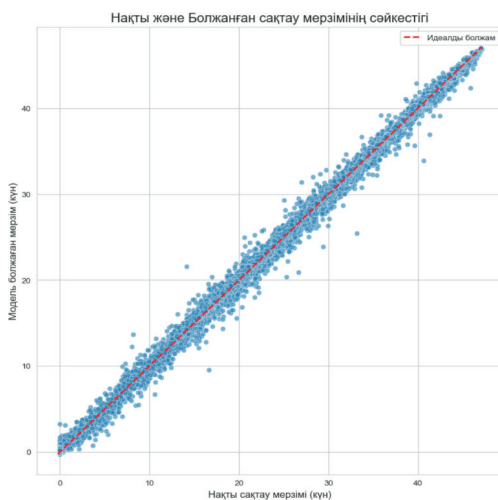
Нәтиже. *Предиктивті модельдің өнімділігін бағалау.* Өзірленген цифрлық егіздің предиктивті ядросының, яғни XGBoost моделінің алманың қалған сақтау мерзімін болжаудағы өнімділігі тестілеу жиынтығында бағаланды. Алынған нәтижелер кесте 1-де келтірілген.

Кесте 1 — Алманың сақтау мерзімін болжауға арналған XGBoost моделінің өнімділік көрсеткіштері

Деректер жиынтығы	MSE	RMSE	R ² Score
Оқыту деректері	0.2557	0.5057	0.9982
Тест деректері	0.9008	0.9491	0.9936

Кесте 1-ден көрініп тұрғандай, XGBoost моделі тестілеу жиынтығында жоғары өнімділік көрсетті. R² Score мәнінің 0.9936-ға тең болуы виртуалды модельдің физикалық нысанның жай-күйінің дисперсияның 99.36%-ын өте жоғары дәлдікпен түсіндіре алатынын көрсетеді. RMSE көрсеткіші (0.9491 күн) болжамның орташа қателігі шамамен ±0.95 күнді құрайтынын білдіреді, бұл алма сияқты жемістің сақтау мерзімін болжау үшін өте жақсы нәтиже болып табылады. Оқыту және тестілеу жиынтықтарындағы көрсеткіштердің жақын болуы модельдің артық оқытылуға ұшырамағанын көрсетеді.

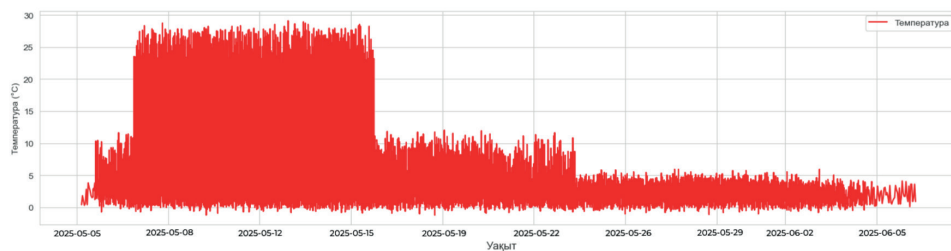
Модельдің болжамдарының нақты мәндерге сәйкестігі сурет 4-те көрнекі түрде бейнеленген. Графиктен көрініп тұрғандай, нүктелердің басым көпшілігі идеалды болжам сызығының айналасында тығыз орналасқан, бұл предиктивті модельдің жоғары дәлдігін растайды.



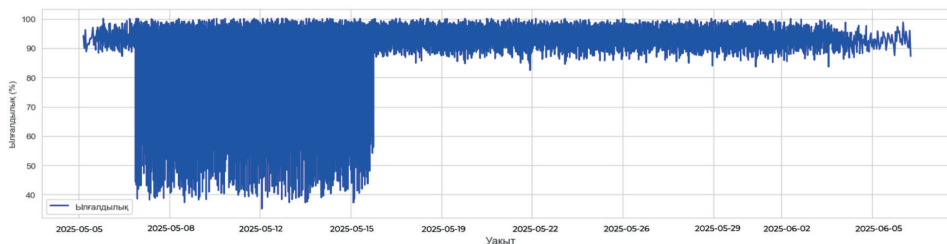
Сурет 4 — Нақты және болжанған сақтау мерзімінің сәйкестігі.

Белгілердің маңыздылығын талдау және деректер динамикасы. Эксперимент барысында жиналған деректердің уақыттық динамикасы және негізгі факторлардың сақтау мерзіміне әсері цифрлық егіздің болжам жасау логикасын түсіну үшін жан-жақты зерттелді.

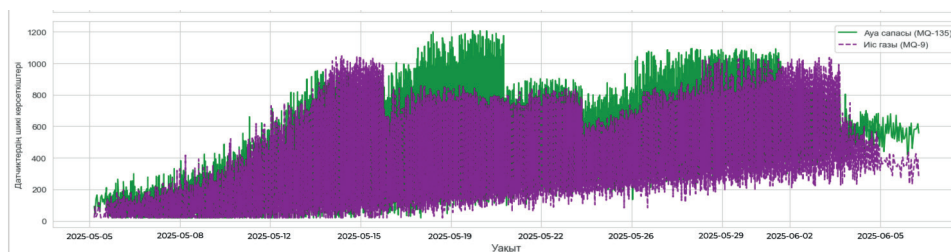
Сурет 6-да негізгі сенсорлық көрсеткіштердің алманың сақталуы кезіндегі уақыт бойынша өзгеруі келтірілген. Алғашқы кезеңде температура шамамен +25°C деңгейінде болса (сурет 5.1), кейіннен ол тоңазытқыш жағдайына сәйкес 0°C-ге дейін төмендеген. Ылғалдылық көрсеткіші де осыған сәйкес өзгерген (сурет 5.2). Сурет 5.3-те MQ-135 (жалпы ауа сапасы) және MQ-9 (иіс газы) сенсорларының көрсеткіштерінің уақыт өте келе біртіндеп арту үрдісі байқалады. Бұл алманың пісуі немесе бұзылу процесі кезінде ұшпа органикалық қосылыстардың бөлінуімен байланысты болуы мүмкін және бұл деректердің машиналық оқыту моделі үшін маңызды екенін көрсетеді.



Сурет 5.1.



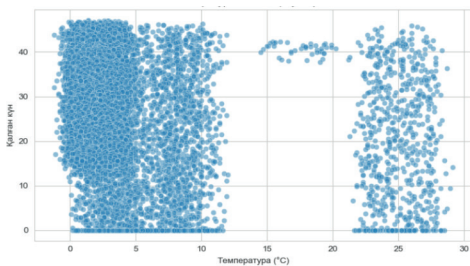
Сурет 5.2.



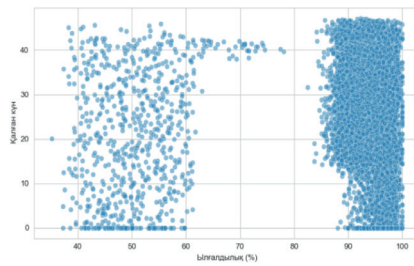
Сурет 5.3.

Сурет 5 — Алманың сақталуы кезіндегі негізгі сенсорлық көрсеткіштердің уақыттық динамикасы: (5.1) Температура (°C), (5.2) Салыстырмалы ылғалдылық (%), (5.3) Газ сенсорларының шикі көрсеткіштері.

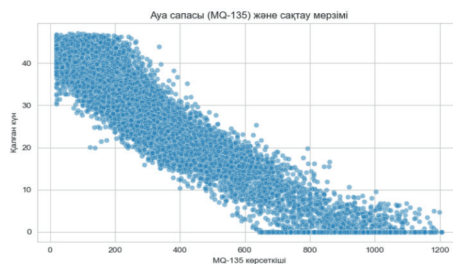
Машиналық оқыту моделінің болжамдарына негіз болған факторлардың сақтау мерзіміне тікелей әсерін бағалау үшін олардың арасындағы тәуелділіктер зерттелді. Сурет 6-де келтірілген шашыранды диаграммалар әрбір негізгі фактор мен алманың қалған сақтау мерзімі арасындағы корреляцияны көрнекі түрде бейнелейді. Температура мен сақтау мерзімі арасында айқын теріс корреляция байқалады. Температураның жоғарылауы сақтау мерзімінің қысқаруына әкеледі. Ылғалдылықтың әсері біркелкі емес, бірақ жоғары ылғалдылық (90-100%) ұзағырақ сақтау мерзімімен байланысты екенін көруге болады, ал төменірек ылғалдылық (40-60%) қысқа мерзімдерге сәйкес келеді. MQ-135 және MQ-9 газ сенсорларының шикі көрсеткіштерінің артуы сақтау мерзімінің айтарлықтай төмендеуімен тығыз байланысты. Бұл газ концентрациясының алманың бұзылу дәрежесінің маңызды индикаторы екенін растайды және цифрлық егіздің предиктивті моделінің неліктен бұл белгілерге жоғары маңыздылық бергенін түсіндіреді.



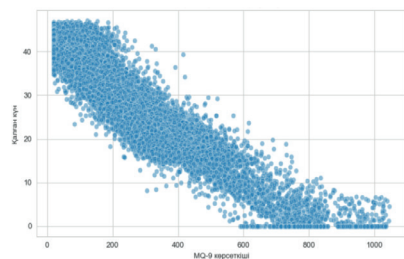
Сурет 6.1.



Сурет 6.2.



Сурет 6.3.



Сурет 6.4.

Сурет 6 — Негізгі сенсорлық параметрлердің алманың қалған сақтау мерзіміне әсерінің шашыранды диаграммалары: (6.1) Температура (°C), (6.2) Салыстырмалы ылғалдылық (%), (6.3) MQ-135 сенсорының шикі көрсеткіші, (6.4) MQ-9 сенсорының шикі көрсеткіші.

Талқылау. *Жалпы талқылау және шектеулер.* Алынған нәтижелер ұсынылған архитектураның және XGBoost моделінің алманың сақтау мерзімін болжаудағы жоғары потенциалын көрсетеді. Әсіресе, газ сенсорларының көрсеткіштерінің болжам үшін маңыздылығы жоғары болуы, мұндай сенсорларды азық-түлік сапасын бақылауда қолданудың тиімділігін растайды.

Жалпы, әзірленген интеллектуалды цифрлық егіздің дәстүрлі жүйелермен салыстырғандағы артықшылықтары кесте 2-де келтірілген. Алынған

нәтижелер көрсеткендей, ұсынылған прототип нақты уақыттағы деректерді талдауға, бұзылу қаупін ерте болжауға және динамикалық бағалауға мүмкіндік береді, бұл оның жоғары потенциалын растайды.

Кесте 2 — Дәстүрлі және ақылды жүйелерді салыстыру

Функционалдылық	Дәстүрлі жүйе	Интеллектуалды ЦЕ
Нақты уақыттағы деректерді талдау	Жоқ	Иә (Edge)
Предиктивті талдау	Жоқ	Иә
Жарамдылық мерзімін динамикалық бағалау	Жоқ	Иә
Энергия тұтыну	Жоғары	Төмен (адаптивті)
Автоматтандырылған шешім қабылдау	Жоқ	Иә
Толыққанды ЦЕ-ге негіз бола алуы	Жоқ	Иә
Өзін-өзі оқыту мүмкіндігі	Жоқ	Иә

Дегенмен, бұл зерттеудің бірнеше шектеулері бар. Біріншіден, деректер тек бақыланатын бір ғана физикалық ортада жиналды. Екіншіден, мақсатты айнымалы ретінде статикалық жарамдылық мерзімі алынды, бұл нақты физикалық бұзылу уақытынан өзгеше болуы мүмкін. Үшіншіден, деректерді жинау тек жұмыс уақытымен шектелді. Бұл шектеулер болашақ зерттеулерде ескерілетін болады.

Бұл жұмыстың практикалық маңыздылығы – азық-түлік қауіпсіздігін арттыруға және ысырапты азайтуға мүмкіндік беретін, нақты жағдайларда қолдануға болатын цифрлық егіздің негізгі компонентін жасауда жатыр. Сонымен қатар, ол интеллектуалды азық-түлік жүйелері мен тұрақты даму саласындағы одан әрі зерттеулерге негіз бола алады.

Болашақ жұмыс және зерттеу жоспары. Бұл зерттеуде біз азық-түлік өнімінің жарамдылық мерзімін болжайтын, Edge ML негізіндегі предиктивті цифрлық егіздің алғашқы прототипін сәтті әзірлеп, сынақтан өткіздік. Ұсынылған прототип осы процестің негізгі элементтерін – ақылды сенсорлар арқылы деректерді жинауды және Edge ML арқылы оны жергілікті деңгейде талдауды іске асырудың алғашқы қадамы болып табылады. Ол сурет 7-де көрсетілген интеллектуалды бақылаудың жалпы концепциясына сәйкес келеді..



Сурет 7 - Цифрлық егіз негізіндегі интеллектуалды бақылау процесі.

Біздің жұмысымыз сурет 8-да сипатталған көп деңгейлі архитектураның 0-деңгейін (Өнім қабаты) және 1-деңгейін (Реактивті қабат) іске асыруға бағытталған. Біздің прототип ақылды сенсорлар арқылы физикалық нысанның жай-күйін бақылап (0-деңгей), Edge ML арқылы оған қатысты реактивті болжам жасайды (1-деңгей).



Сурет 8 — Азық-түлік өніміне арналған цифрлық егіздің көп деңгейлі архитектурасы.

Осыған қарамастан, толыққанды, өзін-өзі жетілдіретін цифрлық егізді құру үшін бұл жұмысты одан әрі дамыту қажет. Болашақ зерттеулеріміздің негізгі бағыты – әзірленген модельдің жалпылама қабілетін арттыру. Бұл үшін прототипті әртүрлі азық-түлік өнімдерімен (мысалы, сүт өнімдері, ет) және әртүрлі сақтау жағдайларында, соның ішінде тасымалдау мен қоймада сынақтан өткізу жоспарлануда.

Келесі маңызды қадам – архитектураның жоғарғы деңгейлерін іске асыру болып табылады. Біз Edge-дегі модельді бұлттық платформамен (2-деңгей) біріктіруді мақсат етеміз. Бұл бірнеше ЦЕ-ден жиналған деректерді орталықтандырылған түрде талдауға, модельді үнемі жаңартып отыруға және сенсорлық қателерді анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, предиктивті модельдің нәтижелерін біздің зерттеу тобымыз әзірлеген 3D-модельдермен (Amirkhanov et al., 2025a) біріктіру арқылы толыққанды интерактивті цифрлық егіз құрылады.

Бұдан бөлек, жүйенің функционалдығын кеңейту үшін екіжақты байланысты іске асыру көзделуде. Қазіргі прототип тек бақылау функциясын атқарса, болашақта цифрлық егіздің болжамдары негізінде физикалық ортаға әсер ететін механизмдерді (мысалы, тоңазытқыштың температурасын және ылғалдылықты автоматты түрде реттеу) қосу жоспарлануда. Бұл жүйені реактивті модельден проактивті басқару жүйесіне айналдырады.

Соңғы кезеңде, прототипті лабораториялық жағдайдан шығарып, нақты өнеркәсіптік серіктестермен бірлесіп, шынайы өндіріс ортасында өнеркәсіптік апробациядан өткізу қажет. Бұл қадамдар біздің бастапқы зерттеуімізді кеңейтіп, азық-түлік сапасын басқаруға арналған толыққанды, коммерциялық тұрғыдан тиімді және кең ауқымды цифрлық егіз платформасын құруға берік негіз болады.

Қорытынды. Осы зерттеуде ақылды сенсорлар, Edge ML және IoT технологияларына негізделген азық-түлік өнімінің предиктивті цифрлық егізінің прототипі сәтті әзірленіп, сыналды. Эксперименталды сынақтар барысында XGBoost моделі алманың қалған сақтау мерзімін болжауда R² Score бойынша 0.9936 көрсеткішімен өте жоғары дәлдікке қол жеткізді. Бұл виртуалды модельдің физикалық нысанның болашақтағы жай-күйін жоғары сенімділікпен болжай алатынын дәлелдейді және оның нақты жағдайларда практикалық қолдану әлеуетін растайды.

Бұл нәтижелер ұсынылған архитектураның азық-түлік ысырабын азайтуға және сақтау процестерін оңтайландыруға зор мүмкіндігі бар екенін көрсетеді. Әзірленген цифрлық егіз нақты уақыттағы деректерді талдау, бұзылу қаупін ерте болжау және жарамдылық мерзімін динамикалық бағалау сияқты дәстүрлі жүйелерде жоқ маңызды артықшылықтар ұсынады.

Зерттеудің кейбір шектеулеріне қарамастан, бұл жұмыс болашақта толыққанды, көпфункционалды цифрлық егіз платформасын құруға берік негіз қалайды. Келесі қадамдарға деректердің тұтастығы мен қадағалануын қамтамасыз ету үшін блокчейн технологиясын біріктіру, сондай-ақ прототипті нақты өнеркәсіптік жағдайларда сынау кіреді.

References

Abdurrahman E.E.M., Ferrari G. (2025) Digital Twin applications in the food industry: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. — 1538375 p. (in Eng.)

Adilzhanova S., Kunelbayev M., Amirkhanova G., Tyulepberdinova G., Sybanova D. (2025a) Analysis of the dynamics of cyberattacks and fraud methods using machine learning algorithms for IIoT: Information security of digital twins in Industry 4.0. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8(2)7 — P. 4012-4026. (in Eng.)

Adilzhanova S., Kunelbayev M., Amirkhanova G., Zhussupov Y., Tortay A. (2025b) Development of a data collection and storage system for remote monitoring and detection of security threats in the enterprise. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8(2). — P. 176-196. (in Eng.)

Amirkhanov B., Nurgazy T., Amirkhanova G., Kunelbayev M., Tyulepberdinova G. (2025a) Creating 3D models of production equipment and infrastructure using Blender. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8(1). — P. 1572-1588. (in Eng.)

Amirkhanov B., Amirkhanova G., Kunelbayev M., Adilzhanova S., Tokhtassyn M. (2025b) Evaluating HTTP, MQTT over TCP and MQTT over WEBSOCKET for digital twin applications: A comparative analysis on latency, stability, and integration. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8(1). — P. 679-694. (in Eng.)

Baswoju S.P., Latha Y., Changala R., Gummadi A. (2023) Development of CNN Model to Avoid Food Spoiling Level. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 9(5). — P. 261-268. (in Eng.)

da Costa T.P., Gillespie J., Cama-Moncunill X., Ward S., Condell J., Ramanathan R., Murphy F. (2023) A Systematic Review of Real-Time Monitoring Technologies and Its Potential Application to Reduce Food Loss and Waste: Key Elements of Food Supply Chains and IoT Technologies. *Sustainability*, 15(1). — 614 p. (in Eng.)

Grazia J. (2024) Advancing the Food Industry: The Integration of Detection Technologies and Machine Learning for Improved Efficiency and Sustainability. *Journal of Food Processing and Technology*, 15, — 1134 p. (in Eng.)

Gupta V.K., Han S., Xiao J., Huh Y.S. (2025) Use of Future-Oriented Smart Sensors in Food Distribution and Safety Networks. *Food Chemistry International*, 1, — P. 6-10. (in Eng.)

Kim J., Kim S., Ju C., Son H.I. (2019) Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications. *IEEE Access*, 7, 105100-105115. (in Eng.)

Krupitzer C., Noack T., Borsum C. (2022) Digital Food Twins Combining Data Science and Food Science: System Model, Applications, and Challenges. *Processes*, 10(9). — 1781 p. (in Eng.)

Mamarazhabova B.A., Shingisov A.U. (2024) Issledovanie vozmozhnosti ispolzovaniya iskusstvennogo intellekta dlya optimizatsii protsessov proizvodstva i khraneniya produktov [A study of the possibility of using artificial intelligence to optimize production and storage processes]. *Ekonomika i sotsium*, 3(118)-2. — P. 684-687. (in Russian).

Manimaran M., Aniji M., Arthi K., Priya V.V., Maheswari S., Jeevitha S., Yogeshwari M. (2025) Enhanced Internet of Things-Based Intelligent Sensors for Instantaneous Food Quality Monitoring using Deep Neural Network. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(35s). — 6050 p. (in Eng.)

Ranjith K.S., Ghoreishian S.M., Park B., Lee H., Chodankar N.R., Raju G.S.R., Huh Y.S., Han Y.K. (2023) Fluorescence light-up electrospun membrane incorporated with perovskite nanoclusters as a highly sensitive colorimetric probe for detection of amine vapors during food spoilage. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 384. — 133622 p. (in Eng.)

Rodrigues C., Souza V.G.L., Coelho I., Fernando A.L. (2021) Bio-Based Sensors for Smart Food Packaging—Current Applications and Future Trends. *Sensors*, 21(6). — 2148 p. (in Eng.)

Rohleder B., Minhoff C. (2019) Bitkom/Federation of German Food and Drink Industries. URL: <https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-03/Bitkom-Charts%20190326%20Digitalisierung%20der%20Ern%C3%A4hrungsindustrie.pdf>. (in Ger.)

Shehzad K. (2025) Predictive AI Models for Food Spoilage and Shelf-Life Estimation. *Global Trends in Science and Technology*, 1(1). — P. 75-94. (in Eng.)

Sobhan A., Hossain A., Wei L., Muthukumarappan K., Ahmed M. (2025) IoT-Enabled Biosensors in Food Packaging: A Breakthrough in Food Safety for Monitoring Risks in Real Time. *Foods*, 14(8). — 1403 p. (in Eng.)

Watson N.J., Bowler A.L., Rady A., Fisher O.J., Simeone A., Escrig J., Woolley E., Adedeji A.A. (2021) Intelligent Sensors for Sustainable Food and Drink Manufacturing. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. — 642786 p. (in Eng.)

Yin H., Cao Y., Marelli B., Zeng X., Mason A.J., Cao C. (2021) Soil Sensors and Plant Wearables for Smart and Precision Agriculture. *Advanced Materials*, 33(20). — 2007764 p. (in Eng.)

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the Central Asian Academic Research Center LLP

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 journals of the Central Asian Academic Research Center LLP 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 Central Asian Academic Research Center LLP 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 Central Asian Academic Research Center LLP.

The Editorial Board of the Central Asian Academic Research Center LLP 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)

Ответственный редактор *А. Ботанқызы*

Редакторы: *Д.С. Аленов, Т. Апендиев*

Верстка на компьютере: *Г.Д. Жадырановой*

Подписано в печать 31.03.2026.

Формат 60x881/8.

20,0 п.л. Заказ 1.