

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



«ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫ» РҚБ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

РОО «НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН»

N E W S

OF THE NATIONAL ACADEMY
OF SCIENCES OF THE REPUBLIC
OF KAZAKHSTAN

SERIES OF PHYSICS AND MATHEMATICS

1 (353)

JANUARY – MARCH 2025

PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

PUBLISHED 4 TIMES A YEAR

ALMATY, NAS RK

БАС РЕДАКТОР:

МҮТАНОВ Ғалымқайыр Мұтанұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР ҒЖБМ ҒК «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 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>

БАЙГҮНЧЕКОВ Жүмаділ Жанабайұлы, 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>

ОГМАН 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>

БИЯШЕВ Рустам Гакашевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Информатика және басқару мәселелері институты директорының орынбасары, Ақпараттық қауіпсіздік зертханасының меңгерушісі (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 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>

«ҚР ҰҒА Хабарлары. Физика-математика сериясы».

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 1991-346X (Print)

Меншіктеуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РҚБ (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 **28.02.2025** ж. берген №**KZ20VPY00113741** Куәлік.

Тақырыптық бағыты: *ақпараттық-коммуникациялық технологиялар*

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

Мерзімділігі: *жылына 4 рет.*

Редакцияның мекен-жайы: *050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., тел.: 272-13-19*

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

© «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РҚБ, 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

МУТАНОВ Галимканр 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 Саппаева (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 Сауле 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 Беларуси (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: *Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы).*

Свидетельство о постановке на переучет периодического печатного издания, информационного агентства и сетевого издания № **KZ20VPU00113741**. Дата выдачи **28.02.2025**

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.*

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

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/>

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 5–16

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.321>

UDC 336.77:338.43(477)

© A. Abdiraman¹, L. Aldasheva¹, A. Zakirova¹, B. Mukhametzhanova²,
I. Orman¹, 2025.

¹Astana IT University, Astana, Kazakhstan;

²Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov,
Karaganda, Kazakhstan.

*E-mail: aliya.abdiraman@astanait.edu.kz

GLOBAL ANALYSIS OF MOBILE BROADBAND NETWORK PERFORMANCE: INSIGHTS INTO 5G DEPLOYMENT AND FUTURE 6G CHALLENGES

Abdiraman Aliya – senior lecturer, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: aliya.abdiraman@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5494-0223>;

Aldasheva Laura – candidate of technical sciences, assistant professor, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: laura.aldasheva@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6815-1989>;

Zakirova Alma – candidate of pedagogical sciences, assistant professor, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: alma.zakirova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8772-1414>;

Mukhametzhanova Bigul – PhD, Acting Associate Professor, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan, grek79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3585-8181>;

Orman Indira – senior lecturer, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: Indira.malikovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5126-3332>;

Abstract. This research is dedicated to a comprehensive analysis of the global experience in evaluating the performance of mobile broadband (MBB) networks, particularly in the context of 5G deployment and preparations for 6G technology. The study delves into crucial quality of service (QoS) and quality of experience (QoE) metrics that influence mobile network performance, including data download speeds, latency, connection stability, and network coverage. By assessing these factors, the study aims to identify how effectively mobile networks meet the growing demands of modern communication services. A significant portion of the research focuses on Kazakhstan, where the rollout of 5G technology is underway but is still limited to a few operators. The state of the current network infrastructure is evaluated, shedding light on the challenges and opportunities faced in this emerging market. Furthermore, the paper examines international practices from countries such as the USA, Malaysia, and Oman, offering insights into the global trends and challenges that accompany the development of next-generation

mobile networks. Advanced technologies such as millimeter waves, beamforming, and Massive MIMO are discussed in the context of their role in enhancing network reliability and efficiency in densely populated environments. Finally, the research proposes a mobile application architecture designed for real-time signal analysis in 5G networks. This application aims to evaluate mobility management and load balancing processes, which are essential for the smooth operation of next-generation networks.

Keywords: 5G technology, QoE, QoS, mobile broadband networks, mobile networks, next-generation, telecom operators.

***Acknowledgments.** This research has been funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992852 “Intelligent models and methods of Smart City digital ecosystem for sustainable development and the citizens’ quality of life improvement”).*

© Ә. Әбдіраман¹, Л. Алдашева¹, А. Закирова¹, Б. Мухаметжанова²,
И. Орман¹, 2025.

¹Astana IT University, Астана, Қазақстан;

²Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қарағанды, Қазақстан.

*E-mail: aliya.abdiraman@astanait.edu.kz

МОБИЛЬДІ КЕН ЖОЛАҚТЫ ЖЕЛІЛЕРДІҢ ТИІМДІЛІГІНІҢ ЖАҒАНДЫҚ ТАЛДАУ: 5G ЕНГІЗУ ЖӘНЕ 6G БОЛАШАҚ МӘСЕЛЕЛЕРІ

Әбдіраман Әлия – аға оқытушы, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: aliya.abdiraman@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5494-0223>;

Алдашева Лаура – техника ғылымдарының кандидаты, ассистент профессор, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: laura.aldasheva@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6815-1989>;

Закирова Алма – педогогика ғылымдарының кандидаты, ассистент профессор, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: alma.zakirova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8772-1414>;

Мухаметжанова Бигуль – PhD, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің доценті, Қарағанды, Қазақстан, grek79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3585-8181>;

Орман Индира – аға оқытушы, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: Indira.malikovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5126-3332>.

Аннотация. Бұл зерттеу мобильді кеңжолықты желілердің (МВВ) тиімділігін бағалаудағы жаһандық тәжірибені зерттеуге және 5G технологиясын енгізу мен 6G-ге дайындықты қарастыруға арналған. Жұмыста қызмет көрсету сапасы (QoS) және пайдаланушы тәжірибесінің сапасы (QoE) сияқты негізгі көрсеткіштер қарастырылады, олар деректерді жүктеу жылдамдығы,

кідіріс, қосылымның тұрақтылығы және желінің таралу аймағын қамтиды. Бұл көрсеткіштерді талдай отырып, мобильді желілердің заманауи телекоммуникациялық қызметтерге деген өсіп келе жатқан сұраныстарды қаншалықты жақсы қанағаттандыратынын анықтауға бағытталған. Зерттеудің маңызды бөлігі Қазақстанға арналған, мұнда 5G технологиясының енгізілуі әлі де бірнеше операторлармен шектелген. Желінің қазіргі инфрақұрылымы бағаланып, дамушы нарықтың алдында тұрған қиындықтар мен мүмкіндіктер ашылады. Сонымен қатар, зерттеуде АҚШ, Малайзия және Оман сияқты елдердегі халықаралық тәжірибелер қарастырылып, мобильді желілердің келесі буынын дамытуға байланысты жаһандық үрдістер мен қиындықтар көрсетіледі. Жоғары тығыздығы бар ортада желінің сенімділігі мен тиімділігін қамтамасыз ету үшін миллиметрлік толқындар, сәулелендіру және Massive MIMO сияқты заманауи технологиялардың рөлі талқыланады. Зерттеу соңында 5G желілерінде сигналды нақты уақытта талдауға арналған мобильді қосымша архитектурасы ұсынылады. Бұл қосымша мобильділікті басқару және жүктеме теңгерімін бағалау процестерін зерттеуге бағытталған, олар келесі буын желілерінің тұрақты жұмыс істеуі үшін маңызды болып табылады.

Түйін сөздер: 5G технологиясы, QoE, QoS, мобильді кең жолақты қатынау желілері, жаңа буын мобильді желілер, байланыс операторлары.

© Ә. Әбдіраман¹, Л. Алдашева¹, А. Закирова¹, Б. Мухаметжанова²,
И. Орман¹, 2025.

¹Astana IT University, Астана, Қазақстан;

²Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Караганда, Қазақстан.

*E-mail: aliya.abdiraman@astanait.edu.kz

ГЛОБАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОБИЛЬНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕТИ: ВНЕДРЕНИЕ 5G И БУДУЩИЕ ЗАДАЧИ 6G

Әбдіраман Әлия – старший преподаватель, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: aliya.abdiraman@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5494-0223>;

Алдашева Лаура – кандидат технических наук, ассистент профессор, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: laura.aldasheva@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6815-1989>;

Закирова Алма – кандидат педагогических наук, ассистент профессор, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: alma.zakirova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8772-1414>;

Мухаметжанова Бигуль – PhD, и.о. доцента, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Қазақстан, grek79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3585-8181>;

Орман Индира – сеньор лектор, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: Indira.malikovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5126-3332>.

Аннотация. Данное исследование посвящено комплексному анализу мирового опыта оценки эффективности мобильных широкополосных сетей (МВВ) в контексте развертывания 5G и подготовки к 6G. В работе рассматриваются ключевые метрики качества обслуживания (QoS) и качества восприятия (QoE), такие как скорость загрузки данных, задержка, стабильность соединения и покрытие сети. Анализ этих факторов направлен на выявление того, насколько эффективно мобильные сети удовлетворяют растущие требования современных телекоммуникационных услуг. Значительная часть исследования сосредоточена на Казахстане, где развертывание технологии 5G находится на начальной стадии и охватывает лишь несколько операторов. Оценивается текущее состояние инфраструктуры сети, что позволяет выявить вызовы и возможности, с которыми сталкивается этот развивающийся рынок. Кроме того, в работе рассматриваются международные практики из таких стран, как США, Малайзия и Оман, что дает представление о мировых тенденциях и вызовах, сопровождающих развитие мобильных сетей нового поколения. Обсуждаются также передовые технологии, такие как миллиметровые волны, фазированная антенна и Massive MIMO, и их роль в повышении надежности и эффективности сети в условиях высокой плотности пользователей. В завершение исследования предлагается архитектура мобильного приложения для анализа сигнала в реальном времени в сетях 5G. Это приложение направлено на оценку процессов управления мобильностью и балансировки нагрузки, которые являются важными для стабильной работы сетей нового поколения.

Ключевые слова: технология 5G, QoE, QoS, сети мобильного широкополосного доступа, мобильные сети нового поколения, операторы связи.

Introduction. 5G technology is the fifth generation of mobile network technology, designed to significantly improve the speed, capacity, and latency of wireless networks. It enables faster data transfer rates, reaching up to 10 Gbps, and supports more connected devices simultaneously, making it ideal for high-density environments like smart cities. Key features include ultra-low latency, enhanced mobile broadband, and massive machine-type communications, which enable innovations such as autonomous vehicles, the Internet of Things (IoT), and virtual reality. 5G also uses advanced technologies like millimeter waves, beamforming, and Massive MIMO to provide more reliable and efficient connectivity.

With the development of 5G and the preparation for the deployment of 6G networks, mobile broadband networks play a key role in ensuring high-speed data transmission and stable connectivity. The demand for mobile networks continues to grow, especially in urban areas with increasing connection density. This study presents an analysis of global experience in evaluating the performance of mobile broadband networks in various countries and regions. The performance assessment of such networks is becoming critically important for ensuring quality of service (QoS) and user satisfaction (QoE), particularly in densely populated areas with a growing number of connected devices.

Mobile broadband networks are one of the key tasks in 5G networks due to the ever-increasing demand for data transfer volumes. 5G networks are capable of providing significantly higher data transfer speeds and stable connections, which meets the requirements of modern users and contributes to the development of new digital services and technologies (ITU-T, 2017).

Methods and materials. Currently, only two telecom operators in Kazakhstan, Kcell and Tele2, provide communication services using 5G technology. Regarding the further development of 5G technology, Kcell and Tele2 operators will continue to work on expanding 5G coverage in the cities of Astana, Almaty, Shymkent and regional centers. To date, 1,144 base stations have been installed in 20 cities. According to information from the Kcell operator, 5G technology provides high-speed Internet, reaching 1600 Mbit/s, providing users with the ability to instantly download movies and stream video in 8K format, which significantly improves the quality of multimedia content consumption.

In turn, the coverage area in Astana of the 5G operator Tele2 is shown in Figure 1.

Figure 2 above displays a coverage map of the city of Astana, showing the 5G network coverage of the telecom operator Kcell. The purple areas represent regions within the city where Kcell provides 5G services. The coverage is concentrated around central areas of Astana, with some additional reach extending into suburban and outlying districts. The majority of the city center and key residential and commercial areas appear to have good 5G connectivity. However, there are still regions, particularly at the outskirts and in less densely populated areas, where 5G coverage is sparse or absent. This distribution indicates that Kcell has focused its 5G network expansion on densely populated and high-traffic zones, ensuring optimal service where demand is likely highest.

It is worth noting that in order to attract customers, many mobile operators do not display theoretical or declared speeds described in new standards (Lobo et al., 2020). In this regard, it is necessary to conduct independent research in terms of assessing the QoS and QoE indicators of existing 5G services of mobile operators.

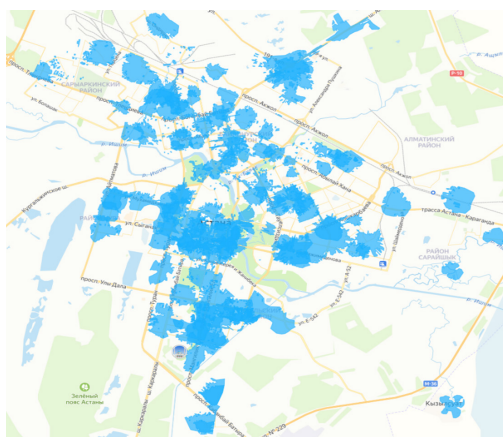


Fig. 1. Tele2 coverage area in Astana

Also, the coverage area of Astana city provided by the 5G operator Kcell is shown in Figure 2.

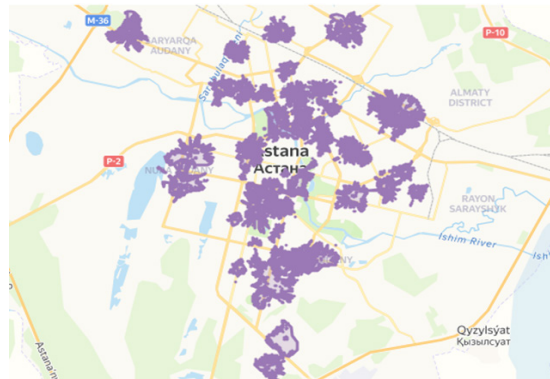


Fig.2. Kcell coverage area in Astana

Results and discussion

The study in the article (Shayea, et al., 2024) is devoted to the analysis of mobile broadband performance in Malaysia, Singapore and Thailand. The study evaluates the network quality of 3G and 4G based on metrics such as coverage, download speed, latency and user satisfaction. The results show that 4G networks perform significantly better than 3G networks, especially in dense urban areas. The study highlights the need to improve MBB services to successfully implement 5G and improve user satisfaction.

A study (El-Saleh, et al, 2022) conducted in Oman provided an analysis of the mobile broadband (MBB) networks of two national telecom operators. The evaluation was conducted based on drive tests in four urban and suburban areas, where metrics such as throughput, handovers, ping rate, signal strength and quality (RSRP, RSRQ and CQI) were analyzed. The results showed that the 4G network dominated in most of the tested areas, providing more stable coverage and high data speeds compared to the 3G network, especially in dense urban areas. The study (Busari, et al, 2018) shows that the introduction of 5G plays a key role in improving the quality of mobile communications due to the use of millimeter waves, which provide high data rates and minimal latency. However, such frequencies are subject to high path losses, which requires the support of small cells and dense placement of base stations. These features make 5G an ideal technology for improving the efficiency of networks in high-density user environments and creating new digital services such as autonomous vehicles and smart cities.

The work (Shayea, et al., 2021) assesses the performance of 3G and 4G networks in urban areas of Malaysia and their preparation for the introduction of 5G. The following metrics are considered for analyzing the performance of base stations of mobile operators:

- Content download speed;

- Coverage area;
- User satisfaction.

The authors of the study (Shayea, et al., 2020) analyze 3G and 4G networks in rural areas of Malaysia in order to optimize and improve MBB services for the introduction of 5G. The following metrics are considered for analyzing the performance of base stations of mobile operators:

- Latency;
- Coverage area;
- Content download speed

Due to the geographical features, the authors selected these metrics, which are essential in an infrastructure-limited environment. This study clearly shows the importance of planning and implementing 5G in rural areas and the need to adapt the network to geographical features.

It is worth noting that the studies in papers (Shayea, et al., 2021) and (Shayea, et al., 2020) are aimed at improving the efficiency of MBB network distribution in different regions of Malaysia. Paper (Shayea, et al., 2021) focuses on the development of urban networks taking into account the high user density, while paper (Shayea, et al., 2020) emphasizes the need to improve coverage and quality in rural areas where the infrastructure is more limited.

Paper (Shayea, et al., 2017) evaluates the performance of mobile broadband (MBB) networks in Malaysia based on the received signal strength (CSS). The study covers indoor testing of 3G and 4G networks of three national telecom operators in the Klang Valley, Selangor and Johor Bahru areas. The tests were conducted in real-world conditions using Galaxy S6 smartphones, which allowed us to evaluate the quality of web surfing and video streaming services at different resolutions. The results of the analysis provide insight into the coverage and performance of mobile networks and can help improve the quality of services for users. It is worth noting that this study was conducted in 2016. Therefore, an old model of smartphones was used. The article (Shayea, et al., 2017) evaluates the performance of mobile networks of five telecom operators in Malaysia in a smart city with a developed technological infrastructure. The current 4G networks were tested for metrics such as RSRP, RSRQ, SNR, throughput (download and download speed), latency, and handovers. The study shows that improvements in SNR and throughput are required for all operators to improve the quality of communication and prepare for the introduction of 5G. The article also discusses the possibilities of using similar methodologies and tools for analyzing 5G networks, which will help operators improve the operation of their networks and ensure high-speed data transmission with low latency.

The study (Malekzadeh, 2023). analyzes the impact of high connection density on the performance of 5G networks, especially in the millimeter wave (mmWave) bands. The authors note that the use of mmWave provides high data transmission speeds but also requires dense placement of base stations to maintain communication quality. This makes 5G particularly relevant for urban areas with a high density of users, where traditional methods may struggle with the load.

Article (Salahdine, et al., 2023) is a comprehensive review of recent achievements and future challenges in the field of mobile communications. The authors focus on the current development of 5G and the future possibilities of 6G, paying special attention to technical aspects such as improving bandwidth, reducing latency, and increasing connection density. Key achievements of 5G: Important achievements include enhanced bandwidth capabilities, ultra-low latency, and high connection density, allowing support for millions of devices in small areas. These improvements are already being implemented in the Internet of Things (IoT) industry, autonomous vehicles, and smart cities. 6G prospects: The development of 6G is aimed at using extremely high frequencies (terahertz range), which will provide even higher data transmission speeds. Artificial intelligence (AI) will play an important role in 6G, being used for network management, improving energy efficiency, and providing more reliable and low-latency connections. Main challenges: One of the key challenges for 6G is ensuring network security and addressing issues related to high connection density. Additionally, 6G requires significant infrastructure changes and new approaches to spectrum management.

In article (Salahdine, et al., 2023), the modeling of mobile traffic in a large metropolitan area based on measurements is explored. The authors emphasize that accurate traffic modeling is critical for improving the performance and reliability of 5G and 6G networks. The study uses big data analysis to examine traffic patterns in high-density connection conditions, including peak hours and holidays. Results show that adapting traffic models to dynamic usage conditions allows for more efficient network resource management. The authors also propose methods that can help predict load, which is particularly important for ensuring quality service in conditions of high user density. These approaches highlight the need to integrate traffic data into the planning and management processes of networks.

In work (Albaladejo, et al., 2016), Miguel Báguena Albaladejo and others discuss performance modeling of LTE in Dublin based on real measurements. The authors emphasize that understanding the current performance of LTE is critically important for planning and optimizing next-generation networks like 5G. The study finds that factors such as user density and interference level significantly affect communication quality in urban environments. Article (Oliveira, et al., 2015) is devoted to the development of a linear to circular polarization converter in the Ka-band. The authors highlight those converters play an important role in modern wireless communication systems, especially under high connection density conditions where high performance is required. This work underscores the importance of effective antennas and polarization technologies for achieving the necessary communication characteristics in 5G and 6G networks.

Article (Oliveira, et al., 2015) focuses on the development of a linear-to-circular polarization converter in the Ka-band. The authors emphasize that converters play an important role in modern wireless communication systems, especially under conditions of high connection density, where high performance is required. This work highlights the importance of effective antennas and polarization technologies for achieving the necessary communication characteristics in 5G and 6G networks.

Article (Albaladejo, et al., 2016) analyzes the compatibility of a cognitive broadband satellite system and mmWave networks. The authors find that the effective coexistence of these systems can significantly improve performance and expand network coverage. This study is important for understanding how different technologies can coexist and work together under conditions of high connection density, which is a key aspect for future mobile networks.

In article (Zhang, et al., 2017), high-performance and ultra-broadband metamaterials based on mixed absorption mechanisms are discussed. The authors emphasize that such technologies can be used to create more efficient antennas and devices, which is an important aspect for optimizing the performance of 5G and 6G networks in dense urban environments.

Article (Zhang, et al., 2020) analyzes the performance of mobile broadband networks considering 5G trends in urban areas of Malaysia. The authors emphasize that the introduction of 5G significantly changes traffic dynamics and service quality. The study confirms that the successful deployment of 5G requires adapting existing networks to new operating conditions, including connection density and performance requirements.

Article (Wang, et al., 2020) examines key technologies necessary for achieving ultra-low latency and high connectivity in 5G and 6G networks. The authors focus on solutions such as massive antennas (Massive MIMO), signal processing technologies, and distributed computing. These technologies help improve network performance under high connection density, which is particularly relevant for applications requiring rapid response times, such as autonomous vehicles and virtual reality.

Article (Shayea, et al., 2021) focuses on issues related to high connection density in 5G networks. The authors highlight several critical aspects, including spectrum management and resource allocation methods. They emphasize the need for new architectures, such as small cell networks and coordination technologies, to improve service quality in conditions of high user density.

Together, these studies underscore the importance of a comprehensive approach to addressing high connection density challenges and the necessity of developing innovative technologies. Effective use of massive antennas and distributed computing, alongside new architectural solutions, can significantly enhance the performance of 5G and 6G networks, ensuring the necessary reliability and service speed.

As a result of the literature review, the following metrics were identified for conducting web browsing measurements:

- 1) Cellular signal strength (dBm)
- 2) Total number of service attempts (number) and average success rate of page display
- 3) Average page download bandwidth (kbps)
- 4) Average page response delay (ms)
- 5) Average page display delay (ms)
- 6) Average RTT ping delay (ms)

For streaming video:

- 1) Cellular signal strength (dBm)
- 2) Total number of service attempts (number) and average success rate of initial buffering
- 3) Average Mobile vMOS (scale from 1 to 5; worst = 1; best = 5)
- 4) Average overall video download speed (kbps)
- 5) Average initial buffering delay (user-perceived delay) (ms)
- 6) Average RTT Ping Latency (ms)
- 7) Average Total Rebuffer Latency (ms)

Signal quality plays a key role in ensuring high performance and reliability of mobile networks. In LTE and 5G networks, parameters like SINR, RSRP, and RSRQ allow network operators to assess current network conditions and optimize its performance. SINR helps determine the ratio of useful signal to noise and interference, RSRP indicates the signal level from the base station, and RSRQ reflects the quality of the received signal.

The article shows that using these parameters allows for assessing current network conditions and taking necessary measures to improve coverage and performance, especially in conditions of high connection density. In 5G networks, the introduction of new technologies such as beamforming and massive MIMO has significantly improved signal quality metrics, allowing for high-level connectivity even in challenging conditions like dense urban areas and high user concentrations.

The first stage of the drive test requires the development of a mobile application for 5G/6G networks, which will serve as a platform for collecting and analyzing mobile data traffic in real time. The application will allow conducting research on mobility management processes (MRO), load balancing (LBO), and handover of communication sessions (HOD) in next-generation networks. In addition, the project is aimed at supporting the development of 5G and 6G infrastructure, as well as studying the technical requirements and challenges associated with the deployment of future cellular networks in smart cities of Kazakhstan. Based on the literature review, two types of testing scenarios are proposed for conducting real measurements based on the test drive, shown in Figure 3.

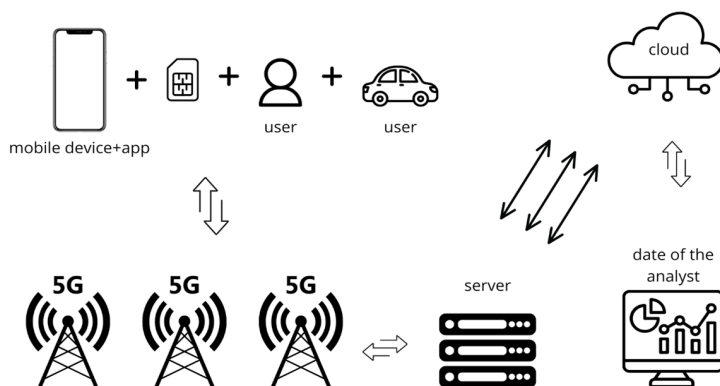


Fig.3. Work flow of mobile app

As shown above, Figure 3 represents the architecture of a mobile application designed for 5G networks. The architecture involves several key components:

- **Mobile Device + App:** The user operates a mobile device equipped with a SIM card and a specialized application that connects to the 5G network.
- **User Interaction:** The user interacts with the mobile application, either while stationary or in motion (e.g., in a car), showcasing the app's capability to handle mobile and dynamic environments.
- **5G Towers:** The mobile device connects to multiple 5G base stations, which provide high-speed data transmission. These towers handle the data exchange between the user and the backend infrastructure.
- **Server:** The 5G towers relay data to a centralized server, where the data is processed and analyzed.
- **Cloud:** The server communicates with a cloud service to store and process large-scale data, ensuring scalability and reliability.
- **Data Analysis:** Data collected from the mobile device, the 5G network, and other components are analyzed and visualized to provide insights and reports for performance evaluation or other purposes.

The architecture is designed to support seamless data exchange, handle mobility, and provide real-time data analysis, leveraging the benefits of 5G technology for enhanced connectivity and performance.

Conclusion.

The study confirms that 5G technology is a crucial factor in improving the performance of mobile broadband networks, especially in high-density urban environments. By analyzing the global experience of 5G implementation and reviewing case studies from various countries, it becomes evident that 5G not only enhances network quality but also promotes the development of innovative digital services. In Kazakhstan, operators such as Kcell and Tele2 have made significant strides in expanding 5G coverage, particularly in metropolitan areas. However, gaps remain in less densely populated regions, emphasizing the need for continued infrastructure development. The proposed mobile application for real-time signal analysis offers a practical solution for monitoring and optimizing network performance, thereby supporting the ongoing development of 5G and the future deployment of 6G technologies.

References

- Albaladejo M.B., Leith D.J., & Manzoni P. (2016). Measurement-based modelling of LTE performance in Dublin city.
- Busari S.A., Mumtaz S., Al-Rubaye S., & Rodriguez J. (2018). 5G millimeter-wave mobile broadband: Performance and challenges. **IEEE Communications Magazine*, 56*(6), 137-143. (in Eng.)
- El-Saleh A.A., Alhammadi A., Shayea I., Alsharif N., Alzahrani N.M., Khalaf O.I., & Aldhyani T.H.H. (2022). Measuring and assessing performance of mobile broadband networks and future 5G trends. **Sustainability*, 14*, 829. <https://doi.org/10.3390/su14020829> (in Eng.)
- El-Saleh A.A., Alhammadi A., Shayea I., Hassan W.H., Honnurvali M.S., & Daradkeh Y.I. (2023). Measurement analysis and performance evaluation of mobile broadband cellular networks

in a populated city. *Alexandria Engineering Journal, 66*, 927-946. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.10.052> (in Eng.)

ITU-T Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience (2017) (in Eng.)

Lobo B.J., Alam M.R., & Whitacre B.E. (2020). Broadband speed and unemployment rates: Data and measurement issues. *Telecommunications Policy*, 44(1), Article 101829. (in Eng.)

Malekzadeh M. (2023). Performance prediction and enhancement of 5G networks based on linear regression machine learning. (in Eng.)

Oliveira E.M.R., Viana A.C., Naveen K.P., & Sarraute C. (2015). Measurement-driven mobile data traffic modeling in a large metropolitan area. (in Eng.)

Salahdine F., Han T., & Zhang N. (2023). 5G, 6G, and beyond: Recent advances and future challenges. (in Eng.)

Shayea I., Azmi M.H., Ergen M., & El-Saleh A.A. (2021). Performance analysis of mobile broadband networks with 5G trends and beyond: Urban areas scope in Malaysia. (in Eng.)

Shayea I., Benlakehal M.E., Azmi M.H., Han C.T., Arsad A., & Rahman T.A. (2024). Outdoor mobile broadband performance analysis in Malaysia, Singapore, and Thailand. *Results in Engineering, 23*, Article 102691. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102691> (in Eng.)

Shayea I., Ergen M., Azmi M.H., Nandi D., El-Saleh A.A., & Zahedi A. (2020). Performance analysis of mobile broadband networks with 5G trends and beyond: Rural areas scope in Malaysia. *IEEE Access, 8*, 65211-65229. (in Eng.)

Shayea I., et al. (2021). Performance analysis of mobile broadband networks with 5G trends and beyond: Urban areas scope in Malaysia. *IEEE Access, 9*, 90767-90794. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3085782> (in Eng.)

Shayea I., Rahman T.A., Azmi M.H., Han C.T., & Arsad A. (2017). Indoor network signal coverage of mobile telecommunication networks in West Malaysia: Selangor and Johor Bahru. *2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, 288-293. <https://doi.org/10.1109/MICC.2017.8311774> (in Eng.)

Wang C.Y., Liang J.G., Cai T., Li H.P., Ji W.Y., & Zhang Q. (2020). High-performance and ultra-broadband metamaterial absorber based on mixed absorption mechanisms. (in Eng.)

Zhang Q., An K., Yan X., & Liang T. (2017). Ka-band linear to circular polarization converter based on multilayer slab with broadband performance. (in Eng.)

Zhang Q., An K., Yan X., & Liang T. (2020). Coexistence and performance limits for the cognitive broadband satellite system and mmWave cellular network. (in Eng.)

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 17–31

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.322>

IRSTI 50.05.09

UDC 004.378

R. Abdualiyeva, L. Smagulova*, A. Yelepbergenova, 2025.

Zhetysu university named after I. Zhansugurov, Taldykorgan, Kazakhstan.

E-mail: jgu_laura@mail.ru

THE EFFECTIVENESS OF USING CHATGPT IN PROGRAMMING

Abdualiyeva Rima – Ph.D, Zhetysu University named after I. Zhansugurov, Taldykorgan, Kazakhstan, e-mail: rimaergaliyevna09@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4161-9825>;

Smagulova Laura – Candidate of Pedagogical Sciences, Zhetysu University named after I. Zhansugurov, Taldykorgan, Kazakhstan, e-mail: jgu_laura@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1359-2119>;

Yelepbergenova Aigul – master's degree, Zhetysu University named after I. Zhansugurov, Taldykorgan, Kazakhstan, e-mail: aigul_eu@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3525-1825>.

Abstract. This study evaluates the efficacy of OpenAI's ChatGPT models, GPT-3.5 and GPT-4, in programming and software development. A quantitative approach was employed, using the Mostly Basic Python Problems (MBPP) dataset to assess their ability to handle coding tasks.

Beyond direct evaluation, a comparative analysis was conducted to benchmark ChatGPT against other large language models, including Google's Bard and Anthropic's Claude. This analysis provided a broader perspective on ChatGPT's programming capabilities within the AI landscape.

The findings highlight ChatGPT's advantages in coding tasks, demonstrating its ability to enhance efficiency and productivity. Developers and researchers can leverage these insights to integrate AI-driven solutions into software development. Additionally, the study sheds light on key strengths and limitations of ChatGPT compared to competing models, offering a foundation for further refinement of AI-based coding assistants.

As AI continues to transform various industries, understanding its role in programming becomes increasingly relevant. This research underscores ChatGPT's potential in optimizing workflows, fostering innovation, and streamlining software development. By identifying areas for further improvement, it also contributes to ongoing advancements in AI-driven programming tools.

Ultimately, this study serves as a valuable resource for AI researchers and developers, guiding future improvements in language models and their applications

in coding, automation, and broader technological advancements. The continuous evolution of AI-powered programming tools promises to reshape software development, making it more efficient and accessible.

Keywords: ChatGPT, GPT-3.5, GPT-4, Python programming, OpenAI, Google's Bard, Claude from Anthropic, Software Development, MBPP Dataset, Performance, Comparative Analysis, Efficiency.

Р.Е. Абдуалиева, Л.А. Смагулова*, А.У. Елепбергенова, 2025.

I. Жансүгіров атындағы Жетісу Университеті, Талдықорған, Қазақстан.

E-mail: jgu_laura@mail.ru

БАҒДАРЛАМАЛАУДА CHATGPT ҚОЛДАНУ ТИІМДІЛІГІ

Абдуалиева Рима Ергалиевна – Ph.D, I. Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, Талдықорған, Қазақстан, e-mail: rimaergaliyevna09@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4161-9825>;

Смагулова Лаура Амангельдиевна – п.ғ.к., I. Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, Талдықорған, Қазақстан, e-mail: jgu_laura@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1359-2119>;

Елепбергенова Айгүл Узбековна – магистр, I. Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, Талдықорған, Қазақстан, e-mail: aigul_eu@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3525-1825>.

Аннотация. Бұл зерттеуде OpenAI ChatGPT модельдерінің, атап айтқанда GPT-3.5 және GPT-4-тің, бағдарламалау мен бағдарламалық жасақтама әзірлеудегі тиімділігі бағаланады. Сандық әдіс қолданылып, негізінен Basic Python Problems (MBPP) деректер жинағы арқылы модельдердің кодтау тапсырмаларын орындау қабілеті зерттелді. Тікелей бағалаудан бөлек, ChatGPT-ті Google Bard және Anthropic Claude сияқты басқа да ірі тілдік модельдермен салыстырмалы талдау жүргізілді. Бұл талдау ChatGPT-тің бағдарламалау мүмкіндіктерін жасанды интеллект ортасындағы басқа модельдермен салыстыра отырып, оның орнын анықтауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер ChatGPT-тің кодтау тапсырмаларын орындаудағы артықшылықтарын көрсетіп, оның тиімділік пен өнімділікті арттыру қабілетін дәлелдейді. Әзірлеушілер мен зерттеушілер бұл мәліметтерді жасанды интеллект негізіндегі шешімдерді бағдарламалық жасақтама әзірлеу үдерісіне енгізу үшін пайдалана алады. Сонымен қатар, зерттеу ChatGPT-тің бәсекелес модельдермен салыстырғанда негізгі артықшылықтары мен шектеулерін анықтап, жасанды интеллект негізіндегі кодтау көмекшілерін одан әрі жетілдіруге негіз қалайды.

Жасанды интеллект әртүрлі салаларды трансформациялауды жалғастырып жатқандықтан, оның бағдарламалаудағы рөлін түсіну барған сайын маңызды болуда. Бұл зерттеу ChatGPT-тің жұмыс процестерін оңтайландырудағы, инновацияларды ынталандырудағы және бағдарламалық жасақтаманы әзірлеуді жетілдірудегі әлеуетін көрсетеді. Сондай-ақ, ол болашақта

жетілдіруді қажет ететін негізгі бағыттарды анықтауға көмектесіп, жасанды интеллект негізіндегі бағдарламалау құралдарының үздіксіз дамуына үлес қосады. Қорытындылай келе, бұл зерттеу жасанды интеллектті зерттеушілер мен әзірлеушілер үшін құнды ресурс болып табылады. Ол тілдік модельдерді және олардың бағдарламалау, автоматтандыру және технологиялық даму салаларындағы қолданылуын жетілдіруге ықпал етеді. Жасанды интеллект негізіндегі бағдарламалау құралдарының эволюциясы бағдарламалық жасақтама әзірлеу үдерісін неғұрлым тиімді әрі қолжетімді ете отырып, оны жаңа деңгейге көтеруге ықпал етеді.

Түйін сөздер: ChatGPT, GPT-3.5, GPT-4, Python бағдарламалау, OpenAI, Google Bard, Anthropic's Claude, бағдарламалық жасақтама жасау, MBPP деректер жиынтығы, өнімділік, салыстырмалы талдау, тиімділік.

Р.Е. Абдуалиева, Л.А. Смагулова*, А.У. Елепбергенова, 2025.

Жетысуский университет им. И. Жансугурова, Талдықорган, Казахстан.

E-mail: jgu_laura@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ CHATGPT В ПРОГРАММИРОВАНИИ

Абдуалиева Рима Ергалиевна – PhD, Жетысуский университет им. И. Жансугурова, Талдықорган, Казахстан, E-mail: rimaergaliyevna09@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4161-9825>;

Смагулова Лаура Амангельдиевна – к.п.н., Жетысуский университет им. И. Жансугурова, Талдықорган, Казахстан, E-mail: jgu_laura@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1359-2119>;

Елепбергенова Айгуль Узбековна – магистр, Жетысуский университет им. И. Жансугурова, Талдықорган, Казахстан, E-mail: aigul_eu@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3525-1825>.

Аннотация. В этом исследовании оценивается эффективность моделей OpenAI ChatGPT, GPT-3.5 и GPT-4, в программировании и разработке программного обеспечения. Был применен количественный подход, в основном с использованием набора данных Basic Python Problems (MBPP) для оценки их способности справляться с задачами кодирования.

Помимо прямой оценки, был проведен сравнительный анализ, чтобы сравнить ChatGPT с другими крупными языковыми моделями, включая Google Bard и Anthropic Claude. Этот анализ позволил получить более широкое представление о возможностях программирования ChatGPT в среде искусственного интеллекта. Полученные результаты подчеркивают преимущества ChatGPT в задачах программирования, демонстрируя его способность повышать эффективность и продуктивность. Разработчики и исследователи могут использовать эти знания для интеграции решений, основанных на искусственном интеллекте, в разработку программного обеспечения.

Кроме того, исследование проливает свет на ключевые преимущества и ограничения ChatGPT по сравнению с конкурирующими моделями, предлагая основу для дальнейшего совершенствования помощников по кодированию на основе искусственного интеллекта. Поскольку искусственный интеллект продолжает трансформировать различные отрасли, понимание его роли в программировании становится все более актуальным.

Это исследование подчеркивает потенциал ChatGPT в оптимизации рабочих процессов, стимулировании инноваций и усовершенствовании разработки программного обеспечения. Определяя области для дальнейшего совершенствования, он также способствует постоянному совершенствованию инструментов программирования, управляемых искусственным интеллектом. В конечном счете, это исследование является ценным ресурсом для исследователей и разработчиков ИИ, который поможет в дальнейшем совершенствовать языковые модели и их применение в программировании, автоматизации и более широком технологическом прогрессе. Непрерывная эволюция инструментов программирования на базе ИИ обещает изменить процесс разработки программного обеспечения, сделав его более эффективным и доступным.

Ключевые слова: ChatGPT, GPT-3.5, GPT-4, программирование на Python, OpenAI, Google Bard, Claude от Anthropic, разработка программного обеспечения, набор данных MBPP, производительность, сравнительный анализ, эффективность.

Introduction. In recent years, artificial intelligence (AI) has experienced remarkable growth, driven by advancements in machine learning and natural language processing. This progress has significantly impacted numerous industries and applications, reshaping traditional approaches. One of the areas garnering significant attention is AI-assisted programming. Advanced language models hold the potential to revolutionize how developers create, manage, optimize, and test code. The primary objective of this study is to evaluate ChatGPT, a popular large language model that encompasses GPT-4 and GPT-3.5 versions. By testing these models on various coding tasks, the research aims to analyze their capabilities and potential applications.

OpenAI's release of GPT models, particularly ChatGPT, has marked a significant step forward in AI's development and accessibility (An, et al., 2023). Each iteration of these models has brought increased adaptability and performance, sparking interest in their application across diverse fields. Specifically, in programming, these models exhibit immense potential for automating tasks, enhancing code quality, and providing valuable insights to developers. AI's influence on programming is both profound and transformative. By streamlining workflows, reducing human error, and automating repetitive processes, AI has demonstrated its ability to significantly enhance productivity. Tasks such as code generation, documentation creation, and bug detection are prime examples of how AI optimizes the development process,

enabling programmers to focus on more complex and creative aspects of their work (Adamson, et al., 2023).

This study employs quantitative testing methods to explore the capabilities of ChatGPT, with three key objectives:

- Evaluating ChatGPT's efficiency in executing diverse coding tasks.
- Comparing GPT-4 and GPT-3.5 performance against other prominent large language models.
- Identifying challenges and limitations in the application of these models to programming tasks.

Recent advancements in automated code generation have been largely fueled by the development of large language models like GPT-3. These innovations have surpassed previous deep learning approaches, significantly enhancing AI's role in programming.

For instance, OpenAI Codex (Biswas, 2023), a specialized variant of GPT-3, demonstrated the ability to produce fully accurate solutions for 29% of unseen programming challenges in a single sample, with accuracy rising to 72% when extended to 100 samples. Additionally, a study investigating the Python coding capabilities of GPT models revealed a 28% success rate on problem-solving within limited sample sets.

Research by Hammond et al. (Kalla, et al., 2023) examined the application of OpenAI Codex and other large language models in addressing software vulnerabilities. Their findings highlighted that these models resolved 67% of security flaws within a dataset of historical bugs from open-source projects. On the other hand, Refs prioritized evaluating the practical usability of LLM-generated code rather than its correctness. (Firat, 2023) assessed GPT-Neo, GPT-J, and GPT-NeoX, large language models trained on diverse datasets containing code samples across 12 programming languages. (Rabbi, et al., 2024) provided a comprehensive review of existing LLMs designed for NL2Code (natural language to code), discussing their features from various perspectives. However, neither study focused on evaluating the quality or accuracy of the generated code.

This research provides a foundational exploration of programming with AI assistance, conducted during a period of rapid advancements in artificial intelligence. Its findings aim to inform developers, researchers, and the broader tech community, shaping the future trajectory of AI-driven programming.

The structure of this paper includes an overview of ChatGPT's development and the mechanisms underlying generative AI in Section 2. Experimental results are detailed in Section 4, while Section 5 concludes with a summary of the key findings.

Materials and methods. The evolution of modern generative AI has roots in the 1940s with the early development of artificial neural networks (ANNs). However, limited computational resources and insufficient understanding of the brain's biological mechanisms led to minimal interest in ANNs until the 1980s. This period marked significant progress due to advancements in hardware, neuroscience,

and the introduction of the backpropagation algorithm, which made training ANNs much more practical. Prior to backpropagation, neural network training was a labor-intensive process, as no efficient method existed to compute error gradients relative to each neuron's weights. The adoption of backpropagation transformed this, unlocking the potential of ANNs (Ellis, et al., 2024).

In 2013, Kingma and Welling introduced variational autoencoders (VAEs) through their influential paper *Auto-Encoding Variational Bayes*. VAEs, a type of generative model based on variational inference, established a method for learning compressed data representations. This process involves encoding data into a lower-dimensional latent space and then reconstructing it into its original form via a decoding mechanism.

A pivotal advancement came in 2017 when Google researchers unveiled the Transformer architecture in their publication *Attention Is All You Need*. This innovative approach fundamentally altered language generation paradigms (Arias, et al., 2024). Unlike earlier models, such as long short-term memory (LSTM) networks (Hassani, et al., 2023) or recurrent neural networks (RNNs), Transformers utilized parallel processing to achieve superior contextual understanding and significantly improved performance (Campesato, 2024).

In 2021, OpenAI launched Codex, a specialized iteration of GPT trained on publicly available GitHub code. Early evaluations revealed that Codex could successfully solve about 30% of Python programming problems, a stark contrast to GPT-3, which achieved a 0% success rate on similar tasks. These results underscored the ability of large language models (LLMs) (Tomcsányiová, 2023) to effectively learn and generate code. Codex subsequently became the foundation for GitHub Copilot.

GitHub Copilot, powered by GPT-4, is an AI-driven programming assistant that integrates seamlessly with widely used code editors. It provides real-time code suggestions and can even generate entire segments of code. Controlled experiments revealed that developers using Copilot completed tasks approximately 55.8% faster than those who worked without it, illustrating the tool's potential to enhance programming efficiency (Ma, 2024).

Further studies have highlighted GPT's capabilities in Python code generation, particularly in aiding novice programmers with challenging problems using minimal input. However, these investigations also emphasize the necessity of human intervention to effectively guide ChatGPT's outputs (Siddiq, et al., 2024). Generative AI models utilize neural networks to analyze patterns and structures in existing datasets, enabling them to create original content. Inspired by human neuronal processes, these models learn from input data and generate outputs that align with the patterns they have internalized. Techniques such as generative adversarial networks (GANs) (Kaleemunnisa, et al., 2024), large language models (LLMs), variational autoencoders (VAEs), and Transformers are employed to produce content across diverse domains.

Methods like unsupervised and semi-supervised learning empower organizations

to leverage vast amounts of unlabeled data for training, forming the basis for more advanced AI systems. These so-called foundation models, such as GPT-3 and Stable Diffusion, are capable of performing multiple tasks. For instance, they enable applications like ChatGPT to generate essays from brief prompts or Stable Diffusion to create lifelike images from textual descriptions (Porter, et al., 2024). Generative AI continuously improves its outputs through iterative training processes, analyzing data relationships to adjust parameters and reduce discrepancies between desired and generated outputs. This iterative refinement enhances the model's ability to produce high-quality, contextually relevant content. Typically, the content generation process begins with a user prompt, followed by repeated adjustments and explorations to fine-tune the results.

This section outlines the methodological framework employed to assess ChatGPT's performance and its comparison with other prominent large language models (LLMs). It begins with a description of the dataset utilized in the study, followed by an explanation of the evaluation strategy. The evaluation details include the testing procedures and the method for calculating the performance scores of the language models.

Selection of LLMs

With the rise in popularity of ChatGPT, competing companies have introduced their own large language models (LLMs) to stake their claim in the market. To provide a comprehensive evaluation, three additional widely recognized and accessible LLMs were selected for comparison based on their market presence and potential impact.

- Google Bard: Launched in February 2023, Bard represents Google's significant foray into the AI landscape. It is powered by the PaLM2 model and is known for its advanced reasoning capabilities, particularly in tasks such as mathematics and programming. Bard is freely available on its dedicated website.

- Microsoft Bing Chat: Released in February 2023, Bing Chat (referred to as Bing in this paper) is marketed as a "copilot for the web" and is also powered by GPT-4. As one of OpenAI's largest investors, Microsoft leverages this AI technology for its chatbot, which is publicly available via the Bing platform.

- Anthropic's Claude: Developed by a research company founded in 2021 by former OpenAI employees, Claude entered the market as an AI assistant in March 2023, with its upgraded version, Claude v2, released in July 2023. Similar to ChatGPT and Bard, Claude is designed for tasks including coding and other creative applications.

Dataset

This study utilized a dataset called Basic Python Programming (MPPP), which is widely recognized and tested for evaluating code generation capabilities in AI models. Developed by Google researchers, the dataset comprises approximately 1,000 crowd-sourced Python programming problems. These problems encompass a broad range of fundamental programming concepts and functionalities, making them suitable for assessment and designed to be solvable by entry-level programmers.

A subset of problems from this dataset was selected for analysis, ensuring representation across different programming topics and difficulty levels to effectively evaluate the performance of the tested LLMs.

Each problem in the Basic Python Programming (MPPP) dataset consists of the following components:

- Task_id: A unique identifier for each problem, ranging from 1 to 1000.
- Prompt: Instructions provided to the LLM, specifying the task the code should accomplish.
- Code: A proposed solution to the problem.
- Test_imports: Libraries that need to be imported for the code to function correctly.
- Test_list: Typically, three test cases used to validate whether the code produces the expected output.

An example of coding problem number 162 from the dataset, along with the corresponding test cases, is illustrated in Figure 1. This structure ensures that the AI models are tested for both their ability to generate functional code and their compatibility with various programming requirements (Tomcsányiová, 2023).

```
Task_id = "162"
prompt = """Write a function to calculate the sum (n - 2*i) from i=0 to n // 2,
| for instance n + (n-2) + (n-4)... (until n-x <= 0)."""
test_list = [
    "assert sum_series(6) == 12",
    "assert sum_series(10) == 30",
    "assert sum_series(9) == 25",
]
def sum_series(n):
    """Calculates the sum of the series (n - 2*i) from i=0 to n // 2.
    Args:
        n: The upper limit of the series.
    Returns:
        The sum of the series.
    """
    sum = 0
    for i in range(n // 2):
        sum += n - 2 * i
    return sum
```

Figure 1. Program code.

```
score = 0
for test in test_list:
    try:
        exec(test)
        score += 1
        print("Test passed\n")
    except AssertionError:
        # Extracting the code from the assert statement
        test_code = test.split("assert ")[1].split("==")[0]
        # Evaluate the extracted code and capture the computed result
        computed_result = eval(test_code)

        # Extracting the expected result from the assert statement
        expected_result = (test.split("==")[1])

        print("Test failed:")
        print("Test:", test)
        print("Expected:", expected_result)
        print("Computed:", computed_result)
        print()
print("Total score:", score, "/", len(test_list))
```

Figure 2. Program code.

Figure 1. Example of the used Python problems.

(a) The code problem number 162.

(b) The testing code.

This figure illustrates an example of a Python programming problem from the dataset, showing both the problem description and the testing code used to validate the solution generated by the AI models. The testing code includes specific test cases designed to ensure that the generated solution works correctly for various scenarios.

Evaluation Strategy

For this study, a purely quantitative approach was employed to assess the performance of the selected LLMs. Despite OpenAI offering paid API access to its GPT-3.5 and GPT-4 models, the decision was made to use the ChatGPT web interface for all tests. This choice was made because the web interface is the most accessible and user-friendly option, and is likely what most people will use. All models are accessible via their web interfaces, except for GPT-4, which is available only through a paid subscription to “ChatGPT Plus.”

Bing and Bard do not offer API access, while Claude does; however, at the time of testing, Claude’s API access was restricted by a waitlist. This led to the decision to conduct tests solely through the web interfaces to maintain consistency and ensure that all models were evaluated under similar conditions.

In the tests, each model was provided with programming prompts from the MBPP dataset. Only the “prompt” and the name of the function were given, to match the function name used in the test cases. Figure 2 illustrates an example of the prompt provided to the LLM, which served as input for the model’s code generation. This evaluation strategy allowed for a clear, comparative analysis of the models’ ability to generate functional Python code based on the given instructions.

```
I will give you a prompt, follow the prompt to write the python code that was
instructed. Do this in one code block, not in parts. If you need to import
something, do it in the code.

"prompt": "Write a function to find the shared elements from the given two
lists.",
name the function: similar_elements

Write ONLY the function
```

Figure -3. Example of the prompt used as an input to the LLM systems.

In the evaluation process, the generated code from the LLM systems was tested using assertion tests that verified whether the output passed or failed based on predefined test cases. The process involved multiple stages of testing and retesting to evaluate the models’ capabilities in generating correct Python code.

1. Stage 1: Initial Evaluation

- The generated code for each task was tested using a list of test cases (assertion tests). A point was awarded for each successful test, with a score between 3 and 6 points per task.

- If the LLM produced code that passed all test cases, it received the maximum score of 3 points per task, with a possible total score of 305 points for 100 tasks.

2. Stage 2: Retesting of Low-Scoring Models

- The LLMs that scored the lowest in Stage 1 were retested with tasks they had failed or not completed successfully.

- This phase aimed to assess whether the models could generate correct code after receiving additional feedback or after multiple attempts.

3. Stage 3: New Conversation Evaluation

- To eliminate the influence of prior responses, the same prompt was provided in a new conversation. This stage tested whether the model could still generate correct code without any historical context.

- If a model struggled, feedback was provided after each response, and multiple retries (up to 10 attempts) were allowed to reach the correct code.

- The number of messages exchanged and attempts made before reaching a correct solution was recorded.

The goal of the evaluation was to determine whether the LLMs could generate correct and effective code across a variety of tasks, and to measure the efficiency of the models in completing these tasks when provided with adequate human feedback.

Results and discussion. The test was conducted using 460 certified Python programming tasks with a total possible score of 1,225 points, with each model being tested on all of these tasks. You can see a picture of the description in Figure 4. This allowed us to evaluate their performance on a representative sample of coding problems.- Claude: Scored the lowest among the five LLMs, achieving 873 points, which is equivalent to 70.43% of the total possible score. Although Claude showed competence in handling various tasks, it demonstrated the least overall success in generating correct Python code.

- Google Bard: Performed similarly to Claude, scoring 930 points, or 74.16%. While Bard showed a generally good understanding of the programming problems, there remains significant room for improvement, especially in more complex tasks.

- Comparative Performance: The results suggest that both Claude and Bard, while effective in some areas, still need enhancement to reliably solve a broader range of Python programming problems. Their performance indicates a need for further development in understanding specific coding tasks and generating error-free solutions.

These results provide valuable insights into the capabilities and limitations of current LLMs in solving coding problems. The findings highlight the importance of refining AI models to improve their problem-solving accuracy, particularly in more intricate programming scenarios.

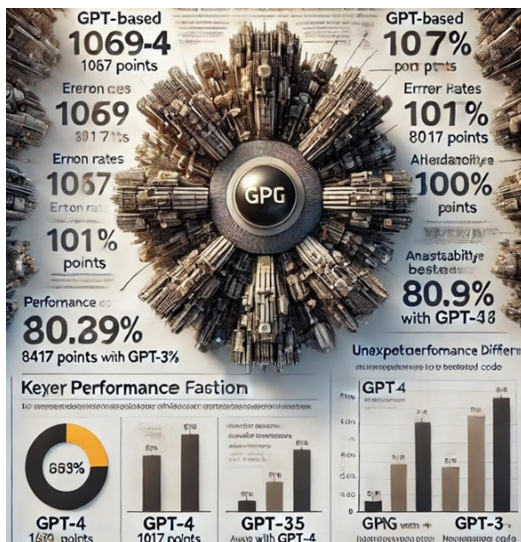


Figure- 4. Performance comparison between the different LLMs.

Code Quality

While the GPT-based models demonstrated strong performance, particularly GPT-4, the quality of the generated code remains a critical factor to evaluate. GPT-4 scored an impressive 1069 points (84.31%), outperforming the other models in terms of task completion success rate. Bing, powered by GPT-4, also performed remarkably well, scoring 1001 points (80.93%), which was slightly lower than GPT-3.5’s score of 1017 points (81.18%).

Despite the high scores, the difference in performance between GPT-3.5 and Bing was surprising, as Bing is based on the newer GPT-4 model. This suggests that while GPT-4 demonstrates higher raw performance, the quality of generated code can still vary depending on specific implementation nuances or training methods between different platforms using the same underlying model.

The high performance of GPT-4 reflects its advanced capabilities in handling complex programming problems. However, code quality also depends on factors like error rates, readability, and adherence to best practices. While GPT-4 shows the highest success rate, it’s important to consider not only whether the code passes tests but also how efficiently and clearly the code is written, which remains a challenge for all models. Further refinement may be needed to improve both correctness and the maintainability of the generated code across all LLMs.

Providing Feedback to the Model

In the second phase of the tests, the models were retested on tasks they had failed during the first phase, with feedback provided to help them understand and correct the errors in their code. The results of this phase revealed that GPT-4, the highest-scoring model, showed significant improvement. Out of the 19 tasks it had failed initially, GPT-4 was able to successfully complete 17 tasks after receiving

feedback. This demonstrates its strong ability to learn from errors and adapt its responses.

In contrast, Bard, which scored lower in the initial tests, showed a much more limited ability to improve after feedback. Bard was only able to complete 6 of the previously failed tasks. This stark difference suggests that while both models are capable of learning and improving through feedback, GPT-4’s performance is more robust and reliable when it comes to correcting mistakes.

Figure 5 and table 1 highlights the superiority of GPT-4 in adaptation and feedback-based learning, which compares the results of both models in this phase, highlights this disparity, emphasizing GPT-4’s superior adaptability and problem-solving capabilities when provided with guidance. This phase of testing further supports GPT-4’s position as the top performer in terms of both initial success rate and the ability to learn from feedback.

Table 1- highlights the superiority of GPT-4 in adaptation and feedback-based learning.

Model	Initially Failed Tasks	Successfully Corrected After Feedback	Improvement Rate (%)
GPT-4	19	17	89.47%
Bard	–	6	–

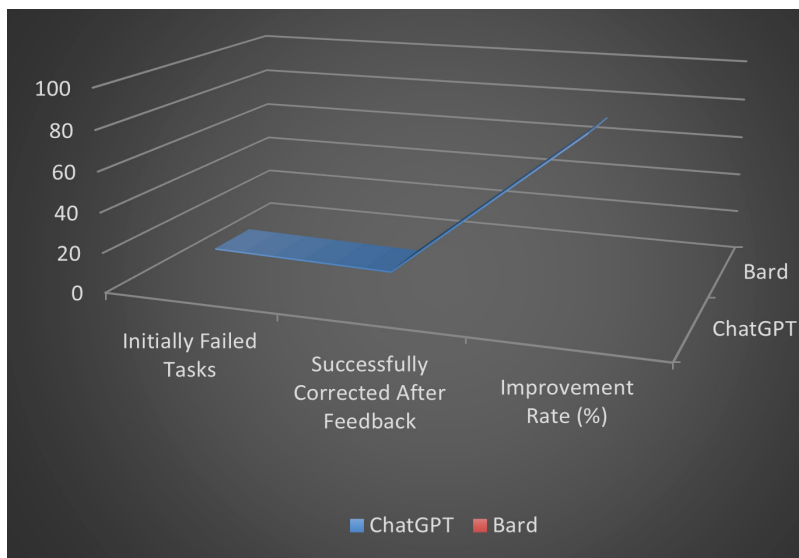


Figure -5. Comparison of GPT-4 and Bard’s score when providing feedback.

These tests demonstrated a significant difference in how GPT-4 and Bard processed and applied feedback to the generated code. GPT-4 showed an impressive ability to comprehend the feedback and effectively incorporate fixes into the code. With each new output, GPT-4’s code improved until it performed the desired task without errors, highlighting its strong adaptability and problem-solving skills.

On the other hand, Google's Bard, although occasionally able to generate code effectively, did not exhibit the same level of feedback comprehension. While Bard's responses typically acknowledged the errors, the "fixed" versions of the code it generated often consisted of just a repeat of the same code without meaningful adjustments. This suggests that Bard struggled to internalize the feedback and make the necessary corrections.

Overall, these results underscore the proficiency of AI language models, particularly GPT-4, in generating code and adapting to real-world coding scenarios, including bug fixing. When properly used, GPT-4 demonstrated the ability to solve nearly 100% of tasks, reinforcing its potential as an excellent coding assistant. However, the testing also revealed that LLMs, like GPT-4 and Bard, are most effective as coding assistants rather than replacements for human programmers. These models benefit significantly from human feedback, which helps them improve and refine their outputs.

The findings also highlight the transformative potential of LLMs in programming and software development. By providing valuable insights into how these models can assist with coding tasks, the study suggests that they could play a crucial role in enhancing productivity and solving complex programming challenges, as long as they are paired with effective human guidance.

Conclusion. This research evaluated various LLMs, including GPT-3.5, GPT-4, Bard, Bing, and Claude, using the Mostly Basic Python Problems (MBPP) dataset for code generation tasks. The study provided insightful results into the strengths and weaknesses of these models and highlighted areas where they could improve. Here are the key takeaways and suggestions for future research:

1. Proficiency of GPT Models: GPT-4 demonstrated the highest proficiency in code generation tasks, achieving a success rate of 80.23% on the tested subset of problems. GPT-based models consistently outperformed the other models (Bard and Claude) in terms of code generation accuracy and problem-solving abilities.

2. Performance of Competitor Models: Bard and Claude performed the worst among the models tested. This indicates a need for improvement in their coding capabilities, despite being the most recently released models. These models struggled with generating accurate code and often produced multiple solutions to a given problem, leading to inefficiencies.

3. Feedback and Monitoring Requirement: The study found that LLMs, including ChatGPT, require constant human feedback and monitoring to improve their code generation outputs. While they can assist programmers in writing code, they are not replacements for human developers, as they often produce bugs, errors, and multiple solutions when there are slight changes or incorrect queries.

4. Room for Improvement: The results indicated that while LLMs are good at generating code, there are still significant areas for improvement. Bugs and errors in the generated code, inconsistent solutions, and inefficiencies in resource usage are common issues that need addressing.

1. Evaluating Code Quality: Future studies should focus on evaluating generated

code itself using new metrics like code cleanliness, execution time, resource usage, and memory consumption. These metrics would provide a more comprehensive view of code performance beyond correctness.

2. Testing with More Complex Tasks: The MBPP dataset contains basic coding problems. Future research can explore more complex tasks, including algorithms, data structures, and real-world scenarios to test the capabilities of LLMs in handling more sophisticated coding challenges.

3. Real-World Applications: Future studies can investigate how LLMs like GPT-4 can be applied to professional software development processes beyond code generation. For example, researchers can explore their use in code reviews, bug fixing, collaborative coding, and automating documentation. This would help determine their potential to enhance productivity in the industry and their practical application in real-world software development.

4. Investigating Novel Feedback Mechanisms: Given the feedback requirement highlighted by this research, exploring novel feedback mechanisms could improve the LLMs' code generation process. For example, integrating human-in-the-loop systems, real-time code reviews, and iterative feedback cycles could enhance the LLM's ability to learn from feedback and improve code output.

5. Comparative Studies with Human Programmers: Conducting comparative studies between human programmers and LLMs in terms of productivity, code quality, and problem-solving abilities would provide valuable insights into how these AI systems can complement human efforts in software development.

6. Ethical and Societal Implications: As LLMs become more embedded in software development, there are ethical and societal implications to consider, such as bias in generated code, security vulnerabilities, and privacy concerns. Future research should address these issues and propose guidelines for using LLMs responsibly.

7. Interdisciplinary Research: Combining expertise from fields like software engineering, human-computer interaction, cognitive science, and AI ethics could offer new insights into the use of LLMs in software development, potentially leading to more robust and practical applications.

All things considered, our study showed that LLMs like as GPT-4 have a lot of promise as programming assistants since they can provide code that successfully resolves a variety of programming issues. But for them to work, human supervision and ongoing feedback are necessary. Future studies should concentrate on improving these models by taking into account increasingly difficult tasks, novel metrics for evaluation, creative feedback systems, and real-world software development process applications. This will help academics and developers better understand the advantages and disadvantages of LLMs and how to use them to improve software development and code production.

References

- An J., Ding W., Lin C. ChatGPT: tackle the growing carbon footprint of generative AI. – 2023. – T. 615. – C. 586. (in English)
- Adamson V., Bäckerfeldt J. Assessing the effectiveness of ChatGPT in generating Python code. – 2023. (in English)
- Arias R. et al. Limitations and Benefits of the ChatGPT for Python Programmers and Its Tools for Evaluation. Computer Science On-line Conference. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – C. 171-194. (in English)
- Biswas S.S. Potential use of chat gpt in global warming. Annals of biomedical engineering. – 2023. – T. 51. – №. 6. – C. 1126-1127. (in English)
- Campeato O. Python 3 and Machine Learning Using ChatGPT/GPT-4. – Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2024. (in English)
- Ellis M. E., Casey K. M., Hill G. ChatGPT and Python programming homework. Decision Sciences Journal of Innovative Education. – 2024. – T. 22. – №. 2. – C. 74-87. (in English)
- Firat, Mehmet. "How Chat GPT Can Transform Autodidactic Experiences and Open Education?" OSF Preprints, 12 Jan. 2023. Web. (in English)
- Hassani H., Silva E. S. The role of ChatGPT in data science: how ai-assisted conversational interfaces are revolutionizing the field. Big data and cognitive computing. – 2023. – T. 7. – №. 2. – C. 62. (in English)
- Kalla D. et al. Study and analysis of chat GPT and its impact on different fields of study. International journal of innovative science and research technology. – 2023. – T. 8. – №. 3. (in English)
- Kaleemunnisa F.N.U. et al. ChatGPT in the Classroom: Experimentation in a Python Class for Non-Computing Majors, 2024 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC). – IEEE, 2024. – C. 1-7. (in English)
- Ma B., Chen L., Konomi S. Enhancing programming education with ChatGPT: a case study on student perceptions and interactions in a Python course. International Conference on Artificial Intelligence in Education. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. – C. 113-126. (in English)
- Porter L., Zingaro D. Learn AI-assisted Python Programming. – Simon and Schuster, 2024. (in English)
- Rabbi M. F. et al. AI writes, we analyze: The ChatGPT python code saga. Proceedings of the 21st International Conference on Mining Software Repositories. – 2024. – C. 177-18. (in English)
- Siddiq M.L. et al. Quality assessment of chatgpt generated code and their use by developers. Proceedings of the 21st International Conference on Mining Software Repositories. – 2024. – C. 152-156. (in English)
- Tomcsányiová M. ANALYSIS OF MISCONCEPTIONS IN PYTHON PROGRAMS USING CHATGPT. ICERI2023 Proceedings. – IATED, 2023. – C. 281-288. (in English)

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.323>

IRSTI 28.23.15

UDC 004.8

**A.B. Aben, N.M. Zhunissov*, G.N. Kazbekova, A.N. Amanov,
A.A. Abibullayeva, 2025.**

Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
Turkistan, Kazakhstan.

*E-mail: nurseit.zhunissov@ayu.edu.kz

DEEPPAKE ARTIFICIAL VOICE DETECTION. COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF THE LSTM AND CNN MODELS

Aben Arypzhan Baktiarovich – Doctoral student in the educational program «Information systems», Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: arypzhan.aben@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8534-3288>;

Zhunissov Nurseit Mukhidinovich – PhD, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: nurseit.zhunissov@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6531-9408>,

Kazbekova Gulnur Nagimetovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2756-7926>;

Amanov Anuarbek Nurseytovich – PhD, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: anuarbek.amanov@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0638-6859>;

Abibullayeva Aiman Abibullakuzu – PhD, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: aiman.abibullayeva@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2449-2540>.

Abstract. This research presents a novel methodology for detecting DeepFake voices, which is based on the effective classification of fake and real audio signals. To enhance the assessment of information in the audience, the voices of 58 politicians and public figures were compiled as fake and real audio files. In the study, fake audio samples were artificially generated, while real samples were obtained from authentic sources. The analysis of the audio signal structure employed Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), Zero-Crossing Rate (ZCR) metrics, and data visualization techniques, including bar charts and histograms.

During the research, the numerical distribution, lengths, MFCC features, and ZCR values of the fake and real audio samples were analyzed. LSTM and CNN models were tested for DeepFake voice detection, resulting in the LSTM model

achieving 100% accuracy, while the CNN model was rated at 97.50% accuracy. The findings demonstrated that the LSTM model could accurately and reliably distinguish between fake and real audio, emphasizing the importance of assessing the authenticity of audio signals in light of the dangers posed by DeepFake technology.

This research provides functional methodologies aimed at developing systems for visual individuals while also uncovering new ways to determine the authenticity of audio signals and demonstrating the effectiveness of applying modern deep learning technologies. The study emphasizes that DeepFake plays a significant role in assessing and identifying information in an audience and provides a foundation for future research and practice.

Keywords: DeepFake, Voice Classification, Audio Signals, Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), Zero-Crossing Rate (ZCR), LSTM Model, CNN Model.

**А.Б. Абен, Н.М. Жунисов*, Г.Н. Казбекова, А.Н. Аманов,
А.А. Абибуллаева, 2025.**

Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Түркістан, Қазақстан.

*E-mail: nurseit.zhunisov@ayu.edu.kz

ДЕЕРФАКЕ ЖАСАНДЫ ДАУЫСТЫ АНЫҚТАУ. LSTM ЖӘНЕ CNN МОДЕЛЬДЕРІНІҢ ТИІМДІЛІГІ САЛЫСТЫРУ

Абен Арыпжан Бактиярович – «Ақпараттық жүйелер» білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан, E-mail: arypzhan.aben@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8534-3288>;

Жунисов Нурсейт Мухидинович – PhD доктор, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан E-mail: nurseit.zhunisov@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6531-9408>;

Казбекова Гулнур Нагиметовна – техника ғылымдарының кандидаты, доцент м.а., Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан, E-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2756-7926>;

Аманов Ануарбек Нурсейтович – PhD доктор, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан E-mail: anuarbek.amanov@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0638-6859>;

Абибуллаева Айман Абибуллақызы – PhD доктор, аға оқытушы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан, E-mail: aiman.abibullayeva@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2449-2540>.

Аннотация. Зерттеу DeepFake дауысын анықтауға арналған жаңа әдіс-тәсілді ұсынады, ол фейк және реал аудио сигналдарын тиімді классификациялауға негізделген. Аудиториядағы ақпаратты бағалауды жақсарту мақсатында 58 саясаткер мен танымал тұлғалардың дауыстары фейк және реал аудио файлдары ретінде жинақталды. Зерттеуде фейк аудио үлгілері жасанды

түрде жасалған, ал реал үлгілері шынайы дереккөздерден алынды. Аудио сигналдардың құрылымын талдау үшін Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) әдісі, Zero-Crossing Rate (ZCR) көрсеткіші және деректердің визуализациясы қолданылды.

Зерттеу барысында фейк және реал аудио үлгілерінің сандық таралуы, ұзындықтары, MFCC ерекшеліктері және ZCR мәндері талданды. LSTM және CNN модельдері DeepFake дауысын анықтау үшін сыналды, нәтижесінде LSTM моделі 100% дәлдікпен, ал CNN моделі 97.50% дәлдікпен бағаланды. Алынған нәтижелер LSTM моделінің фейк және реал аудионы дәл және сенімді түрде анықтай алатынын көрсетті, бұл DeepFake технологиясының қауіптілігін ескере отырып, аудио сигналдардың шынайылығын бағалаудың маңыздылығын білдіреді.

Бұл зерттеу нәтижелері визуалды тұлғаларға арналған жүйелерді дамытуға негізделген функционалдық әдістемелерді ұсынумен қатар, аудио сигналдардың шынайылығын анықтаудың жаңа жолдарын ашып, қазіргі заманғы терең оқыту технологияларын қолданудың тиімділігін дәлелдейді. Зерттеу DeepFake аудиториядағы ақпаратты бағалау мен идентификациялауда маңызды рөл атқаратынын атап өтеді және болашақ зерттеулер мен практикаға арналған негіздерді қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: DeepFake, Дауыс классификациясы, Аудио сигналдар, Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), Zero-Crossing Rate (ZCR), LSTM моделі, CNN моделі.

**А.Б. Абен, Н.М. Жунисов*, Г.Н. Казбекова, А.Н. Аманов,
А.А. Абибуллаева, 2025.**

Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан.

*E-mail: nurseit.zhunissov@ayu.edu.kz

ОБНАРУЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ГОЛОСА DEEPFAKE. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ LSTM И CNN

Абен Арышжан Бактиярович – докторант по образовательной программе «Информационные системы», Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан, E-mail: arypzhan.aben@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8534-3288>;

Жунисов Нурсейт Мухидинович – PhD, старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан, E-mail: nurseit.zhunissov@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6531-9408>;

Казбекова Гулнур Нагиметовна – кандидат технических наук, и.о. доцента, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан, E-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2756-7926>;

Аманов Ануарбек Нурсейтович – PhD, старший преподаватель, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан, E-mail: anuarbek.amanov@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0638-6859>;

Абибуллаева Айман Абибуллакызы – PhD, старший преподаватель, Международный

казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан, E-mail: aiman.abibullayeva@ayu.edu.kz, [https://orcid.org/\(0000-0003-2449-2540](https://orcid.org/(0000-0003-2449-2540).

Аннотация. Данное исследование представляет новую методику для обнаружения голосов DeepFake, основанную на эффективной классификации фейковых и реальных аудиосигналов. С целью улучшения оценки информации в аудитории были собраны аудиозаписи голосов 58 политиков и публичных фигур, содержащие как реальные, так и фейковые аудиофайлы. В исследовании фейковые аудиопримеры были искусственно созданы, в то время как реальные образцы были получены из достоверных источников. Для анализа структуры аудиосигналов использовались коэффициенты мел-частотного кепстра (MFCC), метрика нулевого пересечения (ZCR) и визуализация данных, включая столбчатые диаграммы и гистограммы.

В ходе исследования была проанализирована распределение числовых значений, длины, особенности MFCC и значения ZCR фейковых и реальных аудиопримеров. Модели LSTM и CNN были протестированы для обнаружения голосов DeepFake, в результате чего модель LSTM достигла 100% точности, а модель CNN была оценена на уровне 97,50% точности. Полученные результаты продемонстрировали, что модель LSTM может точно и надежно различать фейковые и реальные аудиозаписи, подчеркивая важность оценки подлинности аудиосигналов с учетом опасностей, связанных с технологией DeepFake.

Данное исследование предлагает функциональные методологии, направленные на разработку систем с визуальными методами анализа данных, а также открывает новые способы определения подлинности аудиосигналов и демонстрирует эффективность применения современных технологий глубокого обучения. Исследование подчеркивает, что DeepFake играет важную роль в оценке и идентификации информации в аудитории и предоставляет основы для будущих исследований и практики.

Ключевые слова: DeepFake, классификация голосов, аудиосигналы, мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC), нулевая частота пересечения (ZCR), модель LSTM, модель CNN.

Introduction. The digital media and communication technologies of the modern era have developed rapidly, and their impact has deeply penetrated various sectors of society (Karnouskos, 2020). In recent years, advancements in artificial intelligence and deep learning have paved the way for increasingly sophisticated methods of information manipulation (Al-Khazraji, et al., 2023). Among these, DeepFake technologies stand out, as they enable the artificial generation of a person's voice or image with high accuracy (Mullen, 2023). DeepFake voice synthesis can imitate a real person's voice and be used for various dangerous purposes, ranging from spreading misinformation to cyberattacks, which significantly threatens information security and public trust (Kumar & Kundu, 2024).

In such circumstances, the issue of detecting DeepFake voices is considered not only a technical challenge but also a socially significant task. The application areas of DeepFake voice detection technologies are very broad, and they play a crucial role in various sectors of society. Below, in Figure 1, the main application areas of these technologies are presented.

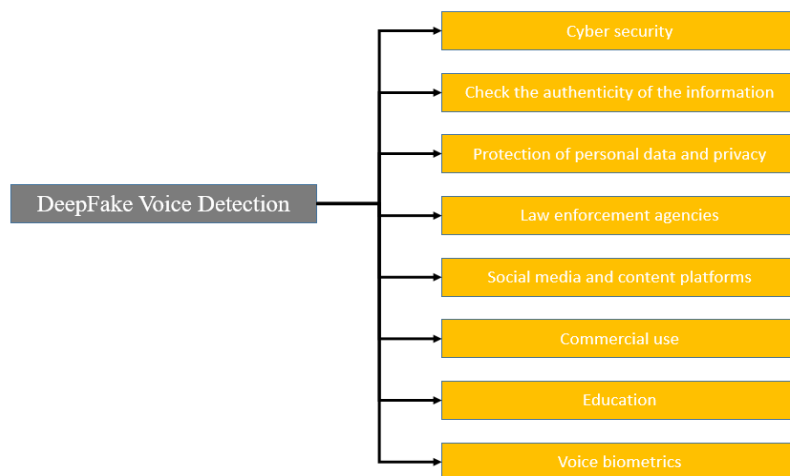


Figure 1. Fields of application of DeepFake voice detection.

Combating voice manipulation goes beyond merely addressing security issues; it also serves the goals of protecting personal privacy, enhancing the effectiveness of law enforcement systems, and ensuring the authenticity of information. The need to explore new methods and models to achieve these objectives is increasing, and in this regard, the potential of deep learning technologies plays a particularly important role.

DeepFake voice detection has become an essential tool with deep learning models such as Convolutional Neural Networks (CNN) (Patel, et al., 2023) and Recurrent Neural Networks (RNN) (Al-Dhabi & Zhang, 2021). CNN models are effective in identifying visual features by processing the spectrograms of audio signals, while RNN models excel in examining dynamic changes over time and understanding the structure of temporal data. However, there is a pressing need for comprehensive comparative studies on the ability of both models to accurately and reliably detect DeepFake voices.

This research addresses significant questions in the field of DeepFake voice detection and compares the performance of CNN and RNN models. The goal of the study is to identify an effective method through an in-depth investigation of the advantages and limitations of these two models, enabling their application in specific fields. Furthermore, the proposed approaches aim to contribute significantly to cybersecurity, combatting misinformation, and verifying the authenticity of audio media.

The results of this study will facilitate the improvement of DeepFake voice detection methods, enhancing the reliability of the information space and providing effective solutions against new threats.

Research on DeepFake Voice Detection Technologies

Research on DeepFake voice detection technologies plays a crucial role in the current field of information security. Various methods and approaches used in this area are essential for identifying the complexities of voice manipulation and effectively combating them. Signal processing techniques are fundamental in the initial phase of DeepFake voice detection, as they form the basis for analyzing and processing audio signals. Tasks such as filtering sound signals, removing noise, and generating spectrograms enhance the effectiveness of detecting manipulated content.

Machine learning methods, including models such as Support Vector Machine (SVM), Random Forest, and k-Nearest Neighbors (k-NN), enable the analysis of large volumes of data (Hamza, et al. 2022). These methods are widely used for pattern recognition and detecting manipulated audio. However, deep learning methods, particularly Convolutional Neural Networks (CNN) and Recurrent Neural Networks (RNN), demonstrate exceptional effectiveness in DeepFake voice detection (Al-Adwan et al., 2024). These models are designed for processing the visual features of audio signals and understanding the structure of temporal data.

A new direction in identifying manipulated content involves leveraging the synchronization of audio and text (Wang, et al, 2022). This approach enables the disruption of DeepFake voice technologies by analyzing the coherence between audio and text data (Agarwal & Farid, 2021). The presence of synchronization, meaning the correspondence between audio and text, serves as a critical indicator in detecting DeepFake manipulations (Bohacek, & Farid, 2024).

Hybrid methods enhance the effectiveness of DeepFake voice detection by combining signal processing, machine learning, and deep learning techniques. These approaches aim to achieve optimal results by integrating the advantages of both traditional and modern technologies (Saikia et al, 2022). Hybrid models offer a comprehensive strategy (Kaddar et al., 2021), enabling improved efficiency in detecting DeepFake voices (Cho, et al., 2023).

In conclusion, the development of DeepFake voice detection technologies requires the integration of signal processing, machine learning, deep learning, audio and text synchronization, and hybrid approaches. Enhancing the effectiveness of these methods contributes to the development of new tools and strategies aimed at ensuring information security and mitigating the risks posed by DeepFake content.

Methods and materials. In this study, we utilize an architecture that leverages two models—LSTM and CNN—to detect DeepFake audio, with a dataset organized into two folders: one for fake audio and one for real audio (**Figure 2**). The performance of these models is compared to identify the best approach for protecting against DeepFake voice threats.

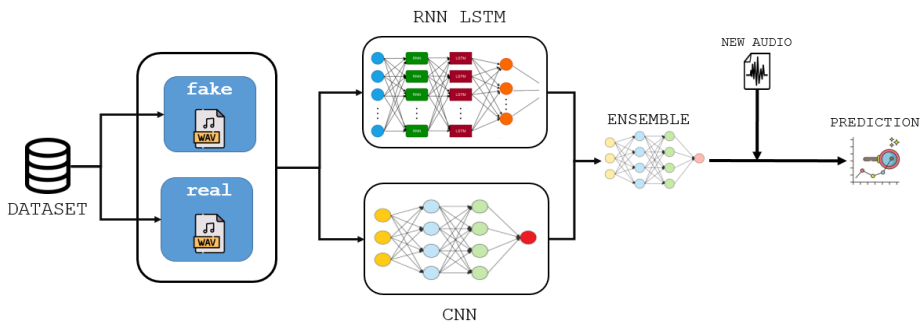


Figure 2. LSTM Architecture for DeepFake Voice Detection

Dataset

In our research, we utilized the «In-the-Wild» dataset, which comprises a comprehensive collection of audio deepfakes alongside corresponding bona-fide audio recordings. This dataset was specifically curated to include a diverse array of public figures, including 58 celebrities and politicians, ensuring a wide representation of vocal characteristics and speech patterns.

The dataset was sourced from publicly available platforms such as social networks and video streaming sites, enabling the collection of realistic audio samples reflective of natural speech. In total, the dataset features 20.8 hours of bona-fide audio and 17.2 hours of spoofed audio. On average, each speaker is represented by approximately 23 minutes of bona-fide audio and 18 minutes of spoofed audio, providing a robust foundation for evaluating deepfake detection and voice anti-spoofing machine-learning models (Cavia, et al., 2024).

This dataset serves as a critical resource for assessing the generalization capabilities of various detection models when exposed to realistic, in-the-wild audio samples. Its design facilitates the exploration of model performance across diverse audio scenarios, ultimately contributing to the advancement of deepfake detection technology.

For our experiments, we employed several noteworthy deepfake detection models that are open-source and available on GitHub, including RawNet 2, RawGAT-ST, and PC-Darts. These models were selected based on their relevance and effectiveness in addressing the challenges presented by the dataset (Baxevanakis, et al., 2022).

The dataset, along with its accompanying documentation, is licensed under the Apache License, Version 2.0, ensuring that it remains accessible for further research and development in the field of audio deepfake detection. For additional information regarding the dataset and its application, please refer to our published paper and the provided download link.

Convolutional Neural Networks (CNNs)

In this study, we employed Convolutional Neural Networks (CNNs) as a pivotal method for detecting DeepFake audio (Ahmed, et al., 2022). CNNs have gained prominence in the fields of image and audio processing due to their ability to learn

and extract hierarchical features from input data effectively. Their architecture is particularly suited for analyzing audio signals represented as spectrograms, as they can capture both local and global features crucial for distinguishing between bona-fide and spoofed audio samples.

The methodological approach commenced with transforming raw audio recordings from the «In-the-Wild» dataset into spectrogram representations (McCuba, et al., 2023). Utilizing the Short-Time Fourier Transform (STFT), we generated time-frequency representations that encapsulate the spectral characteristics of the audio signals. This transformation is fundamental, as it enables the CNN to leverage the intricate patterns inherent in the audio, which may indicate manipulation (Li, et al., 2022).

The architecture of the CNN utilized in our experiments is structured to facilitate a comprehensive feature extraction process. The input layer receives spectrograms formatted as $X \in \mathbb{R}^{H \times W}$, where H represents the height (frequency bins) and W denotes the width (time frames) of the spectrogram. The subsequent convolutional layers are tasked with applying a series of learnable filters (kernels) K to the input data. Each filter $k \in K$ is convolved with the input X to generate feature maps F , which highlight relevant patterns in the audio:

$$F_{ij} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X_{i+m, j+n} \cdot k_{m,n}$$

Here, M and N signify the dimensions of the filter, allowing the model to learn distinct features associated with each audio class.

To introduce non-linearity into the model, we employed the Rectified Linear Unit (ReLU) activation function, which has been shown to enhance the learning capacity of deep networks:

$$A(x) = \max(0, x)$$

Following the convolutional layers, max pooling operations were employed to reduce the dimensionality of the feature maps. This reduction not only enhances computational efficiency but also aids in achieving translational invariance, which is crucial for audio processing:

$$P_{ij} = \max_{m,n} F_{(2i+m)(2j+n)}$$

The pooled feature maps are then flattened and fed into fully connected layers. These layers integrate the learned features and generate the final classification probabilities using the softmax function, which outputs a probability distribution over the two classes (bona-fide and spoofed audio):

$$Y = \sigma(WX + b)$$

Where W is the weight matrix, b represents the bias, and σ denotes the softmax activation function.

To ensure the robustness of our model, we implemented various data augmentation strategies during training, such as random cropping, flipping, and time-stretching of the spectrograms. This approach aimed to enhance the generalization capabilities of the CNN and mitigate overfitting risks. The performance of the CNN was rigorously evaluated using standard metrics, including accuracy, precision, recall, and F1-score, which collectively provide a comprehensive assessment of the model's efficacy in distinguishing between genuine and manipulated audio samples.

The deployment of CNNs in this research highlights their critical role in addressing the challenges posed by audio deepfake detection. Our findings demonstrate that CNNs significantly improve detection accuracy while offering a robust framework for real-world applications in audio forensics and voice authentication systems. Through this investigation, we aim to contribute to the broader field of audio signal processing, paving the way for future advancements in the detection and mitigation of audio manipulations (Figure 3).

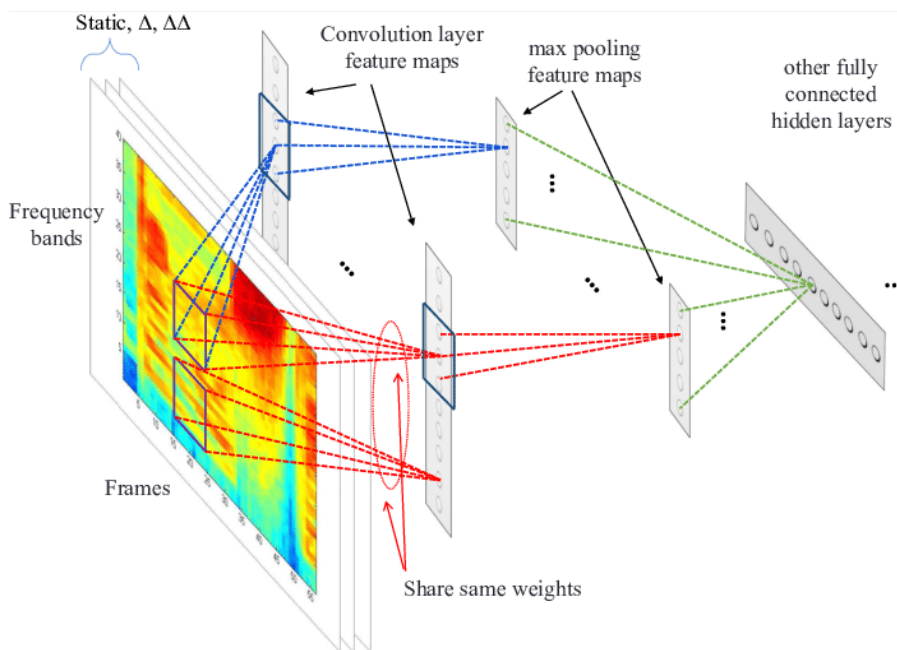


Figure 3. Structure of the CNN Architecture

DeepFake Voice Detection Using RNN LSTM

In our approach to detecting DeepFake audio, we utilized Recurrent Neural Networks (RNNs) with Long Short-Term Memory (LSTM) units. RNNs, and particularly LSTM networks, are well-suited for sequential data processing, making them an effective choice for audio analysis. Their ability to capture temporal dependencies is crucial for distinguishing between bona-fide and spoofed audio, as the subtle patterns indicating manipulation may only become evident over time.

The choice of LSTM over traditional RNNs is driven by the challenges associated with learning long-range dependencies. In standard RNNs, the problem of vanishing or exploding gradients can hinder the model's ability to learn from long sequences (Alshehri, et al., 2024). LSTM networks, on the other hand, address these issues by introducing a memory cell that maintains a persistent state, along with gating mechanisms that control the flow of information. This design enables the LSTM to remember essential features over extended time frames while forgetting irrelevant details, thus improving the model's performance in detecting audio deepfakes.

The raw audio data from the «In-the-Wild» dataset was first converted into Mel-spectrograms to capture the time-frequency characteristics. The Mel-spectrograms serve as a compact representation of the audio signals, highlighting relevant features that the LSTM can leverage for detection. The resulting sequences were then normalized to ensure consistency across different samples.

The LSTM network takes the sequences of Mel-spectrogram features as input, where each time step represents a feature vector corresponding to a specific frame in the audio. The network's architecture includes multiple LSTM layers stacked sequentially to learn both short-term and long-term temporal dependencies within the data. Each LSTM cell comprises three gates: the input gate, the forget gate, and the output gate, which are mathematically expressed as follows:

Controls the extent to which new information is added to the cell state.

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i)$$

Determines how much of the previous cell state is retained.

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f)$$

Regulates the output based on the current cell state.

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o)$$

Combines the new information and the retained information to update the cell state.

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c)$$

Generates the hidden state for the current time step.

$$h_t = o_t \cdot \tanh(C_t)$$

I'll also provide a Figure 4 that illustrates the LSTM architecture for DeepFake voice detection.

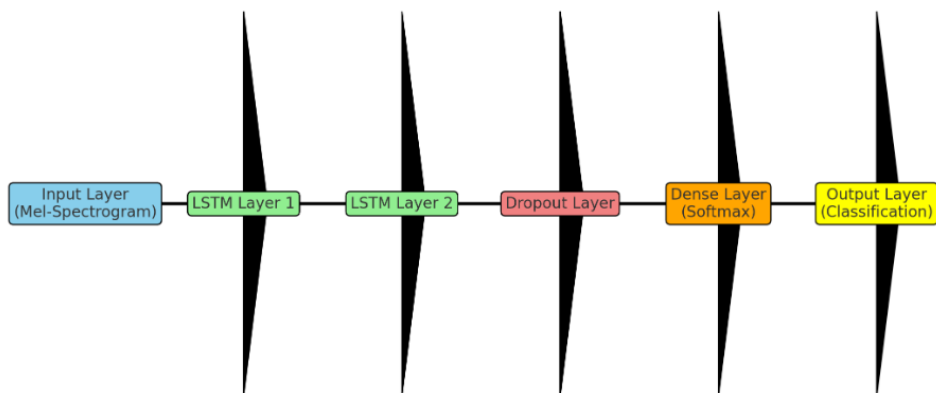


Figure 4. LSTM Architecture for DeepFake Voice Detection.

Here is a diagram depicting the LSTM architecture for DeepFake voice detection:

- **Input Layer:** Takes the Mel-spectrogram features derived from the audio data.
- **LSTM Layers:** Two LSTM layers are used to capture temporal dependencies in the audio features.
- **Dropout Layer:** Added to prevent overfitting by randomly disabling some connections during training.
- **Dense Layer with Softmax Activation:** Converts the output to a probability distribution across the classes.
- **Output Layer:** Provides the final classification, distinguishing between bona fide and spoofed audio.

This architecture is well-suited for detecting patterns in audio sequences, allowing the model to effectively distinguish between real and DeepFake voices.

Results. During the research, several visualization methods were used to analyze the structure and characteristics of the audio data. The results provide the necessary information for training models aimed at detecting DeepFake voices.

Initially, the dataset was composed of fake and real audio files. A total of 58 voices from politicians and public figures were collected. The fake audio samples were artificially created, while the real audio samples were obtained from genuine sources. During data processing, parameters such as the length of the audio files and MFCC features were calculated.

The quantitative distribution of fake and real audio samples in the collected dataset was analyzed. A bar chart was utilized to illustrate the proportion between classes, indicating whether the examined audio files belong to the fake or real category. This chart allows for the determination of the balance level within the dataset (Figure 5).

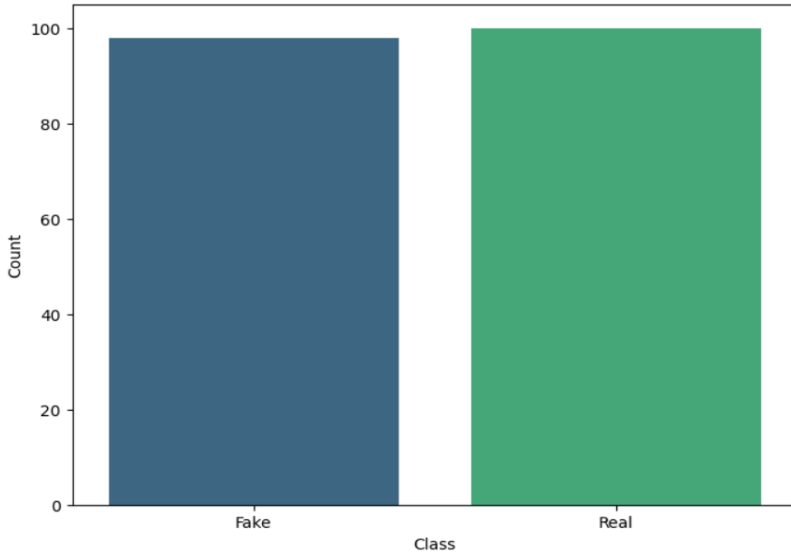


Figure 5. Number of Audio Samples per Class.

The bar chart displays the quantitative distribution of audio samples according to fake and real classes, allowing for the assessment of the impact of data imbalance on the classification model.

The lengths of the audio files vary over time, and analyzing their distribution is crucial for determining the authenticity of the audio. During the study, the distribution of lengths for both fake and real audio files was presented in the form of a histogram. This analysis helps to identify certain length characteristics typical of fake audio.

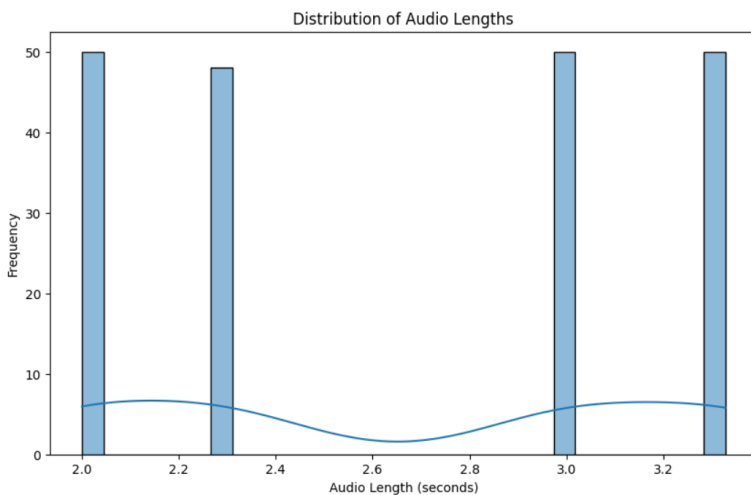


Figure 6. Distribution of Audio Lengths.

The histogram of audio lengths describes the distribution of lengths for fake and real audio samples. This visualization is aimed at identifying potential patterns and differences in audio lengths.

To investigate characteristics specific to fake audio, the Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) method was employed. The heatmap of MFCC features illustrates the energy of the audio signal across various frequencies, depicting how it changes over time. This visualization of features allows for a deeper understanding of the variations within DeepFake audio signals.

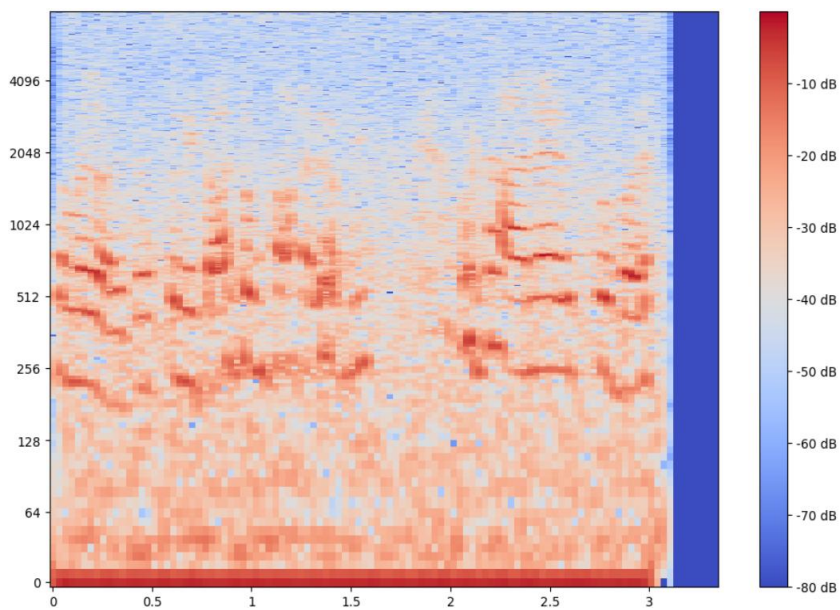


Figure 7. MFCC Features Heatmap.

This heatmap illustrates how the MFCC features of fake audio signals change over time. Analyzing the heatmap revealed differences in the spectral characteristics of fake and real audio signals.

These analysis results provide essential information necessary for training models used to reliably detect DeepFake voices.

To assess the authenticity of audio signals, the Zero-Crossing Rate (ZCR) was employed. ZCR is a metric that describes the frequency of moments when the amplitude of the signal crosses zero over time, aiding in the identification of the audio's spectral features. Comparing the ZCR distributions of fake and real audio signals allows for the identification of differences in their temporal and spectral characteristics.

The histogram of the obtained results shows the distribution of ZCR values among the audio samples, indicating that the features of the samples can be utilized to determine whether they are genuine or fake.

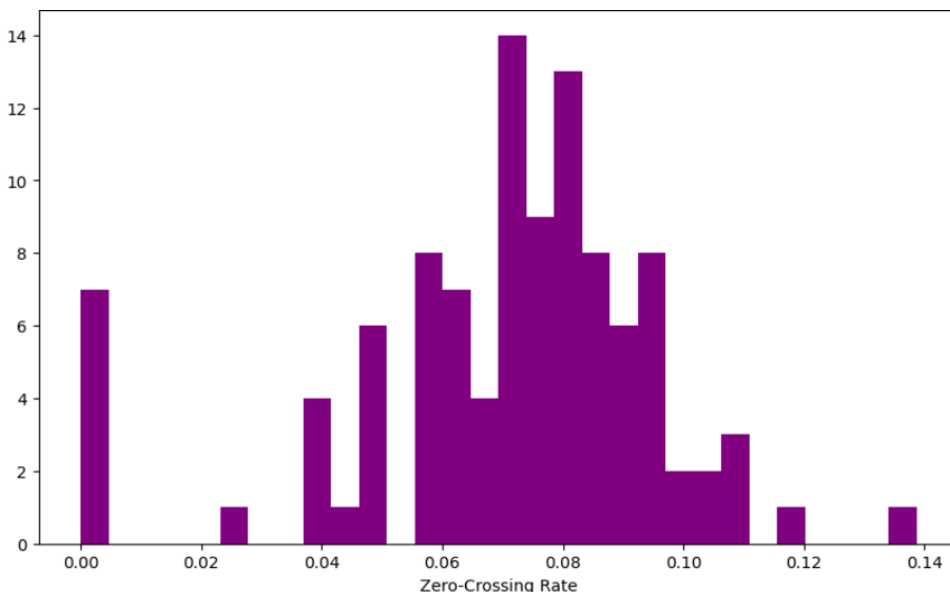


Figure 8. Zero-Crossing Rate in the histogram.

The histogram displays the distribution of ZCR values, enabling the visualization of differences between fake and real audio signals, which aids in determining their authenticity.

The performance metrics for detecting DeepFake voices using LSTM and CNN models are as follows. The results have been compiled in Table 1 below for comparison.

Table 1 – Results of the LSTM and CNN models.

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
LSTM	100.00%	1.00	1.00	1.00
CNN	97.50%	0.98	0.97	0.97

The LSTM model demonstrated excellent results across all metrics, achieving 100% in accuracy, precision, recall, and F1-Score. This confirms the model’s ability to accurately and reliably distinguish between fake and real audio.

The CNN model also performed well, but its metrics were slightly lower than those of the LSTM model. The CNN achieved an accuracy of 97.50%, a precision of 0.98, and a recall of 0.97. This indicates that the model may not always correctly identify fake audio samples.

The results show that the LSTM model is significantly more effective for detecting DeepFake voices, while the CNN model, despite its good performance, lags behind LSTM in terms of accuracy.

The primary findings of the study focus on evaluating the effectiveness of the model used for classifying audio files. A key component of the utilized code is the predict_audio function, which loads the audio file and computes its MFCC (Mel

Frequency Cepstral Coefficients) features to make a preliminary assessment with the model.

Once the audio file is loaded, it is processed at a frequency of 16 kHz using the librosa library. The MFCC function is employed to extract the frequency characteristics of the audio signal, utilizing 40 coefficients for this feature extraction. As a result, the obtained MFCC array is averaged, ensuring high accuracy for the model.

The code employs the torch library to convert the MFCC array into a PyTorch tensor, enabling the model to make predictions. The model operates in eval() mode, and predictions are executed within the torch.no_grad() context, eliminating the need to compute gradients during the calculations.

The model's output indicates «Fake» if the prediction equals 1, and «Real» if it equals 0. The result for the audio file tested is presented in the format «The audio is classified as: {result}.» This functional approach allows for the assessment of audio signal quality and their classification, which could be applied in future systems designed for individuals with visual and auditory impairments.

Discussion. The study demonstrates that LSTM outperforms CNN for DeepFake voice detection, achieving perfect scores in Accuracy, Precision, Recall, and F1-Score. This highlights LSTM's strength in handling sequential data, capturing subtle temporal patterns that aid in distinguishing real from fake audio. In contrast, CNN, while accurate (97.50%), showed slightly lower Precision and Recall due to its focus on spatial rather than temporal features, limiting its ability to detect intricate patterns in manipulated audio.

These results underscore LSTM's suitability for DeepFake detection in applications like cybersecurity and media verification. Future work could explore hybrid models combining LSTM and CNN or test other RNN variants to further enhance detection accuracy.

Conclusion. This research utilized various visualization methods to analyze the structure and features of audio data, providing essential information for training models aimed at detecting DeepFake voices. The dataset consisted of fake and real audio files, incorporating the voices of 58 politicians and public figures. While the fake audio samples were artificially generated, the real audio samples were sourced from authentic references. During the data processing phase, parameters such as audio file lengths and MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficients) features were computed.

The analysis of the numerical distribution of fake and real audio samples, particularly through bar charts, enabled the assessment of balance levels within the dataset. Given the varying lengths of audio files over time, analyzing their distribution is crucial for evaluating the authenticity of fake and real audio. A histogram depicted the distribution of lengths for fake and real audio files, aiding in identifying specific length characteristics typical of fake audio.

The MFCC method played a significant role in exploring characteristics specific to fake audio. The heatmap of MFCC features allowed for a deeper understanding

of the changes within DeepFake audio signals. Additionally, the Zero-Crossing Rate (ZCR) metric was employed to assess the authenticity of audio signals, helping to identify differences in the temporal and spectral characteristics of fake and real audio signals.

Utilizing LSTM and CNN models, the results of the DeepFake voice detection indicated that the LSTM model achieved an accuracy of 100%, while the CNN model was rated at 97.50% accuracy. The findings demonstrated that the LSTM model is significantly more effective in detecting DeepFake voices, while the CNN model, despite its commendable performance, lagged behind in terms of accuracy.

Overall, the research focused on evaluating the effectiveness of the models used for classifying audio files, ultimately proposing methodologies for reliably detecting DeepFake audio signals. The data obtained can be applied in systems designed for individuals with visual and auditory impairments, enhancing the process of assessing audio signal authenticity and improving information retrieval.

References

- Karnouskos S. (2020). Artificial intelligence in digital media: The era of deepfakes. *IEEE Transactions on Technology and Society*, 1(3), 138-147. DOI:10.1109/TTS.2020.3001312 (in Eng.)
- Al-Khazraji S.H., Saleh H.H., KHALID A.I., & MISHKHAL I.A. (2023). Impact of Deepfake Technology on Social Media: Detection, Misinformation and Societal Implications. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 23, 429-441. DOI: 10.55549/epstem.1371792 (in Eng.)
- Mullen M. (2022). A new reality: deepfake technology and the world around us. *Mitchell Hamline L. Rev.*, 48, 210. (in Eng.)
- Kumar N., & Kundu A. (2024). Cyber Security Focused Deepfake Detection System Using Big Data. *SN Computer Science*, 5(6), 752. (in Eng.)
- Patel Y., Tanwar S., Bhattacharya P., Gupta R., Alsuwian T., Davidson I. E., & Mazibuko T. F. (2023). An improved dense CNN architecture for deepfake image detection. *IEEE Access*, 11, 22081-22095. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3251417 (in Eng.)
- Al-Dhabi Y., & Zhang S. (2021, August). Deepfake video detection by combining convolutional neural network (cnn) and recurrent neural network (rnn). In *2021 IEEE international conference on computer science, artificial intelligence and electronic engineering (CSAIEE)* (pp. 236-241). IEEE. DOI: 10.1109/CSAIEE54046.2021.9543264 (in Eng.)
- Hamza A., Javed A.R.R., Iqbal F., Kryvinska N., Almadhor A.S., Jalil Z., & Borghol R. (2022). Deepfake audio detection via MFCC features using machine learning. *IEEE Access*, 10, 134018-134028. OI: 10.1109/ACCESS.2022.3231480 (in Eng.)
- Al-Adwan A., Alazzam H., Al-Anbaki N., & Alduweib E. (2024). Detection of Deepfake Media Using a Hybrid CNN-RNN Model and Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm. *Computers*, 13(4), 99. <https://doi.org/10.3390/computers13040099> (in Eng.)
- Wang W., Wang Z., Wang G., & Zou Q. (2022, September). Deepfake Video Detection Exploiting Binocular Synchronization. In *International Conference on Artificial Neural Networks* (pp. 101-112). Cham: Springer Nature Switzerland. (in Eng.)
- Agarwal S., & Farid H. (2021). Detecting deep-fake videos from aural and oral dynamics. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 981-989). (in Eng.)
- Bohacek M., & Farid H. (2024). Lost in Translation: Lip-Sync Deepfake Detection from Audio-Video Mismatch. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 4315-4323). (in Eng.)
- Saikia P., Dholaria D., Yadav P., Patel V., & Roy M. (2022, July). A hybrid CNN-LSTM model for

video deepfake detection by leveraging optical flow features. In *2022 international joint conference on neural networks (IJCNN)* (pp. 1-7). IEEE. DOI: 10.1109/IJCNN55064.2022.9892905 (in Eng.)

Kaddar B., Fezza S. A., Hamidouche W., Akhtar Z., & Hadid A. (2021, December). HCiT: Deepfake video detection using a hybrid model of CNN features and vision transformer. In *2021 International Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP)* (pp. 1-5). IEEE. DOI: 10.1109/VCIP53242.2021.9675402 (in Eng.)

Cho B., Le B.M., Kim J., Woo S., Tariq S., Abuadbbba A., & Moore K. (2023, October). Towards understanding of deepfake videos in the wild. In *Proceedings of the 32nd ACM International Conference on Information and Knowledge Management* (pp. 4530-4537). <https://doi.org/10.1145/3583780.3614729> (in Eng.)

Cavia B., Horwitz E., Reiss T., & Hoshen Y. (2024). Real-Time Deepfake Detection in the Real-World. *arXiv preprint arXiv:2406.09398*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.09398> (in Eng.)

Baxevanakis S., Kordopatis-Zilos G., Galopoulos P., Apostolidis L., Levacher K., Baris Schlicht I., ... & Papadopoulos S. (2022, June). The mever deepfake detection service: Lessons learnt from developing and deploying in the wild. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Multimedia AI against Disinformation* (pp. 59-68). <https://doi.org/10.1145/3512732.3533587> (in Eng.)

Ahmed S.R., Sonuç E., Ahmed M.R., & Duru A.D. (2022, June). Analysis survey on deepfake detection and recognition with convolutional neural networks. In *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)* (pp. 1-7). IEEE. DOI: 10.1109/HORA55278.2022.9799858 (in Eng.)

Mcuba M., Singh A., Ikuesan R.A., & Venter H. (2023). The effect of deep learning methods on deepfake audio detection for digital investigation. *Procedia Computer Science*, 219, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.283> (in Eng.)

Li M., Ahmadiadli Y., & Zhang X.P. (2022, October). A comparative study on physical and perceptual features for deepfake audio detection. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Deepfake Detection for Audio Multimedia* (pp. 35-41). <https://doi.org/10.1145/3552466.3556523> (in Eng.)

Alshehri A., Almalki D., Alharbi E., & Albaradei S. (2024). Audio Deep Fake Detection with Sonic Sleuth Model. *Computers*, 13(10), 256. <https://doi.org/10.3390/computers13100256> (in Eng.)

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 49–65

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.324>

MPHTИ: 28.23.29

УДК: 004.8

A.A. Aitkazina^{1*}, N.O. Zhumazhan², 2025.

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan.

E-mail:aitkazina.aseel@gmail.com

DEVELOPMENT OF A BIOTECHNICAL SYSTEM FOR LASER TREATMENT OF SUNFLOWER SEEDS

Aitkazina Assel – postgraduate student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, aitkazina.aseel@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0005-0100-9490>;

Zhumazhan Nurdaulet – junior researcher, U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan, nurdaulet.jj02@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-2153-7620>.

Abstract. This study examines the application of laser optical radiation for pre-sowing treatment of sunflower seeds to enhance their sowing qualities. Optimizing pre-sowing seed stimulation is a crucial task in agricultural production, as the quality of seed material significantly affects future yields. Various stimulation methods, including chemical, thermal, and electrophysical treatments, have their own advantages and disadvantages. Laser irradiation is one of the most promising methods, as it promotes the activation of biochemical processes in seeds without negatively affecting their structure. The study analyzes the mechanisms of laser radiation effects on oilseed crops and determines key parameters influencing germination energy and seed viability. The experimental research focused on identifying optimal laser irradiation modes that ensure maximum stimulation effect with minimal energy consumption. First-generation reproduction seeds were used in the study, and the artificial aging method was employed to obtain samples with reduced sowing qualities, enabling the selection of optimal irradiation parameters. The sowing qualities were assessed before and after laser treatment, with an additional exposure period of 6–7 days. Germination was determined using standard methods at 20–30°C, applying the “on paper” method. A full factorial experiment was conducted to identify the optimal laser irradiation parameters. A biotechnical system for sunflower seed treatment was developed, allowing adaptation of laser irradiation parameters based on seed material quality. A correlation was established between laser treatment characteristics and parameters such as germination rate,

germination energy, and plant productivity. The use of this system improves seed quality and increases sunflower yield, making laser treatment a promising technology for agricultural applications.

Keywords: laser radiation, biotechnical system, sowing qualities of seeds, management system, pre-sowing treatment.

Ә.А. Айтқазина^{1*}, Н.Ө. Жұмажан², 2025.

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Академик Ә.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан.

E-mail:aitkazina.aseel@gmail.com

КҮНБАҒЫС ТҰҚЫМДАРЫН ЛАЗЕРМЕН ӨНДЕУГЕ АРНАЛҒАН БИОТЕХНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕНІ ДАМУ

Айтқазина Әсел Алдиярханқызы – докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан, aitkazina.aseel@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0005-0100-9490>;

Жұмажан Нұрдаулет Өркенұлы – кіші ғылыми қызметкер, Академик Ә.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан, nurdaulet.jj02@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-2153-7620>.

Аннотация. Бұл жұмыста күнбағыс тұқымдарының себу сапасын арттыру мақсатында лазерлік оптикалық сәулеленуді қолдану зерттелді. Тұқымдарды себу алдындағы өндеуді оңтайландыру ауыл шаруашылығы өндірісінде маңызды міндет болып табылады, өйткені тұқымдық материалдың сапасы болашақ өнімділікке айтарлықтай әсер етеді. Ынталандырудың әртүрлі әдістерінің, соның ішінде химиялық, термиялық және электрофизикалық әсерлердің өз артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Лазерлік сәулелену – перспективалы әдістердің бірі, өйткені ол тұқымның құрылымына теріс әсер етпестен биохимиялық процестерді белсендіруге ықпал етеді. Зерттеу барысында майлы дақыл тұқымдарына лазерлік сәулеленудің әсер ету механизмдері қарастырылып, өну энергиясы мен өнгіштікке әсер ететін негізгі параметрлер анықталды. Эксперименттік зерттеулер лазерлік сәулеленудің оңтайлы режимдерін белгілеуге бағытталған, олар ең аз энергия шығынымен максималды ынталандыру әсерін қамтамасыз етеді. Зерттеу үшін бірінші репродукция тұқымдары қолданылды, ал жасанды қартаю әдісі сапасы төмендетілген үлгілерді алуға мүмкіндік берді, бұл оңтайлы өндеу параметрлерін таңдауға мүмкіндік берді. Себу сапасы лазерлік өндеуге дейін және кейін, қосымша 6–7 күндік экспозициядан кейін бағаланды. Өнгіштік стандартты әдістер бойынша 20–30°C температурада «қағазда» әдісімен анықталды. Толық факторлы эксперимент жүргізіліп, лазерлік өндеудің оңтайлы режимдері анықталды. Күнбағыс тұқымдарын өндеуге арналған биотехникалық жүйе әзірленді, ол лазерлік сәулелену

параметрлерін тұқымдық материал сапасына қарай реттеуге мүмкіндік береді. Лазерлік өңдеу сипаттамалары мен өнгіштік, өну энергиясы және өсімдіктің өнімділігі сияқты параметрлер арасындағы тәуелділік анықталды. Бұл жүйені қолдану тұқымдық материалдың сапасын арттырып, күнбағыс өнімділігін жоғарылатуға ықпал етеді, сондықтан лазерлік өңдеу әдісі ауыл шаруашылығында қолдануға перспективалы болып табылады.

Түйін сөздер: лазерлік сәулелену, биотехникалық жүйе, тұқымның себу сапасы, басқару жүйесі, себу алдындағы өңдеу.

А.А. Айтказина^{1*}, Н.О. Жумажан², 2025.

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Казахстан;

²Институт механики и машиноведения им. академика
У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан.
E-mail: aitkazina.aseel@gmail.com

РАЗРАБОТКА БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА

Айтказина Асель Алдиярханқызы – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: aitkazina.aseel@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0005-0100-9490>;

Жумажан Нурдаулет Оркenuлы – младший научный сотрудник, Институт механики и машиноведения им. академика У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан, E-mail: nurdaulet.jj02@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0008-2153-7620>.

Аннотация. В данной работе исследуется применение лазерного оптического излучения для предпосевной обработки семян подсолнечника с целью повышения их посевных качеств. Оптимизация предпосевной стимуляции семян является важной задачей сельскохозяйственного производства, так как качество семенного материала во многом определяет будущую урожайность. Различные методы стимуляции, включая химические, термические и электрофизические воздействия, имеют свои преимущества и недостатки. Лазерное облучение является одним из наиболее перспективных способов, так как оно способствует активизации биохимических процессов в семенах без негативного воздействия на их структуру. В ходе исследования были рассмотрены механизмы влияния лазерного излучения на семена масличных культур, а также определены основные параметры, влияющие на всхожесть и энергию прорастания. Экспериментальная часть работы была направлена на установление оптимальных режимов лазерного облучения, обеспечивающих максимальный стимулирующий эффект при минимальных затратах энергии. Для исследования использовались семена первой репродукции, а метод искусственного старения позволил получить образцы с пониженными посевными характеристиками, что дало возможность

подобрать оптимальные параметры воздействия. Оценка посевных качеств проводилась до и после лазерной обработки, с дополнительной выдержкой семян в течение 6–7 дней. Всхожесть определялась стандартными методами при температуре 20–30°C, используя метод «на бумаге». В ходе полнофакторного эксперимента были определены оптимальные режимы лазерного воздействия. Разработана биотехническая система для обработки семян подсолнечника, которая позволяет адаптировать параметры лазерного облучения в зависимости от качества семенного материала. Установлена зависимость между характеристиками лазерного воздействия и такими параметрами, как всхожесть, энергия прорастания и продуктивность растений. Применение данной системы способствует повышению качества посевного материала и увеличению урожайности подсолнечника, что делает метод лазерной обработки перспективным для использования в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: лазерное излучение, биотехническая система, посевные качества семян, система управления, предпосевная обработка.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ АР 19677201).

Введение. Современное сельское хозяйство Казахстана, как и других стран с развитой агропромышленностью, сталкивается с необходимостью внедрения инновационных технологий, направленных на повышение продуктивности растениеводства. Анализ тенденций развития агропромышленного производства показывает, что рост затрат на энергию и материалы, необходимые для производства сельскохозяйственной продукции, опережает рост её продуктивности. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку новейших энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий, которые позволяют не только повысить урожайность, но и сократить затраты на производство.

Одним из важнейших факторов, определяющих успешность сельскохозяйственного производства, является качество семенного материала. Посевные качества семян определяют их энергию прорастания, всхожесть и равномерность всходов, что напрямую влияет на урожайность. Однако при хранении и транспортировке семена могут подвергаться различным неблагоприятным воздействиям, таким как перепады влажности, поражение микроорганизмами, окислительные процессы, что приводит к снижению их посевных характеристик. В результате аграрные хозяйства вынуждены использовать семена с пониженными качественными показателями, что ведёт к нерациональному использованию посевных площадей, увеличению затрат на выращивание культур и снижению продуктивности (Sayler, et al., 2004: 270).

В сложившихся условиях особую значимость приобретают методы предпосевной обработки семян, направленные на восстановление или улучшение их посевных характеристик. Среди различных методов стимуляции

семян наибольший интерес представляют электрофизические методы, в частности лазерное облучение. Лазерное излучение в оптическом диапазоне оказывает выраженное положительное воздействие на семена, активируя их физиологические и биохимические процессы, что способствует ускорению прорастания, повышению устойчивости к неблагоприятным условиям и улучшению последующего роста растений.

Актуальность исследования методов улучшения посевных качеств семян обусловлена тем, что при длительном хранении или в результате неблагоприятных условий транспортировки семена теряют свою энергию прорастания, что негативно сказывается на их всхожести (Горабев, 2015: 87). В отсутствие эффективной системы контроля качества семенного материала возникает необходимость в использовании технологий, способствующих повышению всхожести и улучшению физиологических характеристик семян. В этом контексте одним из перспективных методов является лазерная обработка семян, которая позволяет активировать ростовые процессы, не вызывая при этом негативного воздействия на структуру семенного материала.

Исследования показывают, что предпосевная обработка семян с использованием лазерного излучения может существенно увеличить скорость их прорастания, улучшить физиологические процессы на ранних этапах роста и повысить устойчивость растений к неблагоприятным условиям окружающей среды. Кроме того, лазерная обработка семян может способствовать улучшению обменных процессов, что в конечном итоге приводит к увеличению урожайности. В ряде исследований установлено, что лазерное воздействие на семена способствует их фотостимуляции, активируя фитохромную систему, которая играет важную роль в регуляции роста растений. Это позволяет ускорить начальные фазы развития растений, что особенно важно в условиях ограниченного вегетационного периода (Kganyago, et al., 2024: 108730).

Лазерная стимуляция семян оказывает комплексное воздействие, улучшая обмен веществ, усиливая процессы дыхания и синтеза белка, активируя антиоксидантную систему, что защищает клетки от повреждения свободными радикалами. Это способствует усилению энергии роста проростков и развитию корневой системы, что в дальнейшем сказывается на повышенной продуктивности растений. Установлено, что различные режимы лазерного облучения по-разному влияют на семена, и подбор оптимальных параметров воздействия является важной задачей для сельскохозяйственных исследований.

Существует множество методов предпосевной стимуляции семян, которые направлены на улучшение их посевных характеристик. Традиционные методы, такие как химическая обработка, позволяют защитить семена от патогенов и стимулировать их прорастание, но имеют ряд недостатков, включая риск накопления токсичных соединений в почве и растениях (Диордиев, 2002: 28). Термическая обработка семян применяется для уничтожения патогенной

микрофлоры, однако может вызывать повреждение семенного материала при неправильном подборе режимов воздействия. Магнитная обработка влияет на биоэлектрические процессы в семенах, но требует высокой точности в настройке параметров воздействия. Ионизирующее облучение может оказывать стимулирующий эффект, однако связано с риском возникновения мутаций и требует строгого контроля дозировки.

На фоне вышеупомянутых методов лазерное облучение выглядит наиболее перспективным, поскольку оно оказывает направленное воздействие на семена, стимулируя их внутренние процессы без разрушения клеточных структур. В ходе многочисленных исследований было установлено, что воздействие лазерного излучения приводит к активации фитохромной системы семян, которая играет ключевую роль в регуляции роста и развития растений. Под влиянием лазерного облучения усиливается проницаемость клеточных мембран, что способствует улучшенному поглощению воды и питательных веществ, ускоряя процесс набухания семян и их последующее прорастание (Bellvert, et al., 2021: 320).

Лазерная обработка семян является одним из наиболее перспективных направлений в современной аграрной науке, поскольку она позволяет добиться значительного увеличения продуктивности сельскохозяйственных культур без использования химических веществ. Внедрение этой технологии в аграрный сектор способствует улучшению качества посевного материала, повышению устойчивости растений к неблагоприятным условиям и снижению затрат на производство. В Казахстане и других странах, где условия выращивания сельскохозяйственных культур характеризуются нестабильным климатом, применение лазерного облучения может сыграть ключевую роль в повышении урожайности.

Кроме того, исследования в этой области могут способствовать разработке новых методов интегрированной стимуляции растений, объединяющих лазерную обработку с другими методами воздействия, такими как ультразвуковая обработка или применение электромагнитных полей (Макрушин, 2000: 116). Это позволит расширить спектр применения лазерных технологий и повысить их эффективность для различных сельскохозяйственных культур.

Таким образом, дальнейшее изучение лазерной обработки семян и её внедрение в агропромышленное производство может стать важным шагом в развитии устойчивого сельского хозяйства и обеспечении продовольственной безопасности. Внедрение подобных технологий требует разработки стандартов и методических рекомендаций, что также является перспективным направлением будущих исследований. Кроме того, следует учитывать экономическую эффективность лазерной обработки и возможность её широкомасштабного внедрения в аграрное производство, что позволит значительно сократить затраты на выращивание сельскохозяйственных культур и повысить их продуктивность (Dzakovich, et al., 2015: 1500).

Материалы и методы. Рассматривая широкий спектр методов воздейст-

вия на семена масличных культур, целесообразно провести аналитическое сравнение преимуществ и недостатков отдельных методов, чтобы определить наиболее перспективные из них для использования в практике сельскохозяйственного производства.

Поэтому важно рассмотреть основные характеристики методов, которые могут применяться для масличных культур, и определить наиболее эффективные из них для дальнейшего использования и исследования. Анализ проводился преимущественно для физических методов воздействия, поскольку изучение химических методов выходит за рамки данной работы, и поэтому для сравнения были приведены только наиболее перспективные из них.

Теоретический анализ проводился по таким показателям, как: стоимость материалов и энергии; сложность оборудования и необходимость в высококвалифицированном персонале; продолжительность обработки; необходимость точного дозирования из-за возможного отрицательного эффекта передозировки; вероятность повреждения семян в процессе обработки; наличие вредного воздействия на обслуживающий персонал; выявление биологических механизмов, лежащих в основе действия этого метода; пригодность метода для автоматизации и степень изученности процесса (Червинский, и др., 2018: 120).

В число показателей входит, в частности, такой фактор, как ясность механизма действия, что позволяет осознанно выбирать режимы обработки, а не только эмпирически. Эмпирический выбор режимов в некоторых случаях может быть случайным, не обладать воспроизводимостью и быть далеким от оптимального.

Необходимо учитывать, что семена растений, особенно в процессе роста и прорастания, представляют собой сложную систему, на которую стимулирующий фактор оказывает всегда сложное и комплексное воздействие (Мамугбаев, et al., 2023). Выявление механизмов влияния имеет большое научное и практическое значение. В этом отношении ключевые механизмы активации всхожести для ряда факторов, в частности при использовании магнитных полей, тока, гамма-излучения и других, еще не были полностью определены, что, в частности, сдерживает их широкое применение на практике (Готра, и др., 2017: 145).

Как видно из анализа, наиболее перспективными являются методы обработки, направленные на стимуляцию всхожести с помощью электромагнитных полей, особенно с использованием источников лазерного излучения и электромагнитных полей микроволнового диапазона (Horobets, 2015: 250). Кроме того, следует учитывать, что для лазерного излучения, в отличие, например, от гамма-излучения, форма кривой «доза – эффект (т.е. всхожесть семян) – доза» имеет вид кривой с насыщением, что исключает опасность передозировки, в отличие, например, от гамма-излучения, для которого эта кривая имеет колоколообразную форму, как показано на рисунке 1.



Рис. 1. Вид кривой «доза – эффект – доза» для различных типов воздействия на семена

Учитывая тот факт, что при использовании данных методов стимуляции на стационарных установках эти установки будут работать только в ограниченный период года (перед посевом семян в почву), более рациональным будет использование лазерного оборудования, которое обладает большей универсальностью и может применяться для других хозяйственных целей, что в конечном итоге также удешевляет обработку семян.

При создании недорогих специализированных устройств с низкой производительностью для приусадебных участков и малых фермерских хозяйств применение лазерного излучения также обладает преимуществами, обеспечивая безопасность для людей и меньшую стоимость при использовании маломощных лазерных излучателей, выпускаемых промышленностью (Синецкий и Бессаратов, 1994: 100).

Разработка лазерного устройства для предпосевной обработки семян. Поскольку предпосевная обработка семян наиболее необходима для сельскохозяйственных предприятий, а потребность в предпосевном облучении семян существует преимущественно в относительно короткий период времени, целесообразно реализовать устройство для выполнения найденных режимов облучения в виде максимально простых насадок к стационарным лазерным установкам промышленного производства.

Как известно, наибольшее распространение получили различные конструкции сканирования луча по плоскости, на которой размещены обрабатываемые семена (Yang et al., 2009: 15642). Однако все устройства с применением сканирования характеризуются сложностью конструкции, низкой надежностью и высокой стоимостью. Поэтому более целесообразным будет использование конструкций типа волоконно-оптического преобразователя «точка-линия» с прерывающимся устройством типа обтюлятора с постоянной

скоростью вращения, при этом относительное движение преобразователя и обрабатываемого материала может осуществляться в одном направлении, что значительно упрощает конструкцию и повышает ее надежность.

На основе этого решения была разработана конструкция устройства для обработки семян, которая представлена на Рисунке 2.

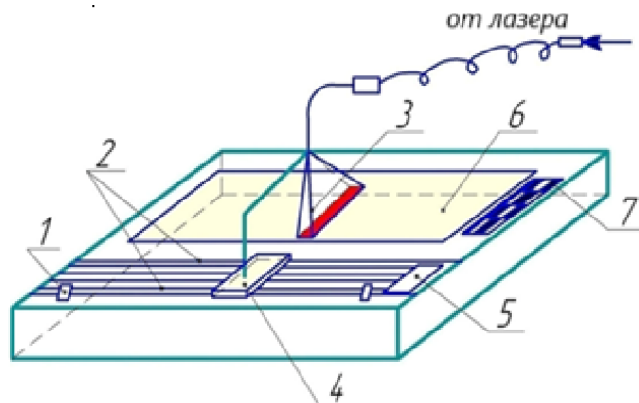


Рис. 2. Лазерное устройство: 1 - концевой выключатель; 2 - направляющие; 3 - волоконно-оптический преобразователь; 4 - подвижная платформа; 5 - шаговый двигатель; 6 - контейнер для семян; 7 - панель управления.

Устройство включает в себя волоконно-оптический преобразователь, соединенный с подвижной платформой, которая перемещается по направляющим и приводится в движение шаговым двигателем (Тур и Камалотдинова, 1990: 203). Выбор шагового двигателя в качестве привода обусловлен следующими его свойствами:

- угол поворота ротора определяется количеством импульсов, подаваемых на двигатель;
- двигатель обеспечивает полный крутящий момент в режиме остановки (при подаче питания на обмотки);
- точное позиционирование и повторяемость, высокая точность (3-5% от величины шага), при этом ошибка не накапливается от шага к шагу;
- возможность быстрого запуска / остановки / реверса;
- высокая надежность, связанная с отсутствием щеток, срок службы шагового двигателя фактически определяется сроком службы подшипников;
- однозначная зависимость положения от входных импульсов, что обеспечивает позиционирование без обратной связи;
- возможность получения очень низких скоростей вращения для нагрузки, подключенной непосредственно к валу двигателя, без промежуточного редуктора;
- широкий диапазон рабочих скоростей, так как скорость вращения пропорциональна частоте входных импульсов.

Для оценки зависимости ПЯН от параметров импульсных предпосевных режимов облучения в форме уравнения регрессии целесообразно провести полный факторный эксперимент второго порядка с использованием теории планирования эксперимента на следующих этапах (Nishihama, et al., 2015: 408):

1. Определение контролируемых и неконтролируемых факторов;
2. Определение оптимального типа плана эксперимента;
3. Построение плана эксперимента с определением границ варьирования факторов;
4. Проведение экспериментальных исследований;
5. Расчет коэффициентов уравнений регрессии;
6. Определение значимых коэффициентов в уравнениях регрессии;
7. Проверка адекватности полученной модели.

В результате эксперимента были выбраны следующие факторы:

X_1 - количество дней от момента облучения до начала определения ПН, сут.;

X_2 - количество импульсов, шт.;

X_3 - плотность энергии, мВт/см².

Определение ПЯН проводилось на основе лабораторных показателей всхожести семян в процентах (Седова, 1982: 115). Для каждого фактора было выполнено кодирование в заданных интервалах варьирования и установлены нулевые уровни.

$$x_i = \frac{x'_i - x_{i0}}{\Delta_i} \quad (1)$$

где x_i — кодированное значение фактора (1, -1, 0);

x'_i — натуральное значение фактора на некотором уровне;

x_{i0} — натуральное значение фактора на нулевом уровне;

Δ_i — интервал варьирования.

Каждый фактор изменяется на двух уровнях: верхнем (+) и нижнем (-).

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Фактор	Единица измерения	Уровни варьирования факторов				Обозначение
		-1	0	+1	Δ_i	
Количество дней от момента облучения до начала определения ПЯН	дни	3	9	15	6	X1
Количество импульсов	тыс. шт.	2	5	8	3	X2
Плотность энергии	мВт/см ²	0.5	3.25	6	2.75	X3

Модель второго порядка определяется выражением:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j,i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2; \quad (2)$$

Коэффициенты регрессии каждого фактора на основе проведенных экспериментов рассчитываются по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N y_u}{N}; \text{ or } B = , \quad (3)$$

Ошибка эксперимента рассчитывается по формуле:

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{\sum x_{iu}^2}, \quad (4)$$

где s_0^2 – ошибка эксперимента, которая равна:

$$s_0^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{k=1}^{N_0}; \quad (5)$$

N_0 – количество экспериментов в центре плана.

Дисперсии коэффициентов регрессии:

$$s_{b_0}^2 = \frac{s_0^2}{N}; s_{b_{ij}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum (x_{iu} x_{ju})^2}; s_{b_{ii}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum (x'_{iu})^2}; s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{\sum x_{iu}^2}; \quad (6)$$

Расчетные значения критерия Стьюдента определяются по формулам:

$$t_{i_p} = \frac{|b_i|}{s_{b_i}} \quad t_{ij_p} = \frac{|b_{ij}|}{s_{b_{ij}}} \quad t_{ii_p} = \frac{|b_{ii}|}{s_{b_{ii}}}, \quad (7)$$

при условии значимости коэффициентов $t_{i_p}, t_{ij_p}, t_{ii_p} > t_T(q, \alpha = 0,05)$.

Дисперсия адекватности для критерия Фишера:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N-l} \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2. \quad (8)$$

Оценочное значение критерия Фишера определяется по формуле:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{s_0^2}, \quad (9)$$

при условии адекватности $F_p < F_T(q, f_{ад}, f_0)$.

Для математической модели вида:

$$y_i = B_0 + B_1 z_1 + B_2 z_2 + B_3 z_3 + B_{12} z_1 z_2 + B_{13} z_1 z_3 + B_{23} z_2 z_3 + B_{11} z_1^2 + B_{22} z_2^2 + B_{33} z_3^2 \quad (10)$$

Зависимости от каждого фактора представлены на рисунках 3, 4, 5.

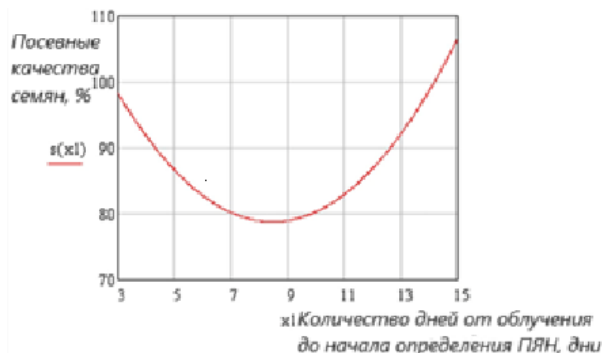


Рис. 3. График зависимости x_1 . Зависимость ПЯН, % от количества дней с момента облучения до начала определения ПЯН.

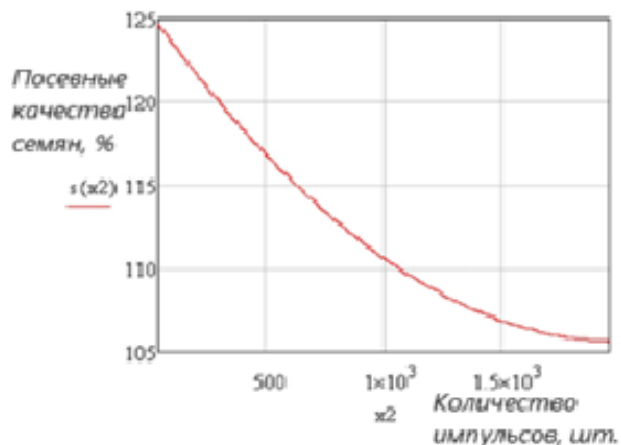


Рис. 4. График зависимости x_2 . Зависимость ПЯН, % от количества импульсов, шт.

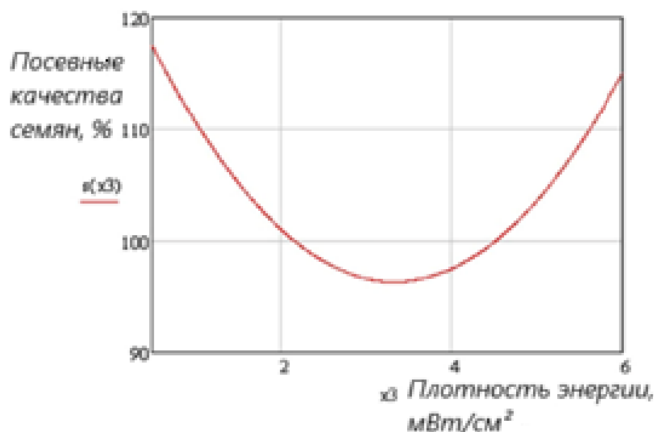


Рис. 5. График зависимости x_3 . Зависимость ПЯН, % от плотности энергии, мВт/см².

В результате проведения полного факторного эксперимента были найдены оптимальные значения параметров (Buhler, 1997: 498):

- количество дней с момента облучения до начала определения ПЯН – 8,47 суток;
- количество импульсов – 1931 шт.;
- плотность энергии – 3,25 мВт/см².

Были получены графики зависимости изменения ПЯН от плотности энергии, количества импульсов и количества дней с момента облучения до начала определения ПЯН.

Результаты исследований и их обсуждение. Целью экспериментальных исследований было определение параметров режимов предпосевного лазерного облучения семян подсолнечника, которые обеспечивают максимальный стимулирующий эффект на качество семян при минимальном

энергопотреблении и максимальной возможной производительности (Серегина, и др., 1977: 512). Исследования проводились на семенах масличных культур, занимающих наибольшие площади на территории Казахстана (сорт «Гибрид»). Семена соответствовали первой репродукции по посевным качествам.

Для получения семян с пониженными посевными качествами использовался известный метод искусственного старения, с целью нахождения для них оптимальных режимов предпосевого облучения. Определение посевных качеств семян проводилось для экспериментальных партий до облучения, а также после облучения с последующей экспозицией 6-7 дней. Во всех случаях определение посевных качеств выполнялось по стандартной методике, при этом проращивание семян всех культур осуществлялось при температуре 20-30°C на свету по методу «на бумаге». Использовались бумажные салфетки, проверенные на соответствие показателям капиллярного подъема, кислотности и зольности. В каждом случае отбирались пробы в 2 партии по 30 семян (Igamberdiev et al., 2014: 295).

Применялась лабораторная установка типа волоконно-оптического преобразователя «точка-линия» с прерывающим устройством типа обтюлятора с постоянной скоростью вращения. Относительное перемещение преобразователя и обрабатываемого материала осуществлялось в одном направлении, что значительно упрощало конструкцию и повышало ее надежность. Основой данного устройства является микроконтроллер типа Atmel AT90S2313.

Для оценки зависимости посевных качеств семян (ПЯН) от параметров импульсного предпосевого облучения был проведен полный факторный эксперимент (Лыхацкий и Бургарт, 1994: 320).

Выбраны факторы варьирования:

X_1 - количество дней от момента облучения до начала определения посевных качеств семян, суток; X_2 - количество импульсов, шт.; X_3 - плотность энергии, мВт/см².

Была построена матрица плана для полученного уравнения регрессии:

$$y_i = B_0 + B_1z_1 + B_2z_2 + B_3z_3 + B_{12}z_1z_2 + \\ + B_{13}z_1z_3 + B_{23}z_2z_3 + B_{11}z_1^2 + B_{22}z_2^2 + B_{33}z_3^2$$

После определения коэффициентов полиномиальной регрессии по критерию Стьюдента было получено уравнение поверхности второго порядка:

$$y_i = 31,462 + 4,137z_1 + 1,969z_2 + 1,125z_3 + \\ + 23,505z_1^2 + 19,237z_2^2 + 19,914z_3^2$$

Адекватность модели была проверена с помощью критерия Фишера.

Расшифрованная нелинейная модель имеет следующий вид:

$$y_i = 125,63 - 11,063x_1 - 0,02x_2 - 17,54x_3 + 0,00021x_2x_3 + 0,653x_1^2 + 0,000005x_2^2 + 2,63x_3^2$$

В результате проведения полного факторного эксперимента были найдены оптимальные значения параметров:

- Количество дней от облучения до начала определения ПЯН – 8,47 суток;
- Количество импульсов – 1931 шт.;
- Плотность энергии – 3,25 мВт/см².

Были получены графики зависимости изменения ПЯН от плотности энергии, количества импульсов и количества дней с момента облучения до начала определения ПЯН.

Заключение. В работе предложено решение научной проблемы повышения эффективности предпосевного импульсного лазерного облучения семян подсолнечника. На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Для увеличения урожайности подсолнечника целесообразно применять предпосевную стимуляцию его семян. Наиболее перспективным методом такой стимуляции является импульсное лазерное облучение в красном световом диапазоне с длиной волны 630-680 нм, которое через фитохромную систему семени оказывает стимулирующее воздействие на его посевные качества.

2. В результате проведения полного факторного эксперимента были определены оптимальные значения параметров:

- количество дней от момента облучения до начала определения ПЯН – 8,47 суток;
- количество импульсов – 1931 шт.;
- плотность энергии – 3,25 мВт/см².

Были построены графики, позволяющие определить зависимость изменения ПЯН от плотности энергии, количества импульсов и дней от момента облучения до начала определения ПЯН.

3. Применение указанных режимов облучения позволяет увеличить ПЯН до уровня 1-й репродукции для семян, соответствующих 2-му уровню репродукции по исходному ПЯН, а также повысить ПЯН до уровня 2-го класса для семян, чей исходный ПЯН ниже уровня 2-й репродукции на 15-20% по ЛВ.

4. Установлено, что для реализации указанных режимов облучения наиболее целесообразно создание устройства в виде лазерного волоконно-оптического преобразователя с прерывающим устройством обтюраторного типа с постоянной скоростью вращения.

5. Предложена конструкция лазерного устройства и разработана система управления импульсами на основе шагового двигателя ДШИ-200-1 с

микропроцессорным управлением, обеспечивающая точность перемещения излучателя с погрешностью не более 4% от величины шага без ее накопления и позволяющая реализовать ранее обоснованные режимы предпосевного облучения семян.

6. Экспериментальные испытания разработанного устройства подтвердили его эффективность для повышения ПЯН, при этом урожайность полученных растений увеличивается на 6-9%, что позволяет рекомендовать снижение норм высева обработанных семян на 4-8%.

Перспективным направлением является использование разработанной системы для определения оптимальных методов обработки семян различных сельскохозяйственных культур.

Литература

Bellvert J., Mata M., Vallverdú X., Paris C., Marsal J. (2021) Optimizing precision irrigation of a vineyard to improve water use efficiency and profitability by using a decision-oriented vine water consumption model. *Precis. Agric.*, 22, 319–341. (in English)

Buhler D.D. (1997) Effects of tillage and light environment on emergence of 13 annual weeds. *Weed Technol.*, 11, 496–501. (in English)

Dzakovich M.P., Gomez C., Mitchell C.A. (2015) Tomatoes grown with light-emitting diodes or high-pressure sodium supplemental lights have similar fruit-quality attributes. *HortScience*, 50, 1498–1502. (in English)

Диордиев В.Т. (2002) Сравнение основных методов предпосевной стимуляции семян овощных культур. Труды Таврийской государственной аграрно-технической академии, 5, 25–29. (in Russian)

Gorabets V.G. (2015) Heat engineering and use of heat in agriculture. CPU Comprint, Kyiv, Ukraine, 389 p. (in English)

Готра З.Ю., Павлов С.В., Мыктык З.М. и др. (2017) Лазерные медицинские технологии: учебное пособие. Винница: ВНТУ, 158 с. (in Russian)

Horobets V.G. (2015) Heat engineering and use of heat in agriculture. CPU Comprint, Kyiv, Ukraine, 389 p. (in English)

Igamberdiev A.U., Eprintsev A.T., Fedorin D.N., Popov V.N. (2014) Phytochrome-mediated regulation of plant respiration and photorespiration. *Plant Cell Environ.*, 37, 290–299. (in English)

Kganyago M., Adjorlolo C., Mhangar P., Tsoeleng L. (2024) Optical remote sensing of crop biophysical and biochemical parameters: An overview of advances in sensor technologies and machine learning algorithms for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.*, 218, 108730. (in English)

Лихацкий В.И., Бургарт Ю.Е. (1994) Овощеводство: практикум. Киев: Высшая школа, 366 с. (in Russian)

Mamyrbayev O., Wojcik W., Titova N., Pavlov S., Oralbekova D., Aitkazina A., Zhumazhan N. (2023) Development of a thermodynamic model for optimization of processes in crop production. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, 6, 25–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290294> (in English)

Макрушин Н.М.. (2000) Философская и биологическая сущность качества семян. Научные труды КГУ, 66, 115–122. (in Russian)

Nishihama R., Ishizaki K., Hosaka M., Matsuda Y., Kubota A., Kohchi T. (2015) Phytochrome-mediated regulation of cell division and growth during regeneration and sporeling development in the liverwort *Marchantia polymorpha*. *J. Plant Res.*, 128, 407–21. <https://doi.org/10.1007/s10265-015-0724-9> (in English)

Sayler G.S., Simpson M.L., Cox C.D. (2004) Emerging foundations: nano-engineering and bio-microelectronics for environmental biotechnology. *Curr. Opin. Microbiol.*, 7, 267–273. (in English)

Седова Т.Е. (1982) Эффективность гамма-облучения семян. Селекция и семеноводство, 84, 112–125. (in Russian)

Серегина Н.Г., Орлов В.В., Батыгин Н.Ф. (1977) Устойчивость воспроизведения стимулирующего эффекта при предпосевном облучении семян сельскохозяйственных растений. Радиобиология, 14, 511–518. (in Russian)

Синецкий В.Г., Бессаратов В.И. (1994) Предпосевная электромагнитная обработка семян. Вестник аграрной науки, 7, 96–103. (in Russian)

Туров А.А., Камалетдинова Р.Н. (1990) Электрообработка семян. Механизация и электрификация сельского хозяйства, 102, 198–208. (in Russian)

Yang X., Kuk J., Moffat K. (2009) Crystal structure of *P. aeruginosa* bacteriaphytochrome PaBphP photosensory core domain mutant. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA J.*, 106, 15639–15644. (in English)

Червинский Л.С., Пашковская Н.И. (2018) Исследование влияния инфракрасного излучения на посевные качества и показатели роста озимой пшеницы. Вестник ХНТУСГ, 195, 119–112. (in Russian)

References

Saylor G.S., Simpson M.L., Cox C.D. (2004) Emerging foundations: nano-engineering and bio-microelectronics for environmental biotechnology. *Curr. Opin. Microbiol.*, 7, 267–273. (in English)

Gorabets V.G. (2015) *Teplotekhnika i ispolzovanie tepla v selskom khozyaistve* [Heat engineering and use of heat in agriculture]. Kyiv: TsPU “Komprint”, 389 p. (in Russian)

Kganyago M., Adjorlolo C., Mhangar P., Tsoeleng L. (2024) Optical remote sensing of crop biophysical and biochemical parameters: An overview of advances in sensor technologies and machine learning algorithms for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.*, 218, 108730. (in English)

Diordiev V.T. (2002) *Sravnenie osnovnykh metodov predposevnoy stimulyatsii semyan ovoschnykh kultur* [Comparison of the main methods of pre-sowing seed stimulation of vegetable crops]. *Trudy Tavriyskoy gosudarstvennoy agrarno-tekhnicheskoy akademii*, 5, 25–29. (in Russian)

Bellvert J., Mata M., Vallverdú X., Paris C., Marsal J. (2021) Optimizing precision irrigation of a vineyard to improve water use efficiency and profitability by using a decision-oriented vine water consumption model. *Precis. Agric.*, 22, 319–341. (in English)

Makrushin N.M. (2000) *Filosofskaya i biologicheskaya sushchnost kachestva semyan* [Philosophical and biological essence of seed quality]. *Nauch. tr. KGU*, 66, 115–122. (in Russian)

Dzakovich M.P., Gomez C., Mitchell C.A. (2015) Tomatoes grown with light-emitting diodes or high-pressure sodium supplemental lights have similar fruit-quality attributes. *HortScience*, 50, 1498–1502. (in English)

Chervinsky L.S., Pashkovskaya N.I. (2018) *Issledovanie vliyaniya infrakrasnogo izlucheniya na posevnye kachestva i pokazateli rosta ozimoy pshenitsy* [Investigation of infrared radiation influence on sowing quality and growth indices of winter wheat]. *Vestnik KhNTUSG*, 195, 119–112. (in Russian)

Mamyrbayev O., Wojcik W., Titova N., Pavlov S., Oralbekova D., Aitkazina A., Zhumazhan N. (2023) Development of a thermodynamic model for optimization of processes in crop production. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, 6, 25–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290294> (in English)

Gotra Z.Yu., Pavlov S.V., Mykytyuk Z.M., et al. (2017) *Lazernye meditsinskie tekhnologii: uchebnoe posobie* [Laser medical technologies: educational manual]. Vinnytsia: VNTU, 158 p. (in Russian)

Horobets V.G. (2015) Heat engineering and use of heat in agriculture. *CPU Comprint*, Kyiv, Ukraine, 389 p. (in English)

Synetsky V.G., Bessaratov V.I. (1994) *Predposevnaya elektromagnitnaya obrabotka semyan* [Pre-sowing electromagnetic treatment of seeds]. *Vestnik agrarnoy nauki*, 7, 96–103. (in Russian)

Yang X., Kuk J., Moffat K. (2009) Crystal structure of *P. aeruginosa* bacteriaphytochrome PaBphP photosensory core domain mutant. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA J.*, 106, 15639–15644. (in English)

Tur A.A., Kamalotdinova R.N. (1990) *Elektroobrabotka semyan* [Electroprocessing of seeds]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaistva*, 102, 198–208. (in Russian)

Nishihama R., Ishizaki K., Hosaka M., Matsuda Y., Kubota A., Kohchi T. (2015) Phytochrome-mediated regulation of cell division and growth during regeneration and sporeling development in the liverwort *Marchantia polymorpha*. *J. Plant Res.*, 128, 407–21. <https://doi.org/10.1007/s10265-015-0724-9> (in English)

Sedova T.E. (1982) Effektivnost gamma-oblucheniya semyan [Effectiveness of gamma irradiation of seeds]. *Selektsiya i semenovodstvo*, 84, 112–125. (in Russian)

Buhler D.D. (1997) Effects of tillage and light environment on emergence of 13 annual weeds. *Weed Technol.*, 11, 496–501. (in English)

Seregina N.G., Orlov V.V., Batygin N.F. (1977) Ustoichivost vosproizvedeniya stimuliruyushchego effekta pri predposevnom obluchenii semyan selskokhozyaystvennykh rasteniy [Stability of the reproduction of the stimulation effect during pre-sowing irradiation of agricultural plant seeds]. *Radiobiology*, 14, 511–518. (in Russian)

Igamberdiev A.U., Eprintsev A.T., Fedorin D.N., Popov V.N. (2014) Phytochrome-mediated regulation of plant respiration and photorespiration. *Plant Cell Environ.*, 37, 290–299. (in English)

Lykhatsky V.I., Burgart Yu.E. (1994) Ovoshevodstvo: praktikum [Vegetable growing: workshop]. Kyiv: Vysshaya shkola, 366 p. (in Russian)

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.325>

IRSTI: 81.93.29

UDC: 004.49

G. Aksholak*, A. Bedelbayev, R. Magazov, 2025.

Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: gaksholak@gmail.com

SECURING KUBERNETES: AN ANALYSIS OF VULNERABILITIES, TOOLS, AND FUTURE DIRECTIONS

Aksholak Gulnur – PhD student, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, E-mail: gaksholak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8292-6939>;

Bedelbayev Agyn – candidate of sciences in physics and mathematics, associate professor of the Department “Information Systems”, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, agyn08@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9839-4156>;

Magazov Raiymbek – PhD student, Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan, E-mail: Magazovraiko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-4105-2331>.

Abstract. In an era marked by rapid technological evolution, especially within cloud computing and container orchestration, the security of systems like Kubernetes is paramount. In this study, we investigate the security architecture of Kubernetes, emphasizing both its strengths and vulnerabilities. We analyze the core components—such as the master node and worker nodes—highlighting their roles in maintaining scalability and resilience in containerized environments. Our research further explores the various security challenges, including misconfigurations and vulnerabilities identified in recent CVEs (Common Vulnerabilities and Exposures), and the potential impact these issues have on Kubernetes deployments. A significant portion of the analysis is dedicated to recent developments in Kubernetes security, such as the introduction of Kubernetes 1.29 and the Kubernetes Gateway API.

A critical part of our analysis is the comparative evaluation of security tools, including Kube-bench, Sonobuoy, and Kube-hunter. These tools are assessed based on criteria such as usability, customization options, performance overhead, and integration capabilities. Our findings suggest that while these tools provide essential security features, there is still a gap in comprehensive, automated solutions that can address the dynamic and complex nature of Kubernetes environments.

The study offers valuable insights into the current state of Kubernetes security and suggests future directions for research, including the development of AI-driven security solutions that can proactively detect and mitigate threats.

Keywords: Kubernetes, architecture, security, scalability, containerized applications, misconfiguration.

Г.И. Ақшолақ*, А.А. Бедельбаев, Р.С. Мағазов, 2025.

Әл-Фараби атындағы қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: gaksholak@gmail.com

KUBERNETES-ТІ ҚОРҒАУ: ОСАЛДЫҚТАРДЫ, ҚҰРАЛДАРДЫ ЖӘНЕ БОЛАШАҚ БАҒЫТТАРДЫ ТАЛДАУ

Ақшолақ Гүлнұр Исатайқызы – PhD докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: gaksholak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8292-6939>;

Бедельбаев Ағын Абдешұлы – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының қауым. профессоры, Алматы, Қазақстан, E-mail: agyn08@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9839-4156>;

Мағазов Райымбек Саламатұлы – PhD докторант, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: Magazovraiko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-4105-2331>.

Аннотация. Бұлтты есептеулер мен контейнерлерді оркестрациялаудың қарқынды дамыған дәуірінде Kubernetes сияқты жүйелердің қауіпсіздігі бірінші орында тұрады. Бұл зерттеуде біз Kubernetes-тің қауіпсіздік архитектурасын, оның күшті және әлсіз жақтарын зерттейміз. Біз негізгі компоненттерді – мастер (master node) және жұмыс нодтарын (worker nodes) талдай отырып, олардың контейнерленген ортада масштабталу мен орнықтылықты сақтаудағы рөлін айқындаймыз. Зерттеу барысында конфигурациялардың қателіктері мен соңғы CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) арқылы анықталған осалдықтар сияқты қауіпсіздік қиындықтары қарастырылады, сондай-ақ бұл мәселелердің Kubernetes ортасына әсері талданады. Зерттеудің маңызды бөлігі ретінде, Kubernetes 1.29 және Kubernetes Gateway API сияқты қауіпсіздік саласындағы соңғы жетістіктер талқыланады.

Біздің талдауымыздың маңызды бөлігі Kube-bench, Sonobuoy және Kube-hunter сияқты қауіпсіздік құралдарының салыстырмалы бағалануына арналады. Бұл құралдар қолайлылық, баптау мүмкіндіктері, өнімділікке әсері және интеграциялау мүмкіндіктері сияқты критерийлер бойынша бағаланады. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бұл құралдар негізгі қауіпсіздік функцияларын қамтамасыз еткенімен, Kubernetes ортасының күрделі және динамикалық табиғатын шешуге арналған кешенді автоматтандырылған шешімдердің жетіспеушілігі бар.

Зерттеу Kubernetes қауіпсіздігінің қазіргі жағдайы туралы құнды ақпарат береді және болашақ зерттеулерге бағыттар ұсынады, оның ішінде қауіптерді белсенді түрде анықтап, жоюға мүмкіндік беретін жасанды интеллектке негізделген қауіпсіздік шешімдерін әзірлеуге бағыттар ұсынады.

Түйін сөздер: Kubernetes, архитектура, қауіпсіздік, масштабталу, контейнерленген қосымшалар, конфигурация қателіктері.

Г.И. Акшолок*, **А.А. Бедельбаев**, **Р.С. Магазов**, 2025.
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Казахстан.
E-mail: gaksholak@gmail.com

ЗАЩИТА KUBERNETES: АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТЕЙ, ИНСТРУМЕНТОВ И НАПРАВЛЕНИЙ НА БУДУЩЕЕ

Акшолок Гультнур Исатаевна – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: gaksholak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8292-6939>;

Бедельбаев Агын Абдешович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Казахского национального университета им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: agyn08@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9839-4156>;

Магазов Райымбек Саламатович – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: Magazovraiko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-4105-2331>.

Аннотация. В эпоху быстрого технологического развития особенно в сфере облачных вычислений и оркестрации контейнеров, безопасность систем, таких как Kubernetes, имеет первостепенное значение. В этом исследовании мы рассматриваем архитектуру безопасности Kubernetes, акцентируя внимание как на её сильных сторонах, так и на уязвимостях. Мы анализируем основные компоненты — такие как главные узлы (master node) и рабочие узлы (worker nodes), подчеркивая их роль в поддержании масштабируемости и устойчивости в контейнеризованных средах. Наше исследование также затрагивает различные проблемы безопасности, включая неправильные конфигурации и уязвимости, выявленные в последних CVE (Common Vulnerabilities and Exposures), и потенциальное влияние этих проблем на развертывания Kubernetes. Значительная часть анализа посвящена последним достижениям в области безопасности Kubernetes, таким как введение Kubernetes 1.29 и Kubernetes Gateway API.

Ключевым элементом нашего анализа является сравнительная оценка инструментов безопасности, включая Kube-bench, Sonobuoy и Kube-hunter. Эти инструменты оцениваются на основе таких критериев, как удобство использования, возможности настройки, нагрузка на производительность и интеграционные возможности. Наши результаты показывают, что, несмотря на наличие важных функций безопасности, существует разрыв в комплексных автоматизированных решениях, способных справиться с динамической и сложной природой Kubernetes-сред.

Исследование предлагает ценные инсайты в текущее состояние безопасности Kubernetes и предлагает направления для будущих исследований, включая разработку решений безопасности на основе ИИ, способных проактивно обнаруживать и устранять угрозы.

Ключевые слова: Kubernetes, архитектура, безопасность, масштабируемость, контейнеризованные приложения, неправильная конфигурация.

Introduction. In today's rapidly advancing digital landscape, the need for robust and adaptable security measures has never been more critical. With the proliferation of cloud computing and containerization, Kubernetes has emerged as a cornerstone technology, offering unparalleled flexibility, scalability, and automation in managing cloud-native applications. In their comprehensive review, (Senjab, et al., 2023) describe Kubernetes as an open-source platform that simplifies the deployment, scaling, and management of containerized applications by automating infrastructure tasks. However, this evolution has brought about significant challenges, particularly in ensuring the security and integrity of Kubernetes environments. The primary goal of this review is to explore the architecture of Kubernetes, identify its inherent security challenges, and propose advanced methods for mitigating these risks. By addressing these concerns, our work aims to provide a comprehensive understanding of how to protect containerized applications and infrastructures effectively.

The problem at hand revolves around the increasing complexity and dynamic nature of Kubernetes environments, which introduces various vulnerabilities that could be exploited by malicious actors. Our hypothesis is that by implementing continuous monitoring, advanced vulnerability management, and leveraging cutting-edge security tools, it is possible to significantly enhance the security of Kubernetes deployments. To test this hypothesis, we have conducted an extensive review of existing literature, analyzed the latest developments in Kubernetes security, and evaluated various security tools. This study not only synthesizes current knowledge but also identifies gaps and opportunities for further research, particularly in the application of AI and machine learning to proactively detect and mitigate security threats.

Kubernetes Architecture

Kubernetes is architected to provide a highly modular, scalable, and resilient environment for orchestrating containerized applications across a distributed network of computers. This section delves into the intricacies of Kubernetes' architecture.

In the paper, (Karim, et al., 2020) describe Kubernetes as an advanced container orchestration platform designed to automate the management of containerized applications. The platform's architecture is centered around a master-worker model, where the master node manages the cluster's state and orchestrates workloads, while the worker nodes execute the containerized tasks. This architecture, built on RESTful APIs and a highly modular design, allows Kubernetes to efficiently manage large-scale, distributed applications.

The Kubernetes architecture is designed to provide a flexible and extensible environment for deploying and managing containerized applications across a cluster of computers (Fig. 1).

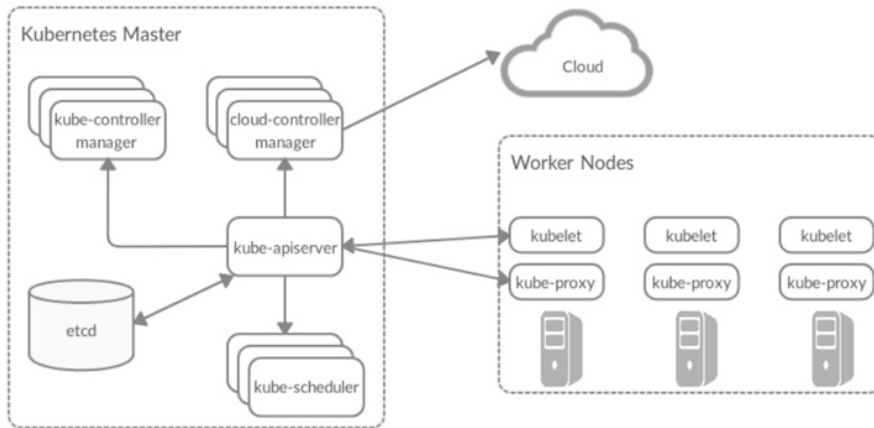


Figure 1. The architecture of a Kubernetes cluster

(Vohra, 2016) provides a detailed exploration of Kubernetes’ architecture, focusing on its integration with Docker to manage microservices efficiently. The book highlights Kubernetes’ modular and scalable nature, making it a robust choice for managing complex cloud-native applications.

Master Node: The control plane’s brain, the master node, oversees the cluster’s state, manages replication, and orchestrates rolling updates. Key components like the kube-scheduler and kube-controller-manager work in tandem to optimize resource allocation and ensure self-healing capabilities within the cluster (Thota, 2018). **Worker Nodes:** Serving as the data plane, worker nodes execute the containerized workloads. Each node, managed by the master, runs multiple pods through essential services such as kubelet and kube-proxy. These nodes ensure that the desired state defined by the master is continuously maintained, providing resilience and scalability to the Kubernetes environment.

Kube-scheduler: Determines where workloads should run based on what it thinks is the optimal node. It uses filtering and scoring to make this decision (Rosso, et al., 2021). Factors taken into account for scheduling decisions include: individual and collective resource requirements, hardware/software/policy constraints, affinity and anti-affinity specifications, data locality, inter-workload interference, and deadlines (Kubernetes Components, 2024).

Kube-controller-manager: Kube-controller is a daemon for self-healing. It is responsible for noticing and responding when nodes go down. It watches etcd for changes to objects such as replication, namespace, and service account controller objects, and then uses the API to enforce the specified state. Kube-controller makes sure the correct number of replications requested exist in the cluster. For example, when a user requests of the system to scale the application into ten instances kube-controller-manager makes sure that if one or more of them go down to spawn replacements, so that the requested number, matches the actual number of pods and the application is running on full capacity (Mytilinakis, 2020).

Cloud-controller-manager. A daemon with similar purpose to kube-controller-manager, but instead of focusing on components within Kubernetes, it focuses on maintaining alignment with the cloud platform that is hosting the Kubernetes cluster. It was originally in the kube-controller manager but because every cloud provider release at a different pace it became a cloud vendor dependent project that gave the cloud providers flexibility in the evolution of IT (Mytilinakis, 2020).

*Etc*d is a highly-consistent, distributed key-value store that hosts the cluster's state and the all the API objects. In Kubernetes, objects stored in etcd are solely accessed through the api-server (Karim, et al., 2020). Etcd leverages gRPC and TLS, used to store the most sensitive data within a cluster. By default, TLS is enabled including an optional authentication of the client with a certificate (Mytilinakis, 2020).

Kube-apiserver is the gateway and the glue that connects the distributed components together. It receives HTTP RESTful requests, validates the objects and pushes them to etcd. It also provides the front-end to the cluster's shared state through which all the other components interact. DevOps can interact with the API-server either by invoking directly the HTTP API or through a CLI wrapper, entitled kubectl (Karim, et al, 2020). The primary interaction point for all Kubernetes components and users. This is where we get, add, delete, and mutate objects. The API server delegates state to a backend, which is most commonly etcd (Rosso, et al., 2021).

Kubelet. The on-host agent that communicates with the API server to report the status of a node and understand what workloads should be scheduled on it. It communicates with the host's container runtime, such as Docker, to ensure workloads scheduled for the node are started and healthy.

Kube Proxy. Implements Kubernetes services providing virtual IPs that can route to backend Pods. This is accomplished using a packet filtering mechanism on a host such as iptables or ipvs (Rosso, et al., 2021).

This architecture, while robust, introduces several challenges, particularly in maintaining security and managing network traffic across dynamic and distributed environments. The following sections will explore the security challenges inherent in Kubernetes' architecture and propose potential solutions to mitigate these risks.

Materials and Methods

In this study, a comprehensive literature review was conducted to analyze the existing security tools for Kubernetes. The selection criteria for these tools included their relevance to Kubernetes environments, their popularity within the community, and their ability to address identified security gaps. The evaluation of these tools focused on several critical parameters: installation complexity, usability, customization options, performance overhead, and integration capabilities.

The methodology also included a systematic comparison of these tools against established security benchmarks such as the CIS Kubernetes Benchmark and the NIST cybersecurity framework. Additionally, the impact of these tools on the overall

security posture of Kubernetes environments was analyzed through hypothetical scenarios that reflect real-world security challenges.

Kubernetes Vulnerabilities

Kubernetes, while offering scalability and flexibility, introduces complex security challenges, especially concerning vulnerabilities. In the article emphasizes the importance of securing each deployment layer, from Docker containers to Kubernetes nodes, to prevent potential breaches (Vohra, 2016). The rise in identified vulnerabilities, with a 440% increase between 2018 and 2023, underscores the expanding attack surface and the critical need for continuous monitoring and timely patching (Kubernetes vulnerabilities in 2023).

For example, Martin and Hausenblas provide a comprehensive analysis of various attack vectors within Kubernetes, such as CVE-2023-5528, where users can escalate privileges on Windows nodes, and CVE-2023-2728, which allows bypassing the mountable secrets policy (Martin, et al, 2021). This analysis highlights the growing complexity of Kubernetes environments and the necessity of robust security practices.

Security Tools for Kubernetes

Based on the findings from the literature review, we identified a list of essential security tools that are commonly used in Kubernetes environments. The tools were categorized into several groups, including image scanning, network security, runtime monitoring, and auditing. Criteria for selection included the tool’s relevance, popularity, and coverage of the identified security gaps in Kubernetes deployments.

The security landscape for Kubernetes is vast, with various tools designed to address specific vulnerabilities and challenges. These tools can be categorized based on their primary functions within Kubernetes environments (Table 1) (Top 10 Kubernetes Security Tools in 2023).

Table 1 – Categories of Kubernetes Security Tools

Categories	Security tools
Kubernetes image scanning and static analysis	Clair Checkov
Security during execution	Falco
Kubernetes Network Security	Calico Cilium Istio
Image sharing and secret management	Vault
Kubernetes Security Audit	Kube-bench Kube-hunter Kubeaudit KubeLinter Open Policy Agent
Comprehensive commercial products	Aqua Security

Each tool plays a crucial role in strengthening the security posture of a Kubernetes environment. For example, **Kube-hunter** is designed to identify

potential vulnerabilities by simulating attacks within the Kubernetes environment, making it a valuable asset in preemptively detecting security flaws. On the other hand, **Clair** is particularly effective for static analysis and image scanning, helping to ensure that container images are free of known vulnerabilities before deployment.

As we move deeper into securing Kubernetes environments during runtime, **Falco** emerges as a powerful tool that continuously monitors container activity, detecting anomalous behavior that could indicate a security breach. Similarly, **Calico** and **Cilium** provide robust network security by implementing policies that control the communication between containers, ensuring that only authorized traffic flows within the cluster.

Given the critical nature of secret management and image sharing in Kubernetes, tools like **Vault** offer a secure method for managing sensitive information such as API keys and passwords, mitigating the risk of unauthorized access. Additionally, Kubernetes security auditing tools, including **Kube-bench** and **Kubeaudit**, provide a comprehensive overview of cluster security by assessing configurations against established benchmarks.

Recent studies have demonstrated the effectiveness of these tools in identifying and mitigating security risks within Kubernetes clusters. For instance, Alqarni explored the integration of zero-knowledge encryption within Kubernetes to enhance privacy and protect against cloud service provider threats (Alqarni, (2023).

Furthermore, Van der Slik and Wiersma evaluated alternative admission controllers like Gatekeeper and Kyverno, which have been proposed as replacements for the deprecated Pod Security Policies (PSP). Their research underscores the importance of selecting the right security tools to maintain a secure Kubernetes environment (van der Slik, et al., 2021).

In the study (Budigiri, et al., 2021), the authors evaluate performance overheads of eBPF-based solutions by Calico and Cilium, and analyze the security of network policies, highlighting security threats to network policies and outline corresponding state-of-the-art solutions. Their assessment shows that network policies are a suitable low-overhead security solution for low-latency inter-container communication.

Recent Developments in Kubernetes Security

The security landscape of Kubernetes has witnessed significant advancements aimed at addressing both existing and emerging threats. These developments emphasize proactive approaches, enhancing both detection and prevention capabilities within Kubernetes environments.

One such advancement is the introduction of **WARP**, a proactive attack mitigation approach proposed by Bagheri et al. WARP integrates seamlessly with Kubernetes, enabling the prediction of potential attack paths and triggering non-disruptive mitigation actions before these threats can escalate. This approach represents a shift from reactive to proactive security measures, crucial in maintaining the integrity of Kubernetes deployments (Bagheri, et al., 2023). Similarly, Dell'Immagine et al. introduced **KubeHound**, a tool designed to detect 'security smells'—subtle indicators of potential security issues within Kubernetes

deployments. KubeHound's ability to identify issues such as insufficient access control and hardcoded secrets is vital for maintaining secure and compliant Kubernetes environments (Dell'Immagine, et al., 2023).

The dynamic and scalable nature of Kubernetes clusters introduces unique security challenges, particularly in managing network connectivity and enforcing security policies across containerized applications. Verma emphasizes the necessity of implementing robust network security policies within Kubernetes environments, particularly through the integration of Container Network Interface (CNI) plugins. His research demonstrates how tools like port scanners can identify potential vulnerabilities, which can then be mitigated through carefully crafted network policies that enforce secure communication between containers. These insights are critical for developing a comprehensive security strategy that adapts to the evolving threat landscape in cloud-based deployments (Verma, 2024).

Understanding and securing the connectivity between microservices in Kubernetes clusters is critical to maintaining a robust security posture. Bufalino et al. introduced Kubesonde, a tool specifically designed to analyze microservice connectivity within Kubernetes deployments. By utilizing a probing methodology that operates with minimal impact on performance, Kubesonde can reveal discrepancies between declared and actual microservice connectivity, highlighting potential security gaps. Their analysis of 200 cloud applications demonstrated that over 60% exhibited connectivity inconsistencies, emphasizing the need for more stringent network isolation practices in Kubernetes environments (Bufalino, et al., 2023).

The release of **Kubernetes 1.29**, named Mandala (Mandala, 2024), marks a pivotal advancement in Kubernetes security. This version introduces significant features like **KMS V2 encryption** at rest and support for **nftables**, enhancing both security and resource management. These updates, particularly the introduction of sidecar containers and refined access controls, are crucial for bolstering the security and performance of modern cloud-native applications. These updates are crucial for maintaining the security and performance of modern cloud-native applications.

Additionally, the Kubernetes Gateway API, now generally available, offers significant advantages over traditional network ingress controllers, particularly in terms of flexibility and enhanced traffic management. Joslyn explains that the Gateway API allows for more precise routing and better integration with service meshes, which is essential for modern, scalable applications. This development highlights a shift towards more dynamic and secure traffic management solutions in Kubernetes environments (Joslyn, 2024).

These developments underscore a broader trend towards more dynamic and integrated security solutions within Kubernetes. As the platform continues to evolve, so too must the strategies employed to secure it, ensuring that Kubernetes remains resilient against both current vulnerabilities and future threats.

Results and Discussion

The comprehensive analysis of various Kubernetes security tools, presented in

Table 2, provides critical insights into their applicability across different security needs within Kubernetes environments. Each tool has been evaluated based on criteria such as installation complexity, usability, customization options, and performance overhead, which are crucial factors when considering the deployment of these tools in real-world scenarios.

Table 2 – Comparative analysis of Kubernetes security tools

Criteria	Kube-bench	Test-infra	Sonobuoy	PowerfulSeal	Kubesonde	KubeHunter	Istio
Primary Focus	Security compliance (CIS Benchmark)	Cluster testing (including security)	Conformance & custom testing	Chaos Engineering	Network security policies	Vulnerability scanning	Service mesh for micro-services
Installation Complexity	Easy (local or Docker)	Requires Prow CI/CD knowledge	Modular, plugin-based	Configurable via ConfigMap	Medium (Kubernetes & network security)	Moderate (container/ Python source)	Moderate (requires networking knowledge)
Usability	Simple CLI	Sophisticated, with a learning curve	Usable, but custom Docker image needed	Easy to configure	Designed for developers/ admins	User-friendly CLI	User-friendly, with CLI & dashboard
Customization Options	Limited security checks	Extensive plugins	High, via custom plugins	Configurable checks	Customizable probing scenarios	Customizable scans (internal/ external)	Extensive (traffic/ security policies)
Testing Scenarios	CIS Benchmark	Varied (security, integration)	Conformance & custom	Chaos tests (kill pods/ nodes) pods/ nodes	Probing connectivity (internal/ external)	Vulnerability & misconfiguration scans	Fault injection, traffic shifting
Performance Overhead	Minimal; tests	Depends on selected jobs	Varies (up to an hour)	Continuous, configurable intervals	Minimal	Minimal	Minimal to moderate
Integration	CI/CD pipelines	CI/CD integration	CI/CD integration	Monitoring integrations	Continuous monitoring	CI/CD integration	Strong (CI/CD, observability tools)
Reporting	Detailed reports	TestGrid dashboard	Requires detailed analysis	Continuous feedback	Connectivity graphs	Detailed reports, no built-in visualization	Metrics, logs, traces (Grafana, etc.)
Security Features	Identifies misconfigurations	Security testing scenarios	Conformance compliance	System resilience testing	Connectivity security analysis	Identifies vulnerabilities	Mutual TLS, access controls
Community Support and Updates	Actively maintained	Supported by Kubernetes community	VMware-supported, regularly updated	Active, focused on chaos engineering	Open-source, active community	Open-source, regular updates	Very active, frequent updates

The analysis of Kubernetes security tools revealed several key insights. While tools like Kube-bench and Kube-hunter are effective for identifying vulnerabilities and compliance issues, they have notable limitations. For instance, Kube-bench primarily focuses on static configuration checks and does not provide real-time monitoring capabilities. This limits its effectiveness in dynamic environments where security configurations may change frequently.

Similarly, Kube-hunter, despite its strength in simulating attack scenarios, lacks

integration with continuous deployment pipelines, which makes it less suitable for environments with rapid deployment cycles. This tool also has limitations in identifying complex misconfigurations related to Kubernetes network policies, which are critical for preventing lateral movement of attacks within clusters.

One significant gap identified in the current toolset is the lack of comprehensive automated solutions that integrate both runtime monitoring and static analysis. Most existing tools focus on either one or the other, which can lead to security blind spots in environments where threats evolve rapidly.

To address these gaps, we propose a framework that combines the capabilities of multiple tools to create a more comprehensive security solution. This framework leverages real-time monitoring tools like Falco in conjunction with static analysis tools like Clair to provide a more holistic view of the security posture. Furthermore, we suggest integrating these tools with AI-driven threat detection systems that can predict and mitigate potential security issues before they escalate.

Conclusion

This study highlights the need for a more integrated approach to Kubernetes security. While existing tools provide valuable functionalities, they often operate in isolation, leading to potential security gaps. Our comprehensive analysis demonstrates that current solutions, such as Kube-bench and Kube-hunter, are effective in identifying specific vulnerabilities but lack the capability to provide real-time monitoring and proactive threat mitigation.

The primary scientific contribution of this study is the development of an integrated security framework that combines the strengths of existing tools while addressing their limitations. By leveraging real-time monitoring tools like Falco and static analysis tools like Clair, we propose a holistic approach to securing Kubernetes environments. This framework not only improves the detection and mitigation of security threats but also offers a structured methodology for selecting and deploying security tools in dynamic Kubernetes environments.

Future research should focus on refining and validating the proposed framework in diverse Kubernetes environments. Additionally, exploring the integration of AI-driven threat detection systems could further enhance the framework's capabilities, enabling proactive threat management and automated responses to emerging security challenges.

References

- Senjab K., Abbas S., Ahmed N., & Khan A.U.R. (2023). A survey of Kubernetes scheduling algorithms. *Journal of Cloud Computing*, 12(1), 87. (in English)
- Karim Manaouil, Adrien Lebre. Kubernetes and the Edge?. [Research Report] RR-9370, Inria Rennes - Bretagne Atlantique. 2020, pp.19. fihal-02972686v2f. (in English)
- Vohra D. (2016). *Kubernetes microservices with Docker*. Apress. (in English)
- Subash Thota. (2018); DOCKER AND GOOGLE KUBERNETICS. *Int. J. of Adv. Res.* 6 (Jul). 984-998] (ISSN 2320-5407). <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/7449>. (in English)
- Rosso J., Lander R., Brand A., & Harris J. (2021). *Production Kubernetes*. « O'Reilly Media, Inc.». (in English)

Kubernetes Components. Available online: <https://kubernetes.io/docs/concepts/overview/components/> (accessed on 20 January 2024). (in English)

Mytilinakis P. (2020). *Attack methods and defenses on Kubernetes* (Master's thesis, Πανεπιστήμιο Πειραιώς). (in English)

Kubernetes vulnerabilities in 2023. <https://www.armosec.io/blog/kubernetes-vulnerabilities-2023/> (accessed on 20 January 2024). (in English)

Martin A., & Hausenblas M. (2021). *Hacking Kubernetes*. «O'Reilly Media, Inc.» (in English)

Top 10 Kubernetes Security Tools in 2023. Available online: <https://www.practical-devsecops.com/kubernetes-security-tools/> (accessed on 22 February 2024). (in English)

Alqarni A. (2023). *Enhancing Cloud Security and Privacy with Zero-Knowledge Encryption and Vulnerability Assessment in Kubernetes Deployments* (Doctoral dissertation, Middle Tennessee State University). (in English)

Van Der Slik, M., Wiersma F., & PwC W.O. (2021). Validating the replacement filtering features of popular alternative admission controllers for Pod Security Policies. (in English)

Budigiri G., Baumann C., Mühlberg J.T., Truyen E., & Joosen W. (2021, June). Network policies in kubernetes: Performance evaluation and security analysis. In *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)* (pp. 407-412). IEEE. (in English)

Bagheri S., Kermabon-Bobinnec H., Majumdar S., Jarraya Y., Wang L., & Pourzandi M. (2023, May). Warping the Defence Timeline: Non-disruptive Proactive Attack Mitigation for Kubernetes Clusters. In *ICC 2023-IEEE International Conference on Communications* (pp. 777-782). IEEE. (in English)

Dell'Immagine G., Soldani J., & Brogi A. (2023). KubeHound: Detecting Microservices' Security Smells in Kubernetes Deployments. *Future Internet*, 15(7), 228. <https://doi.org/10.3390/fi15070228>. (in English)

Verma V. (2024). Network Security Policies for Containers in Cloud Applications. (in English)

Jacopo Bufalino, Mario Di Francesco, and Tuomas Aura. 2023. Analyzing Microservice Connectivity with Kubesonde. In *Proceedings of the 31st ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE '23)*, December 3–9, 2023, San Francisco, CA, USA. ACM, New York, NY, USA, 6 pages. <https://doi.org/10.1145/3611643.3613899>. (in English)

Kubernetes v1.29: Mandala. Available online: <https://kubernetes.io/blog/2023/12/13/kubernetes-v1-29-release/> (accessed on 26 January 2024). (in English)

Joslyn H. How the Kubernetes Gateway API Beats Network Ingress. Available online: <https://thenewstack.io/how-the-kubernetes-gateway-api-beats-network-ingress/> (accessed on 26 January 2024). (in English)

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.326>

FTMP: 27.25.19

ӘӨЖ: 001.891.573

**A.T. Akynbekova¹, A.A. Mukhanova^{1*}, Salah Al-Majeed²,
A.G. Altayeva³, 2025.**

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

²Lincoln University, Lincoln, Great Britain;

³M.Kh. Dulati Taraz Regional University, Taraz, Kazakhstan.

mail: ataiman77@mail.ru

PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF FUZZY MODELS OF DECISION MAKING IN SOCIAL PROCESSES

Akynbekova Aiman Turgangazievna – doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail ataiman77@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0280-095X>;

Mukhanova Ayagoz Asanbekovna – PhD, associate professor L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail ayagoz198302@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3987-0938>;

Salah Al-Majeed – PhD, Deputy Head of School of Computer Science, University of Lincoln, Lincoln, Great Britain, E-mail salah.almajeed@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0002-3382-4685>;

Altayeva Gulzhakhan Serikbaevna – master's degree, Taraz Regional University named after M.H Dulati, Taraz, Kazakhstan, E-mail galtayeva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7955-5344>.

Abstract. The use of a fuzzy model in social processes is an interesting and promising area of research. The article discusses the use of a fuzzy model in social processes, as well as issues related to making management decisions using this model in a state of uncertainty. During the study, criteria for the development of social processes were developed and possible factors and indicators characterizing social processes were identified. The article describes the stages of modeling social processes and provides applicable examples of decision making.

A fuzzy model allows one to take into account uncertainty and fuzziness in data, which is especially important in the context of social phenomena, where there are often no clear boundary conditions and factors. The created complex of fuzzy models, which are used to assess the development of the social sphere of the region, will allow to correctly characterize the social indicators of the region's development at different stages of the decision-making process on social processes. Fuzzy models make it possible to apply high-quality expert hypotheses on the real and expected level of development of the region.

Administrative decision-making in management using a fuzzy model can be carried out by forming a new approach to creating a structure for presenting the tasks being solved. Using the approach described in the article, the shortcomings of the probabilistic approach associated with taking into account uncertainty are eliminated.

Key words: social process, management decision, fuzzy model, criteria for the development of social processes, decision-making models, fuzzy set theory, pair model, factors influencing social processes, hierarchy analysis method, model using expert assessments, integral assessment model.

**А.Т. Ақынбекова¹, А.А. Муханова^{1*}, Salah Al-Majeed²,
Г.С. Алтаева³, 2025.**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

²Lincoln University, Lincoln, Ұлыбритания;

³М.Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті, Тараз, Қазақстан.

E-mail: ataiman77@mail.ru

ӘЛЕУМЕТТІК ПРОЦЕСТЕРДЕ ШЕШІМДЕР ҚАБЫЛДАУДЫҢ БҰЛДЫР МОДЕЛЬДЕРІН ЕНГІЗУ МӘСЕЛЕЛЕРІ

Ақынбекова Айман Турғанғазықызы – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Евразия Ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail ataiman77@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0280-095X>;

Муханова Аяғоз Асанбекқызы – PhD, қауымдастырылған профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Евразия Ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail ayagoz198302@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3987-0938>;

Salah Al-Majeed – PhD Dr, Deputy Head of School of Computer Science, University of Lincoln, Lincoln, Ұлыбритания, E-mail salah.almajeed@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0002-3382-4685>;

Алтаева Гулжахан Серікбайқызы – магистр, М.Х. Дулати атындағы Тараз өңірлік университеті, Тараз, Қазақстан, E-mail galtayeva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7955-5344>.

Аннотация. Әлеуметтік процестерде бұлдыр модельді қолдану қызықты және перспективалы зерттеу саласы болып табылады. Мақалада әлеуметтік процестерде бұлдыр модельді қолдану, сондай-ақ белгісіздік жағдайында осы модельді пайдалана отырып басқару шешімдерін қабылдаумен байланысты мәселелер қарастырылады. Зерттеу барысында әлеуметтік процестердің даму критерийлері әзірленіп, әлеуметтік процестерді сипаттайтын ықтимал факторлар мен көрсеткіштер анықталды. Мақалада сонымен қатар әлеуметтік процестерді модельдеу кезеңдері сипатталған және шешім қабылдаудың қолданылатын мысалдары келтірілген.

Бұлдыр модель деректердегі белгісіздік пен анық еместікті есепке алуға мүмкіндік береді, бұл әсіресе нақты шекаралық шарттар мен факторлар жиі болмайтын әлеуметтік құбылыстар контекстінде маңызды. Аймақтың әлеуметтік саласының дамуын бағалау үшін қолданылатын бұлдыр

модельдердің құрылған кешені әлеуметтік процестер туралы шешім қабылдау үдерісінің әртүрлі кезеңдерінде аймақ дамуының әлеуметтік көрсеткіштерін дұрыс сипаттауға септігін тигізеді. Бұлдыр модельдер аймақ дамуының нақты және күтілетін деңгейі туралы жоғары сапалы сараптамалық гипотезаларды қолдануға мүмкіндік береді.

Бұлдыр модельді пайдалана отырып, басқаруда әкімшілік шешім қабылдау шешілетін міндеттерді ұсыну құрылымын құрудың жаңа тәсілін қалыптастыру арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Мақалада сипатталған тәсілді пайдалана отырып, белгісіздікті есепке алумен байланысты ықтималдық тәсілдің кемшіліктері жойылады.

Түйін сөздер: әлеуметтік процесс, басқару шешімі, анық емес модель, әлеуметтік процестердің даму критерийлері, шешім қабылдау модельдері, анық емес жиындар теориясы, жұптық модель, әлеуметтік процестерге әсер ететін факторлар, иерархиялық талдау әдісі, сарапшылық бағалауларды қолданатын модель, интегралды бағалау моделі.

**А.Т. Акынбекова¹, А.А. Муханова^{1*}, Salah Al-Majeed²,
Г.С. Алтаева³, 2025.**

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан;

²Lincoln University, Линкольн, Великобритания;

³Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан.
E-mail: ataiman77@mail.ru

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СОЦИАЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ

Акынбекова Айман Тургангазиевна – докторант, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: ataiman77@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0280-095X>;

Муханова Аягоз Асанбековна – PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: ayagoz198302@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3987-0938>;

Salah Al-Majeed – PhD, Заместитель декана факультета компьютерных наук Линкольнского университета, Линкольн, Великобритания, E-mail: salah.almajeed@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0002-3382-4685>;

Алтаева Гулжахан Серикбаевна – магистр, Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан, E-mail: galtayeva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7955-5344>.

Аннотация. Использование нечеткой модели в социальных процессах представляет собой интересную и перспективную область исследований. В статье рассматривается использование нечеткой модели в социальных процессах, а также вопросы, связанные с принятием управленческих решений с использованием этой модели в состоянии неопределенности. В

ходе исследования разработаны критерии развития социальных процессов и определены возможные факторы и показатели, характеризующие социальные процессы. В статье описываются этапы моделирования социальных процессов, приводятся применимые примеры принятия решений.

Нечеткая модель позволяет учитывать неопределенность и нечеткость в данных, что особенно важно в контексте социальных явлений, где часто нет четких граничных условий и факторов. Созданный комплекс нечетких моделей, которые используются для оценки развития социальной сферы региона, позволит корректно характеризовать социальные показатели развития региона на разных этапах процесса принятия решений о социальных процессах. Нечеткие модели дают возможность применять качественные экспертные гипотезы о реальном и предполагаемом уровне развития региона.

Принятие управленческих решений в менеджменте с использованием нечеткой модели может быть осуществлено путем формирования нового подхода к созданию структуры для представления решаемых задач. С помощью описанного в статье подхода можно устранить недостатки вероятностного подхода, связанные с учетом неопределенности.

Ключевые слова: социальный процесс, управленческое решение, нечёткая модель, критерии развития социальных процессов, модели принятия решений, теория нечетких множеств, парная модель, факторы, влияющие на социальные процессы, метод анализа иерархий, модель с использованием экспертных оценок, модель интегральной оценки.

Кіріспе. Қазіргі Қазақстан қоғамы әлемде болып жатқан жаһандық өзгерістерге сай дамуда. Даму тарихы қоғамдағы нарықтық өзгерістермен және ақпараттық технологияның дамуымен байланысты.

Бұл мәселені қазіргі заманғы көптеген ғалымдар зерттеумен айналысуда, мысалы, М. Кастеллс өз еңбектерінде нақты виртуалдылықтың жаңа мәдениеті пайда болғанын айтады. «...Электрондық коммуникациялар жаңа мәдениетте қажетті көрініс құралы болып табылады, ал ақпараттық қоғамның басым функциялары мен құндылықтары ақпараттық ағындарда ұйымдастырылған» (Броневиц, 2022). Қоғам ақпараттың қолжетімділігі мен жеделдігі, әлеуметтік қақтығыстар мен әлеуметтік ұйымның дәстүрлі формаларынан қиындықтардың туындауы сияқты қасиеттермен сипатталады. Басқару процесінде ақпарат алмасуды технологияландыру модельдеуді көздейді, ал әлеуметтік процестерде шешім қабылдаудың бұлдыр модельдерін құру қазіргі заманның сын-қатерлеріне қажетті жауап болып көрінеді.

Мұндай қиындықтар ақпараттық қоғамның бірегейлігінің салдары болып табылады, сондықтан дәстүрлі қоғамға тән проблемалардан айтарлықтай ерекшеленеді. Билік қатынастары саласындағы ақпараттық қоғам үшін іргелі фактор ақпараттың қолжетімділігі мен өзектілігі болып табылады. Әлеуметтік процестерде шешім қабылдауда бұлдыр модельдердің генерациясы қазіргі заманның сын-қатерлеріне маңызды жауап болып тыбылады, сондықтан

басқару процесінде ақпарат алмасу технологиясы символдық мағынаны білдіреді.

Қазақстандық қоғамда болып жатқан нарықтық өзгерістер менеджменттің құрылымдық байланыстарынан көрініс тапты. Кез келген басқа түрлендірулер сияқты, бір экономикалық жүйеден екіншісіне көшу ақпарат ағындарының макро, мезо және микро деңгейлеріндегі үзілістермен жүреді. «Тиімді басқару» түсінігін бағалау үшін әртүрлі гипотезалар алға тартылды. Бұл мәселені зерттеу үшін қатаң нарықтық заңдардың әсері жағдайында шешім қабылдаудың ғылыми негізін қамтамасыз етуге арналған әлеуметтік процестерді модельдеудің әдіснамалық негіздерін қарастыру қажет. Демек, модельдеудің бастапқы алғышарттары әлеуметтік-экономикалық дамудың ұзақ мерзімді стратегиясын және оларды желілік құрылымда жүзеге асырудың ықтимал баламаларын әзірлеуге бағытталуы керек. Сондай-ақ нарықтық конъюнктурадағы белгісіздік жағдайында пайда болатын оперативтік, тактикалық ықтималдықтар мен мүмкіндіктерді ескеру қажет.

Қоғамды зерттеуде әлеуметтік тәсілді қолдану оның құрылымын, динамикасы мен дамуын жақсы түсінуге, оның қызмет етуін анықтайтын негізгі заңдылықтар мен тенденцияларды анықтауға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл әлеуметтік процестер мен құбылыстарды терең талдауға көмектеседі, сондай-ақ әлеуметтік саясат пен әлеуметтік басқаруды жетілдіру бойынша ұсыныстар әзірлеу құралдарын ұсынады (Блюмин, 2017).

Материалдар мен әдістер. Әлеуметтік процестерді үздіксіз өзгеріп, дамып отыратын динамикалық объектілер ретінде түсіну әлеуметтану ғылымында маңызды болып табылады. Т. Парсонстың әлеуметтік жүйелердегі өзгерістер түрлері туралы теориясы осы динамиканың маңызды аспектілерін көрсетеді (Лебедева, 2019). Жүйе құрылымының өзгеруіне әкелмейтін өзгерістердің бірінші түрін әлеуметтік процестердің қызмет етуіндегі өзгерістер деп санауға болады. Бұл өзгерістер негізінен сандық аспектілермен сипатталады, мысалы, жүйедегі элементтердің көптігі, қарқындылығы немесе таралуының өзгеруі. Мысалдар жұмыспен қамту деңгейіндегі өзгерістерді, демографиялық үрдістерді немесе экономикалық өсімдегі өзгерістерді қамтиды. Жүйе құрылымының өзгеруімен байланысты өзгерістердің екінші түрі әлеуметтік процестердің даму процестерін білдіреді. Бұл өзгерістер құндылықтардың, институттардың, әлеуметтік рөлдердің және адамдар арасындағы қарым-қатынастардың өзгеруі сияқты жүйенің өз құрылымының сапалық өзгерістерімен сипатталады. Мұндай өзгерістерге мысал ретінде әлеуметтік революциялар, саяси жүйедегі өзгерістер, мәдени трансформациялар және әлеуметтік стратификациядағы өзгерістер жатады. Өзгерістердің осы екі түрін ажырату әлеуметтік жүйелер мен процестердің динамикасын жақсы түсінуге мүмкіндік береді. Дегенмен, бұл екі түрдегі өзгерістер жиі өзара байланысты екенін есте ұстаған жөн, ал оның әрекет етуіндегі өзгерістер құрылымның өзгеруіне әкелуі мүмкін және керісінше.

Әлеуметтік
процестердің даму
критерийлері

Жүйенің құрылымдық күрделенуі

Процестердің табиғатын қиындату немесе әлеуметтік қызметтерін өзгерту

Әлеуметтік институттар мен ұйымдар қызметінің нәтижелілігін, тиімділігін және бәсекеге қабілеттілігін арттыру

Сурет 1. Әлеуметтік процестердің даму критерийлері

Әлеуметтік процестердің дамуы материалдық, интеллектуалдық және рухани қанағаттану мүмкіндіктерін кеңейтуді қамтиды. Жеке адам үшін оның өмір сүру сапасын жақсарту маңызды рөл атқарады (Киселёва, 2019). Қазақстанда қоғам өмірінің әртүрлі салаларын (демография, денсаулық сақтау, білім, ғылым, мәдениет, цифрлық экономика, тұрғын үй және қалалық экология және т.б.) дамытуға бағытталған мемлекеттік бағдарламалар мен ұлттық жобалар жүзеге асырылуда, бұл ел халқының өмір сүру сапасын арттыруға мүмкіндік береді (Головина, 2020).

Қоғамдағы әртүрлі әлеуметтік өзгерістер арасындағы тығыз байланыс ретінде түсіндіруге болатын «әлеуметтік процесс» түсінігін қарастырайық. Қазіргі әлеуметтану екпінді әлеуметтік шындықтың процессуалдылығына ауыстыру тенденциясымен сипатталады. Қоғам дискретті әлеуметтік өзгерістерге ұшырайтын тұрақты мемлекет ретінде емес, процесс, өзара әрекеттесу, құрылымдау өрісі ретінде қарастырылады. П.Штомпканың ғылыми теориясы бойынша, негізінен қоғамда болып жатқан барлық процестер стационарлық болуы мүмкін емес. Қоғамдағы шындық динамикалық өзгерістерді білдіреді.

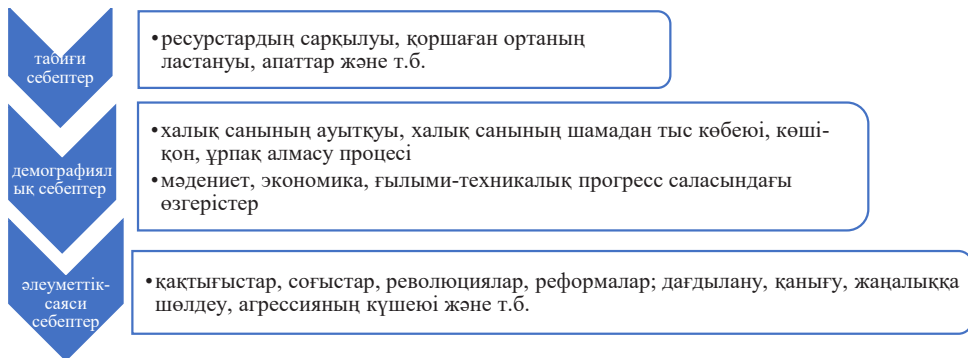
П. Сорокиннің анықтамасы бойынша процесс дегеніміз қозғалыстың, түрлендірудің, түрленудің, кезектесудің немесе «эволюцияның» кез келген түрі, яғни зерттелетін объектінің белгілі бір уақыт аралығындағы кез келген түрленуі. Ол орналасудың өзгеруімен немесе оның параметрлерінің өзгеруімен сипатталады.

Процесс оған тұрақты және объективті сипат беретін, онда болып жатқан әлеуметтік өзгерістердің барысын бақылайтын құрылым мен динамиканың болуын болжайды.

Әлеуметтік жүйелер - бұл белгілі бір ережелер, нормалар мен құндылықтар шеңберінде бір-бірімен өзара әрекеттесетін индивидтердің, топтардың немесе ұйымдардың жиынтығы. Әлеуметтік жүйелердің эволюциясы технологияның, экономикалық жағдайдың, саяси құрылымның және мәдени дәстүрлердің өзгеруі сияқты көптеген факторлардың өзара әрекеттесуіне байланысты болады.

Әлеуметтік өзгерістердің себептері әртүрлі болуы мүмкін және экономикалық, саяси, мәдени, технологиялық және тіпті психологиялық аспектілер сияқты факторларды қамтиды. Әлеуметтік өзгерістердің негізгі және қоздырушы себептері туралы айтқанда, «ішкі ағындар», «құрылымдық

өзгерістер» немесе «кумулятивтік процесс» сияқты ұғымдар жиі айтылады. Бұл өзгерістер тек көрнекті және айқын факторлардың әсерінен ғана емес, сонымен бірге бір қарағанда көрінбейтін, бірақ қоғамға айтарлықтай әсер ететін тереңірек, жасырын динамиканың әсерінен болуы мүмкін дегенді білдіреді.



Сурет 2. Әлеуметтік процестердің ықтимал себептері (Балашов, 2020)

Ғылыми қоғамдастық әлеуметтік процестерді қабылдау мен бағалаудың стандарттарын, әдістері мен тәсілдерін анықтауда, сондай-ақ қоғамдық пікірді қалыптастыруда және ғылыми деректер мен талдауларға негізделген шешімдер қабылдауда орталық рөл атқарады.

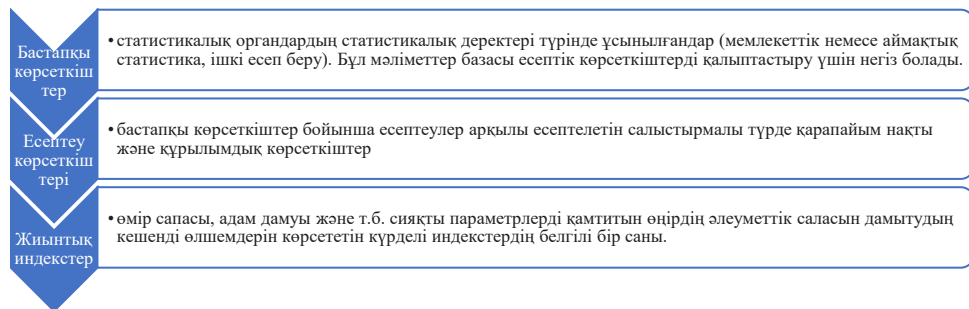
Процестер мен жобаларды басқару контекстінде стандарттар мен ережелер процестерді тиімді бақылау мен модельдеуді қамтамасыз етуде, олардың орындалуын бағалау критерийлерін анықтауда маңызды рөл атқарады.

Әлеуметтік салада қоғамның барлық мүшелерінің өмір сүру жағдайлары мен өміршеңдігін қамтамасыз етуге және сақтауға бағытталған әртүрлі әлеуметтік субъектілердің өзара әрекеті мен ынтымақтастығы орын алады. Бұл азаматтардың өмір сүру сапасы мен әл-ауқатына әсер ететін әлеуметтік қамсыздандыруды, денсаулық сақтауды, білім беруді, мәдениетті, коммуникацияларды ұйымдастыруды және басқа да аспектілерді қамтиды.

Әлеуметтік сала қоғамдық қатынастар мен әлеуметтік құрылымдардың ұдайы өндірісі процесінде білімнің, құндылықтардың, дағдылардың ұрпақтан ұрпаққа берілуін, жеке тұлғалардың қоғамға әлеуметтенуін және интеграциялануын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады.

Осылайша, әлеуметтік сала қоғамның тұрақты және үйлесімді қызмет етуінің дамуы мен сақталуына ықпал ететін қоғамдық өмірдің негізгі элементі болып табылады.

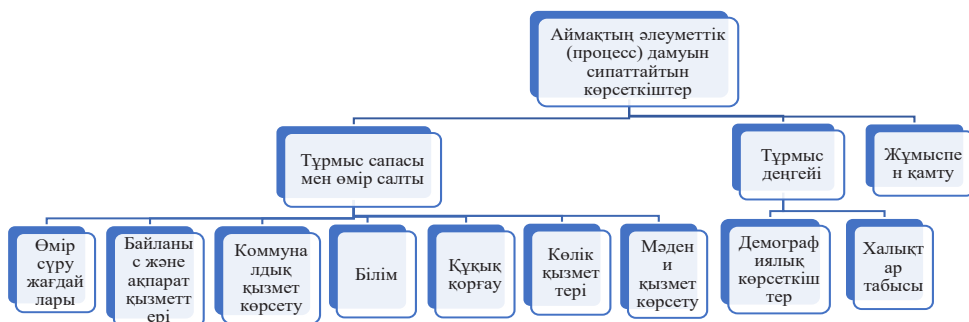
Нәтижелер мен талқылау. Бұл зерттеудің әдіснамалық негізі аймақтың дамуының әлеуметтік процестерін сипаттау үшін қолданылатын көрсеткіштердің үш деңгейлі жүйесіне негізделген.



Сурет 3. Аймақтық дамудың әлеуметтік процестерін сипаттау үшін қолданылатын көрсеткіштердің үш деңгейлі жүйесі

Күрделі әлеуметтік құбылыстарды бағалау саласында әртүрлі салаларда әртүрлі көрсеткіштерді құруға қатысатын американдық сарапшылар индекстерге теріс көзқараспен қарайды. Бұл теорияға сәйкес, бұл индекстер гетерогенді деректер тобы үшін орташа көрсеткіштерді көрсете отырып, нақты жағдайды тиісті дәрежеде сипаттауға мүмкіндік бермейді. Осыған байланысты соңғы 10 жылда облыстағы әлеуметтік саладағы жағдайды бағалау және мониторингтеу мамандары өңірлік даму секторлары туралы ақпаратты талдауды жөн көрді. Талдау арқылы жекелеген секторлар көрсеткіштердің белгілі бір сыныбы бойынша жеке бағаланады және нәтижесінде аймақтың тұтас жағдайына сараптамалық көзқарас құрылады.

1980 жылдардың аяғында құрама индекстерді есептеп шығару мен есептеме жүргізудің түрлендірілген әдістерін қолдану дәуірі аяқталды. Осы уақытқа дейін үлкен көлемдегі статистикалық ақпарат өңделетін компьютерлердің дамуында ілгерілеушілік байқалды және тәуелсіз айнымалылардың (көрсеткіштердің) көп санынан есептелетін таза сандық бағалаулар, математикалық заңдар бойынша шындық құбылыстарын модельдеу және күрделі индекстерді есептеу әдістері дамыды. Бірақ тәжірибе көрсеткендей, көбінесе композициялық индекстер, сондай-ақ симуляциялық математикалық модельдер объектінің нақты күйінің нақты бейнесін бере алмайды.



Сурет 4. Аймақтың әлеуметтік (процестер) дамуын сипаттайтын көрсеткіштер құрылымы (Лакин, 2021)

Жоғарыда айтылғандардан аймақтың әлеуметтік (процестер) дамуын бағалаудың қолданыстағы әдістеріндегі кемшіліктер туралы төмендегідей қорытынды жасауға болады:

1. Бір ғана сандық көрсеткіштерді қолдану аймақтың әлеуметтік дамуының толық бейнесін бере алмайды, өйткені мұнда болып жатқан процестер мен құбылыстар сандық мінез-құлықты көрсетеді. Әлеуметтік салаға келетін болсақ, көптеген критерийлер инфрақұрылымдық жобалармен салыстырғанда адамдардың өмір сүру деңгейін жеке бағалауымен байланысты.

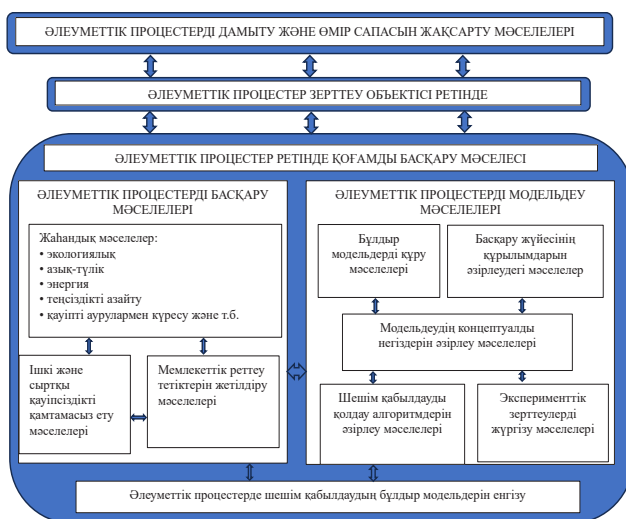
2. Интегралдық көрсеткіштер (индекстер) өңірдің қазіргі даму жағдайын сипаттауға мүмкіндік бермейді, өйткені оларда әртүрлі деректердің орташа мәндері бар. Индекстерді есептеу кезінде қолданылатын параметрлердің икемді емес тәуелділігі мен салмағы сарапшылардың өз пікірі болған жағдайда, бағалауды өзгертуге мүмкіндік бермейді.

3. Мониторингке арналған көрсеткіштердің шектеулі жиынтығы өңірдің даму ерекшеліктерін ескермейді.

Аймақтың әлеуметтік даму процестерін сипаттайтын жеке көрсеткіштердің өзгеруі жалпы облыстың әлеуметтік-экономикалық жағдайындағы өзгерістердің нақты бейнесін бере алмайды.

«Өмір сапасы» терминінің тарихи дамуын талдау бұл концепцияның дамуы қоғам деңгейінен жеке тұлғаға, болмыс факторларын объективті бағалаудан субъективті бағалауға дейінгі дамуға және тереңдетуге бағытталған деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Өмір сүру сапасын өлшеу мен бағалаудың негізгі әдістері зерттелді. Бұл ғылыми қызығушылықтың біртұтас көзқарас векторына қарай жылжып келе жатқанын көрсетеді, оған сәйкес өмір сапасы объективті және субъективті тәсілдер синтезі арқылы қалыптасады. Өмір сапасын модельдеу және басқару мәселесіне жеткіліксіз көңіл бөлінетіні анықталды.

5-суретте әлеуметтік процестерді модельдеу кезінде туындауы мүмкін проблемалар берілген.



Сурет 5. Басқару мәселелерінің құрылымы және әлеуметтік процестерді модельдеу

Әлеуметтік процесті модельдеу күрделі концепция болып табылады, өйткені ол әртүрлі жағдайларда өзгеруі мүмкін көптеген айнымалылар мен факторларды қамтиды. Міне, әлеуметтік процестерді модельдеу кезінде кездесетін негізгі мәселелердің бірқатары (Петровский, 2019):

1. Деректердің тапшылығы және толық еместігі: әлеуметтік процестер туралы деректер көбінесе толық емес немесе қол жетімсіз болуы мүмкін. Бұл дәл үлгілерді әзірлеуді қиындатуы немесе сәйкес келмейтін нәтижелерге әкелуі мүмкін.

2. Адами факторларды есепке алудың қиындығы: адамдар эмоцияларға, бейтараптықтарға немесе болжауға болмайтын факторларға негізделген шешім қабылдауы мүмкін, бұл олардың мінез-құлқын үлгілеуді қиындатады.

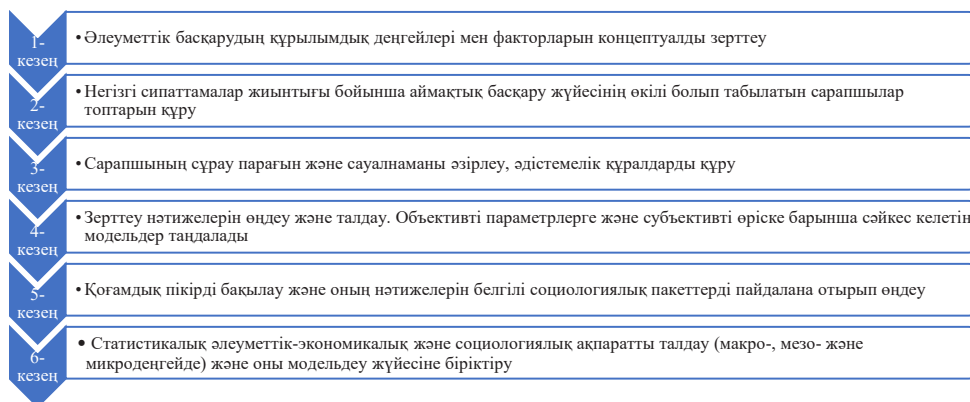
3. Белгісіздік және кездейсоқтық: Әлеуметтік процестер модельдеу нәтижелерін айтарлықтай өзгерте алатын кездейсоқ әсерлерге ұшырауы мүмкін. Адамның мінез-құлқындағы белгісіздік нәтижелерді болжауда қиындықтар тудыруы мүмкін.

4. Масштабтау мәселесі: Шағын топтағы адамдардың мінез-құлқы үлкен қауымдастықтың мінез-құлқынан немесе тіпті ұлттық деңгейден айтарлықтай ерекшеленуі мүмкін. Модельдеу масштаб пен әсердегі осы айырмашылықты есепке алуы керек.

5. Себеп-салдарлық күрделілік мәселесі: Әлеуметтік жүйелерде себеп-салдарлық байланыстар көбінесе күрделі және сызықты емес, бұл әртүрлі факторлардың нәтижелерге әсерін анықтау мен талдауды қиындатады.

Әлеуметтік процестердің ерекшеліктерін талдау оны өзара байланысты және өзара әрекеттесетін ішкі жүйелердің біртұтас, интегралды динамикалық жүйесі түрінде ұсынылған макродеңгейдегі ұйымдық жүйе ретінде анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу үшін әлеуметтік жүйелердің даму процестерінің негізгі функциялары анықталды, мұнда әлеуметтік процестердің даму критерийлері өмір сүру сапасын жақсарту болып табылады. Қоғамның әлеуметтік жүйе ретінде қызмет ету және даму процестерін модельдеуге байланысты маңызды факторлар анықталды. Ақпараттық-математикалық тұжырымның мәні, жоғарыда айтылғандай, зерттелетін әлеуметтік объектіні (процесті) жеткілікті математикалық модельмен алмастыру және аналитикалық әдістер немесе математикалық эксперименттер арқылы осы модельдің қасиеттерін зерттеу.

6-суретте әлеуметтік процестерді басқару жүйесіне бұлдыр модельді әзірлеуге жақындау реттілігін сипаттайтын алгоритм көрсетілген. Бұл ретте қадамдық жуықтау жүйенің құрылымдық элементтерін талдауға негізделген (Puyasov, 2019).



Сурет 6. Әлеуметтік процестерде шешім қабылдаудың бұлдыр модельдерін құрастырудың циклдік алгоритмі

Модельдерді зерттеу «субъективті» деп аталатын көрсеткіштермен үздіксіз түзетілуі керек. «Субъективті» компонентті өлшеу әлеуметтік құбылыстардың (үдерістердің) формальды моделіне көшудің қажетті қадамы болып табылады. Ол туралы осы зерттеудің авторы «өмір сапасы» категориясын өлшеуге арналған модельді құру кезінде атап көрсетті.

Осылайша, бұл зерттеу аймақтық басқару жүйесіндегі субъект-объектілік қатынастарды концептуализациялау механизмін ұсынды. Әлеуметтік басқарудың құрылымдық деңгейлерін және аймақтық басқару жүйесін сипаттайтын факторларды концептуалды зерттеу (Доломатов, 2014) келесі кезеңдерден тұрады:

1-кезең. Негізгі белгілері бойынша басқару - әкімшілік және мәртебелік болып бөлінетін аймақтық басқару жүйесін ұсынатын сарапшылар топтарын құру.

2-кезең. Сарапшының сұрау парағын және сауалнаманы әзірлеу, әдістемелік құралдарды құру және әртүрлі сарапшылар топтарымен социологиялық зерттеулер жүргізу.

3-кезең. Зерттеу нәтижелерін өңдеу және талдау, ең адекватты үлгілерді таңдау және алынған сандық сипаттамаларды алдыңғы кезеңде сипатталған модельдерге енгізу.

4-кезең. Қоғамдық пікірді бақылау және оның нәтижелерін социологиялық пакеттерді пайдалана отырып өңдеу.

5-кезең. Әртүрлі деңгейдегі (макро-, мезо- және микро-) статистикалық әлеуметтік-экономикалық және социологиялық ақпаратты талдау және оны аймақтағы әлеуметтік процестердің дамуын диагностикалау және болжау үшін симуляциялық жүйеге біріктіру.

Бұл механизм аймақтық басқарудың әртүрлі аспектілерін жүйелеуге және талдауға, сондай-ақ қоғамдық пікірді бағалауға және аймақтық әлеуметтік процестерді дамыту стратегияларын әзірлеу үшін алынған мәліметтерді біріктіруге мүмкіндік береді.

Қорытынды. Зерттеуді қорытындылай келе, әзірленген модельдер зерттеуде көрсетілген қолданыстағы әдістердің кемшіліктерін толығымен жояды деп қорытынды жасауға болады. Олар аймақтық дамудың әлеуметтік процестерін сипаттайтын факторлардың сапалық бағасын нақтылауға мүмкіндік береді. Аймақтағы әлеуметтік процестерді дамыту туралы шешім қабылдау үшін қолданылатын интегралды модельдер басқару органдары, кеңесшілер, кәсіпкерлер және тұрғын халық сияқты әртүрлі мүдделі тараптардың қатысуын қамтуы мүмкін. Бұл, әсіресе, аймақтың жағдайы мен даму перспективаларына кеңірек және жан-жақты шолу жасау үшін пайдалы болуы мүмкін.

Зерттеу саласын талдау аймақтың әлеуметтік дамуын бағалау міндеті көп өлшемді екенін және бағалау үшін сандық және сапалық критерийлер қолданылатынын көрсетті.

Шешім қабылдаудың стратегиялық сипаты жоғары белгісіздік, шешімдердің әлсіз құрылымын тудырады, бұл ретте шешім қабылдау модельдерін құру үшін ақпараттың ең маңызды көзі адам (сарапшы, шешім қабылдаушы жақ) болып табылады. Нақты объективті үлгілерді құру мүмкін емес.

Шешім қабылдаушыларға негізделген шешім қабылдауға көмектесетін және шешім қабылдау процесінің негізделгенін қамтамасыз ететін әлеуметтік даму бойынша шешім қабылдау модельдерін құру; аймақтың сыртқы және ішкі ортасының жай-күйі туралы қолда бар ақпаратты түсіндіруге және талдауға, даму факторлары арасындағы байланыстарды орнатуға, аймақтың стратегиялық даму бағдарларына жету барысын бақылауға және т.б. мүмкіндік береді.

Жоғары сапалы анық емес сараптамалық бағалауларды ресімдеу үшін анық, сандық деректермен қатар сапалы ақпаратты тиімді өңдеуге мүмкіндік беретін бұлдыр жиындар теориясының аппаратын және бұлдыр шешім қабылдау әдістерін пайдалану негізделген.

1-кестеде аймақтағы әлеуметтік процестердің дамуын бағалаудың қазіргі уақытта қолданылатын әдістері мен факторларды бағалау үлгілерінің салыстырмалы сипаттамасы берілген.

Кесте 1. Аймақтық дамудың әлеуметтік процестерін бағалаудың бұлдыр модельдерін қолданыстағылармен салыстыру

Критерийлер	Қолданыстағы модельдер	Ұсынылған модель
1. Мәліметтер көздері аймақтық дамудың әлеуметтік процестерін талдауға арналған	Мемлекеттік статистика органдарының мәліметтері	Облыстың мемлекеттік статистика органдары, тұрғындары, шаруашылық жүргізуші субъектілері және аймақтық басқару құрылымдары.
2. Бағалау үшін бастапқы индикаторлар тізбегінің тұрақтылығы	Әлеуметтік индикаторлар тізімі тек статистикалық органдардың шегінде қарастырылады	Әрбір көрсеткіштер жиынтығы.

3. Аймақтық дамудың әлеуметтік процесстерін сипаттайтын факторлардың өзгеру динамикасы	Дамудың жылдық көрсеткіштері бойынша бақылау жүргізіледі	Жылдардағы даму бойынша бақыланады
4. Жоғары сапалы сараптамалық бағалауды рәсімдеу мүмкіндігі бар	Жоқ	Бар
5. Интегралдық көрсеткіштерді құру мүмкіндігі	Шектеулі болып табылады, себебі кешенді индекстер тек 2-5 көрсеткішке негізделеді.	Иә, көрсеткіштер саны көбінесе шексіз болады.
6. Көрсеткіштің нақты мәнінің стратегиялық даму мақсатына сәйкестігін бағалау	Дамудың жылдар бойынша тек жеке көрсеткіштердің өзгеру динамикасы ғана қадағаланады.	Көрсеткіштің нақты мәнінің мақсатты күйге Көрсеткіштің нақты мәні мақсатты жағдайға қаншалықты жақын екені анықталады. жақындық дәрежесі есептеледі
7. Аймақтың даму стратегиясының іске асырылуын жан-жақты бағалау	Жоқ	Бар
8. Экономикалық қауіпсіздік және қолайлы жағдай тұрғысынан аймақтың әлеуметтік процесстерін сипаттайтын факторлардың деңгейін сипаттау	Аймақтың экономикалық қауіпсіздігіне қауіп төндіретін факторлардың шекаралық сыни мәндері ғана анықталады	Модель факторлар мәндерінің критикалық, қолайлы және аралық деңгейлерін бір уақытта көрсетеді, сонымен қатар көрсетілген деңгейлерге нақты фактор мәндерінің сәйкестік дәрежесін есептейді.

Жоғарыдағы 1-кестеде шешім қабылдаушы жақты шешім қабылдау процесінде қажетті ақпаратпен қамтамасыз ету тұрғысынан критерийлердің таңдалған жүйесіне сәйкес үлгілердің ерекше белгілері көрсетілген.

Әдебиеттер

Броневиц А.Г., Лепский А.Е. (2022) Нечеткие модели анализа данных и принятия решений [Текст]: учебное пособие. А.Г. Броневиц, А.Е. Лепский; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». - М.: Изд. дом Высшей школы экономики, - 264 с. - ISBN 978-5-7598-2317-9 (в обл.). - ISBN 978-5-7598-2407-7 (e-book) (in Russian)

Блюмин С.Л., Шуйкова И.А. (2017) Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности - Липецк: ЛЭГИ, - 138 с (in Russian)

Лебедева М.Е. (2019) Нечеткая логика в экономике-формирование нового направления. Идеи и идеалы. - Т. 11.- №. 1-1. - С. 197-212 (in Russian)

Киселёва Э.А., Красва А.А., Савинова Ю.С. (2019) Обзор нечеткой логики в управлении. Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». - №. 3. - С. 401-405 (in Russian)

Головина Ю.С. (2020) Нечеткая логика, сущность и перспективность применения. Интеллектуальный потенциал XXI века инновационной России. - С. 290-296 (in Russian)

Балашов О.В., Букачев Д.С. (2020) Подход к оценке качества управленческих решений на основе нечёткой логики. Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. - Т. 5. - №. 1. - С. 3-7 (in Russian)

Лакин И.И. (2021) Автоматизация принятия управленческих решений с использованием теории нечётких множеств. Актуальные теоретикометодологические и прикладные проблемы виртуальной реальности и искусственного интеллекта. - С. 30-33 (in Russian)

Петровский А. Б. (2019) Теория принятия решений А.Б. Петровский. - М. : Академия, - 400 с (in Russian)

Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Gabdullina E.R. (2019) Intelligent assistance of decision-making in the management of multifactor systems based on fuzzy cognitive models. Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019). - Published by Atlantis Press Advances in Intelligent Systems Research, - Vol. 166. - P. 1-7 (in English)

Доломатов М.Ю., Журавлева Н.А., Прошин Е.Н., Закиева Е.Ш. (2014) Проектирование информационной системы оценки уровня социальной напряженности // Современные проблемы науки и образования. - №2 [электронный ресурс]. URL: <https://www.scienceeducation.ru/ru/article/view?id=12286> (дата обращения 13.04.2024) (in Russian)

Faizi S., Rashid T., Saifun W. [et al.]. (2018) Decision Making with Uncertainty Using Hesitant Fuzzy Sets. International Journal of Fuzzy Systems. Vol. 20. P. 93 -103 (in English)

Wan S., Zhong L., Dong J.A (2020) New method for group decision making with hesitant fuzzy preference relations based on multiplicative consistency. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. Vol. 28, № 7. P. 1449–1463 (in English)

Вилков В.Б. (2017) Теория и практика оптимизации решений на основе нечетких множеств и нечеткой логики : монография. В.Б. Вилков, А.К. Черных, А.В. Флегонтов. - СПб. : Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, с.160 (in Russian)

Ahmed F., Kilic K. (2019) Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A performance analysis of various algorithms. Fuzzy Sets and Systems. Vol. 362. P. 110 - 128 (in English)

Катасёв А.С. (2019) Методы и алгоритмы формирования нечетких моделей оценки состояния объектов в условиях неопределенности. Вестник технологического университета. Т. 22, № 3. с. 138 - 147 (in Russian)

Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Gabdullina E.R. (2019) Dynamic model of controlling the behavior of an economic agent using the mechanism of selfregulation of resource flows. Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019). - Published by Atlantis Press Advances in Intelligent Systems Research, Vol. 166. - P. 240-245 (in English)

References

Bronevich A.G., Lepskij A.E. (2022) Nечetkie modeli analiza dannyh i prinyatiya reshenij [Fuzzy models of data analysis and decision making] [Текст]: учебное пособие. А.Г.Броневи́ч, А.Е.Лепский; Нас. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». - М.: Изд. дом Vysshej shkoly ekonomiki, - 264 s. - ISBN 978-5-7598-2317-9 (v obl.). - ISBN 978-5-7598-2407-7 (e-book) (in Russian)

Blyumin S.L., SHujkova I.A. (2017) Modeli i metody prinyatiya reshenij v usloviyah neopredelennosti [Models and methods of decision making under uncertainty] - Lipeck: LEGI, - 138 s (in Russian)

Lebedeva M.E. (2019) Nечetkaya logika v ekonomike-formirovanie novogo napravleniya [Fuzzy logic in economics - forming a new direction]. Idei i idealy. - Т. 11. - №. 1-1. - S. 197-212 (in Russian)

Kiselyova E.A., Kraeva A.A., Savinova YU.S. (2019) Obzor nechetkoj logiki v upravlenii [Overview of Fuzzy Logic in Control]. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh nauk i tekhnologij «Integral». - №. 3. - S. 401-405 (in Russian)

Golovina YU.S. (2020) Nечetkaya logika, sushchnost' i perspektivnost' primeneniya [Fuzzy logic, essence and application prospects]. Intellectual'nyj potencial XXI veka innovacionnoj Rossii. - S. 290-296 (in Russian)

Balashov O.V., Bukachev D.S. (2020) Podhod k ocenke kachestva upravlencheskih reshenij na osnove nechytokoj logiki [An approach to assessing the quality of management decisions based on

fuzzy logic]. *Mezhdunarodnyj zhurnal informacionnyh tekhnologij i energoeffektivnosti*. - T. 5. - №. 1. - S. 3-7 (in Russian)

Lakin I.I. (2021) Avtomatizaciya prinyatiya upravlencheskih reshenij s ispol'zovaniem teorii nechyotkih mnozhestv [Automation of management decision making using fuzzy set theory]. Aktual'nye teoretikometodologicheskie i prikladnye problemy virtual'noj real'nosti i iskusstvennogo intellekta. - S. 30-33 (in Russian)

Petrovskij A.B. (2019) Teoriya prinyatiya reshenij [Decision Theory]. A.B. Petrovskij. - M.: Akademiya, - 400 s (in Russian)

Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Gabdullina E.R. (2019) Intelligent assistance of decision-making in the management of multifactor systems based on fuzzy cognitive models. Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019). - Published by Atlantis Press Advances in Intelligent Systems Research, - Vol. 166.- P. 1-7 (in English)

Dolomatov M.YU., ZHuravleva N.A., Proshin E.N., Zakieva E.SH. (2014) Proektirovanie informacionnoj sistemy ocenki urovnya social'noj napryazhennosti [Design of an information system for assessing the level of social tension]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. - №2 [elektronnyj resurs]. URL: <https://www.scienceeducation.ru/ru/article/view?id=12286> (data obrashcheniya 13.04.2024) (in Russian)

Faizi S., Rashid T., Sařabun W. [et al.]. (2018) Decision Making with Uncertainty Using Hesitant Fuzzy Sets. *International Journal of Fuzzy Systems*. Vol. 20. P. 93 - 103 (in English)

Wan S., Zhong L., Dong J.A (2020) New method for group decision making with hesitant fuzzy preference relations based on multiplicative consistency. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. Vol. 28, № 7. P. 1449 - 1463 (in English)

Vilkov V.B. (2017) Teoriya i praktika optimizacii reshenij na osnove nechetkih mnozhestv i nechetkoj logiki [Theory and practice of decision optimization based on fuzzy sets and fuzzy logic] : monografiya. V.B. Vilkov, A.K. CHernyh, A.V. Flegontov. - SPb. :Izd-vo RGPU im. A. I. Gercena, c.160 (in Russian)

Ahmed F., Kilic K. (2019) Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A performance analysis of various algorithms. *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 362. P. 110 - 128 (in English)

Katasyov A.S. (2019) Metody i algoritmy formirovaniya nechetkih modelej ocenki sostoyaniya ob'ektov v usloviyah neopredelennosti [Methods and algorithms for forming fuzzy models for assessing the state of objects under uncertainty]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. T. 22, № 3. c. 138 - 47 (in Russian)

Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Gabdullina E.R. (2019) Dynamic model of controlling the behavior of an economic agent using the mechanism of selfregulation of resource flows. Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019). - Published by Atlantis Press Advances in Intelligent Systems Research Vol. 166. - P. 240-245 (in English)

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 93–107

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.327>

УДК 004.942
МРПТИ 20.23.25:

©**K.M. Aldabergenova**¹ *, **M.A. Kantureyeva**¹, **A.B. Kassekeyeva**¹,
A. Akhmetova¹, **T.N. Esikova**², 2025.

¹Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan;

²Novosibirsk State University and Institute of Economics and Organization of
Industrial Production SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: kamar_sulu_9028@mail.ru

FEATURES AND PROSPECTS FOR THE USE OF DIGITAL PLATFORMS AND INTERNET MARKETING IN THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Aldabergenova Kamar – Master of Technical Sciences. Department of Information Systems, 8D06103-doctoral student, specialty “Information Systems”, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan, E-mail: kamar_sulu_9028@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5851-6786>;

Kantureyeva Mansiya – PhD, Department of Information technology, Faculty of information technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: ma_khantore@mail.ru; Scopus Author ID 57210912443. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5904-820X>;

Kassekeyeva Aislu Bisenovna – PhD, Department of Information technology, Faculty of information technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: aibike_7474@mail.ru; Scopus Author ID 57220008305. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7706-078X>;

Akhmetova Aidana Zhanatbekovna – PhD, senior lecturer, Eurasian National University named after L.N. Gumilev, Astana, Kazakhstan, ScopusAuthorID:57209981681, ResearcherID: 3 452618,; Email: akhmetova_azh@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3876-1089>;

Esikova Tatyana Nikolaevna - leading researcher at the Institute of Economics and Economics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Candidate of Economic Sciences, Novosibirsk State University and Institute of Economics and Organization of Industrial Production SB RAS. Novosibirsk, Russia, Email: t.n.yesikova@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3565-4248>.

Abstract. The article discusses the possibilities of developing Internet marketing and the purposes of its use in agriculture today. Currently, we cannot see the future of the industry, including agriculture, without the Internet; Due to economic growth and increased competition in all countries, information technologies are needed to quickly make decisions on the purchase and sale of high-quality products of agro-

industrial complexes. The tasks of these technologies are information processing at agricultural enterprises, calculating logistics costs, reducing material costs, quality control and timely delivery of products. Such technologies include digital applications and Internet marketing. The first direction of development of the agro-industrial complex in agriculture is digital trade. Internet marketing is an effective way to enter the economic development market. The use of Internet marketing in the agro-industrial complex helps manufacturers clarify the price and reduce the costs of production and sale of products. Internet marketing today performs communication functions and allows you to create opportunities for purchasing goods and making payments. The use of Internet marketing in agriculture helps the producer and consumer increase the production of agricultural products, which leads to economic growth. We studied the efficiency and effectiveness of using technology using a multi-agent platform to automate decision-making processes in agriculture, and presented initial case study results of the proposed solutions. The multi-agent platform provides methods for developing intelligent services for agriculture, where agents act as service, processing, and application agents.

Key words: Internet marketing, smart business, multi-agent, agent, agricultural products.

**К.М. Алдабергенова^{1*}, М.А. Кантуреева¹, А.Б. Касекеева¹,
А.Ж. Ахметова¹, Т.Н. Есикова², 2025.**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Астана, Қазақстан;

²Новосибирск мемлекеттік университеті және СО РАН экономика және өнеркәсіптік өндірісті ұйымдастыру институты, Новосибирск, Ресей.
E-mail: kamar_sulu_9028@mail.ru,

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ӨНДІРІСІН ДАМЫТУДА ЦИФРЛЫҚ ПЛАТФОРМАЛАР МЕН ИНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГТІ ҚОЛДАНУДЫҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ МЕН ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Алдабергенова Камар Мустафаевна - Техника ғылымдарының магистрі, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасы, 8D06103-«Ақпараттық жүйелер» мамандығының докторанты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: kamar_sulu_9028@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5851-6786>;

Касекеева Айслу Бисеновна - PhD, Ақпараттық жүйелер кафедрасы, Ақпараттық технологиялар факультеті, Л.Н. Гумилева атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан, Scopus Author ID 57220008305, ORCID: E-mail: aibike_7474@mail.ru<https://orcid.org/0000-0001-7706-078X>;

Ахметова Айдана Жанатбекқызы – PhD, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, аға оқытушы, Астана, Қазақстан, ScopusAuthorID: 57209981681, ResearcherID: 3 452618, Email: akhmetova_azh@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3876-1089>;

Есикова Татьяна Николаевна – Ресей ғылым академиясының Сібір бөлімшесінің Экономика және экономика институтының жетекші ғылыми қызметкері, экономика ғылымдарының кандидаты, Новосибирск мемлекеттік университеті және экономика және СО РАН өнеркәсіптік өндірісті ұйымдастыру институты, Новосибирск, Ресей, Email: T.N.YESIKOVA@GMAIL.COM, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3565-4248>

Аннотация. Мақалада интернет-маркетингті дамыту мүмкіндіктері және оны осы күнде ауыл шаруашылығында қолдану мақсаттары қарастырылады. Қазіргі уақытта кез келген саланың, оның ішінде ауыл шаруашылықтың болашағын интернетсіз көре алмаймыз. Барлық елдерде экономиканың өсуіне және бәсекелестіктің артуына байланысты агро-өнеркәсіп кешендерінің жоғары сапалы өнімдерін алу және алып-сату жұмыстарын жүргізу бойынша тез арада шешімдер қабылдау үшін ақпараттық технологиялар қажет. Бұл технологиялардың міндеттері ауыл шаруашылығындағы кәсіп орындардағы ақпараттарды өңдеу, логистикалық шығындарды есептеу, материалдық шығындарды азайту, өнімдердің сапалы әрі уақытылы жеткізілуін қадағалау болып табылады. Мұндай технологияларға цифрлық қосымшалар мен интернет-маркетингтер жатады.

Ауыл шаруашылығындағы агроөнеркәсіпті дамыту үшін жасалатын бірінші бағыт – бұл цифрлық сауда. Экономиканы дамытудың нарығына шығудың тиімді жолын Интернет-маркетинг арқылы жүзеге асырамыз. Ауыл шаруашылық кешенінде интернет-маркетингті қолдану ол өндірушілерге бағаны нақтылауға және өнімдерді өндіру мен өткізуге және өнімдерден келетін шығындарды азайтуға көмектеседі. Интернет-маркетинг бүгінде коммуникация функцияларын орындайды және тауарларды сатып алу және төлемдерді жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Ауыл шаруашылығында интернет-маркетингті қолдану өндіруші мен тұтынушыға ауыл шаруашылығы өнімдерінің өндірісін ұлғайтуға көмектеседі, бұл экономикалық өсуге әкеледі. Ауыл шаруашылығында шешім қабылдау процестерін автоматтандыру үшін мульти-агенттік платформаны қолданып технологияны қолдану тиімділігі мен өнімділігін зерттедік және сонымен қатар ұсынылған шешімдердің тематикалық зерттеулердің бастапқы нәтижелері көрсетілді. Мульти-агенттік платформа ауыл шаруашылығына интеллектуалды қызметтерді дамыту әдістерін ұсынып, мұнда агенттер қызмет көрсету, өңдеу және қолданбалы агенттер ретінде әрекет жасайды.

Түйін сөздер. Интернет-маркетинг, smart жүйе, мульти-агент, агент, агро-өнеркәсіп өнімдері.

**К.М. Алдабергенова^{1*}, М.А. Кантуреева¹, А.Б. Касекеева¹,
А.Ж. Ахметова¹, Т.Н. Есикова², 2025.**

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан;

²Новосибирский государственный университет и Институт экономики и
организации промышленного производства СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: kamar_sulu_9028@mail.ru

**ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ И ИНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГА В
РАЗВИТИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Алдабергенова Камар Мустафаевна – магистр технических наук, Кафедра «Информационные системы», 8D06103-докторант специальности «Информационные системы», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: kamar_sulu_9028@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5851-6786>;

Кантуреева Мансия – PhD, кафедра Информационные системы, факультет Информационных технологий, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: ma_khantore@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5904-820X>;

Ахметова Айдана Жанатбековна – PhD, старший преподаватель, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: akhmetova_azh@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3876-1089>;

Каскеева Айслу Бисеновна – PhD, кафедра Информационные системы, факультет Информационных технологий, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: aibike_7474@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7706-078X>;

Есикова Татьяна Николаевна – ведущий научный сотрудник ИЭОПП СО РАН, кандидат экономических наук, Новосибирский государственный университет и Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, Новосибирск, Россия, Email: t.n.yesikova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3565-4248>.

Аннотация. В статье рассматриваются возможности развития интернет-маркетинга и цели его использования в сельском хозяйстве. Сегодня невозможно представить будущее отрасли, в том числе сельского хозяйства, без интернета. В связи с ростом экономики и усилением конкуренции во всех странах необходимы информационные технологии для быстрого принятия решений о покупке и продаже высококачественной продукции агропромышленных комплексов. Задачами этих технологий являются обработка информации на сельскохозяйственных предприятиях, расчет затрат на логистику, снижение материальных затрат, контроль качества и своевременной доставки продукции. К таким технологиям относятся цифровые приложения и интернет-маркетинг.

Первое направление развития агропромышленного комплекса в сельском хозяйстве – цифровая торговля. Интернет-маркетинг – эффективный способ выхода на рынок экономического развития. Использование интернет-маркетинга в агропромышленном комплексе помогает производителям уточнить цену и снизить затраты на производство и реализацию продукции. Интернет-маркетинг сегодня выполняет функции коммуникации и позволяет создавать возможности для приобретения товаров и осуществления платежей. Использование интернет-маркетинга в сельском хозяйстве помогает производителю и потребителю увеличить производство сельскохозяйственной продукции, что приводит к экономическому росту. Мы изучили эффективность и продуктивность использования технологии с использованием мультиагентной платформы для автоматизации процессов принятия решений в сельском хозяйстве, а также представили первоначальные результаты тематических исследований предлагаемых решений. Мультиагентная платформа предоставляет методы разработки интеллектуальных сервисов для сельского хозяйства, где агенты действуют как агенты обслуживания, обработки и приложений.

Ключевые слова: интернет-маркетинг, умный бизнес, мультиагент, агент, сельскохозяйственная продукция.

Кіріспе. Қазақстан экономикасындағы ең ірі саланың бірі ол – ауылшаруашылық. Еліміздің тең жартысы ауылда орналасқан. Өзін-өзі қамтамасыз ету жағынан халықтың басым бөлігі ауыл тұрғындары болып саналады. Елімізде 7,5 миллион халықтың шамамен 2,5 миллион адамдары ауыл шаруашылығы қызметкерлері. Жер шарындағы кез келген елдің ауыл ауыл шаруашылығы бір бірімен тығыз байланысқан 2 саладан тұрады ол – егін және мал шаруашылығы. Әр елдің әлеуметтік-экономикалық жағдайы мен жұмыс күшінің көрсеткіштеріне, сондай-ақ табиғи жағдайларға байланысты осы екі сала бір бірімен комбинациясы өзгеріп отыруы мүмкін. Экономикасы өте жоғары елдерде (АҚШ, ГФР, Франция және т.б.) Ғылыми жетістіктер мен егіншілік тәжірибесін көбірек қолдану нәтижесінде мал шаруашылығы өнімдерінің бөлігі көп артса, кейбір дамушы елдерде климаттың қолайсыз болуына байланысты өсімдік шаруашылығын дамытуға мүмкіндіктердің жоқтығы да байқалады. Өсімдік және мал шаруашылығы өнеркәсіп саласымен тығыз байланысты. Бұл салалардың өзара байланысы агроөнеркәсіп кешені (АӨК) арқылы жүзеге асырылып отыр. Мұндай кешендер құрылымы мен қуаты бойынша әртүрлі және дамыған елдерде кең таралған. Ал дамушы елдерде олар жаңа толқынға ие болуда. Негізінен ауыл шаруашылығы климаттық жағдайларға тікелей тәуелді. Олар: ауа райына, жауын-шашынға, топырақ құнарлылығына тәуелді болып келеді. Соңғы кездері ғылым мен техниканың жақсы жетістіктері арқысында ауыл шаруашылығы өнімдерін тұтынушы елдерде климаттық жағдайларға тәуелділік айтарлықтай төмендеген екен. 20 ғасырдың 90-жылдарына дейін Қазақстан ауыл шаруашылығында Кеңестік шаруашылықтар мен ұжымдық шаруашылықтар құрылған. 1990 жылдан бастап мемлекеттің агроөнеркәсіп кешенінде көптеген әлеуметтік-экономикалық өзгерістер бола бастаған. Бұл екі сала – өсімдік шаруашылығы мен мал шаруашылығы ауыл шаруашылық өнімдерінің 53% және 47%-ын құрайды. Қазіргі таңда Қазақстанның ауыл шаруашылығы алты түрлі бағытта дамып жатыр:

- 1) дәнді дақылдар (бидай);
 - 2) интенсивті егіншілік (дәнді дақылдар (жүгері, арпа, гречка, т.с.с.); жеміс және бау-бақша;
 - 3) плантациялық шаруашылық (мақта, жеміс, бау бақша);
 - 4) экстенсивті жайылымдық мал шаруашылығы (етті бағыттағы ірі қара, қой);
 - 5) интенсивті мал шаруашылығы (сүтті және сүтті-етті ірі қара, ет бағытындағы ірі қара бордақылау, шошқа және құс өсіру);
 - 6) интенсивті егіншілік пен мал шаруашылығы (жем-шөп қорын дайындау).
- Мемлекеттің өз азаматтарының қалыпты өмір сүру жағдайын жақсартуға, оларды азық-түлікпен және басқа да ауыл шаруашылығы тауарларымен

қамтамасыз етуіне байланысты ауыл шаруашылығы өндірісін мемлекет тарапынан реттеулер жүргізу қажет. Әлемнің кез келген елінде ауыл шаруашылығы өндірісін мемлекеттік қадағалау тәжірибесі бар. ЕО елдерінде азық-түлік өнімдерінің экспорты мен импортын реттейтін, әлеуметтік сектордың дамуын қадағалайтын, азық-түлік өнімдерін өткізуге қаржыландырылған, өңдеу және қайта өңдеу жүйесін құрылымдайтын субсидиялар беретін ауыл шаруашылығы өнімдерін сатып алу жүйесі жұмыс істуде.

Интернет-маркетингтің жалпы мақсатты тұтынушыларды шақыру үшін онлайн әдістерді қолданатын стратегиялар мен әдістерді білдіреді. Интернет-маркетинг – бұл интернетті пайдалана отырып, өнімді немесе қызметті жылжыту процесі. Ауыл шаруашылығы өнімдерінің интернет-маркетингі ауылшаруашылық өнімдерін ауыл шаруашылығы өнімдерін өндірушілерден кез келген коммерциялық кәсіпорындарға немесе түпкілікті тұтынушыларға интернет арқылы өткізуді білдіреді.

Ауылшаруашылық өнімдерін онлайн сатуда көптеген кедергілер бар болса да, ауыл шаруашылығы өндірушілері де осы маркетингтікті дамытуға ұмтылуда. Тұтынушыларға, сондай-ақ ұйымдарға ауыл шаруашылығы өнімдерін сату фермерлер үшін таптырмас құрал. Интернет-бұл ғаламдық байланыс құралы ғана емес, сонымен қатар бизнесті жүргізудің тиімді құралы. Интернет-маркетинг – бұл Интернет желісінің технологиялары арқылы тауарларды немесе қызметтерді сатуға және сатуға бағытталған іс-шаралар кешені(Lili Liu, et al., 2021; Нурғалиева, т.б., 2022).

Интернет-маркетинг ауыл шаруашылығымен айналысатын фермерлер үшін өте тиімді, өйткені жақсы жағы өте көп және электронды жүйелер бүкіл әлем бойынша тұтынушыларға қызмет көрсетуде және тоқтаусыз жұмыс істейді. Ауыл шаруашылық – кез келген елдің үнемі дамып отыруы мен өмір сүруінің негізіне айналды. Осылайша, қазіргі уақытта цифрлық маркетингтің рөлі ауыл шаруашылығын дамытудағы басты басымдық болып табылады, ол ауыл шаруашылығымен айналысатын адамдардың мүмкіндіктерін кеңейтеді, кез келген ауыл шаруашылығы өнімдерін заңды және сапалы түрде сатып алуға көмектеседі, сонымен қатар әртүрлі салаларда жаңа тұтынушыларды табуға көмектеседі.

Материалдар мен әдістер. Интернет-маркетингті дамытудың негізгі әдістері. Нарыққа динамикалық әсер етуді және тиімді тауар қозғалысын қамтамасыз ету үшін маркетингтік процесс үздіксіз және параллельді түрде жүргізілуі қажет. Маркетингті басқару жүйесі үнемді, икемді, агробизнес саясатына, тұтынушылардың қажеттіліктеріне, қажеттіліктері мен сұраныстарына, нарық жағдайына, бәсекеге, бизнестің өзгеруіне, кәсіпкерлікке, өндіріс деңгейіне сәйкес болуы керек (Незамова, т.б., 2024; Головина, т.б., 2019).

Маркетингті басқару жүйесі өзін-өзі ұйымдастыра алу керек, өзін-өзі басқара алу керек, дегенмен де іс жүзінде сәтсіз жағдайлар болуы мүмкін

(мысалы, сапасыз өнім, басқа жоғары бәсекелестік) немесе жүйеде кейбір өнімдер ақпараты ескірген болуы мүмкін, жаңалары уақытында енгізілмей қалуы бұның бәрі төмен нәтижелер береді, сондықтан маркетинг жүйесінің жұмысын үнемі бақылауда ұстау керек. Интернеттің бізге берген жаңа мүмкіндіктердің арқасында заманауи ауыл шаруашылығында маркетингтік саясаттың бөлігі ретінде цифрлық маркетинг маңыздырақ болып келеді. Бұл, ең алдымен, интернеттің ауылдық жерлерге енуіне байланысты, мұнда тұтынушылар онлайн режимінде тауарлар мен ауылшаруашылық өнімдерін іздей алатын, жаңа тұтынушыларды тұрақты тұтынушыларға айналдыру мүмкіндігін арттырды.

Қазіргі қолданыстағы интернет-маркетингтің құрылымы:

E-mail-маркетинг – Электрондық пошта маркетингі брендті жылжытуды және электрондық пошта желілері арқылы тұтынушылармен өзара әрекеттесуді қамтитын веб-сайттар, әлеуметтік желілер және оны көптеген компаниялар пайдалана алады. Электрондық пошта – ең тиімді цифрлық жарнама жүйелерінің бірі. Электрондық пошта маркетингі қолдану үшін ең алдымен пайдаланушы веб-сайтқа кіреді, іздегенін тауып, сол сайтқа тіркеледі, тіркелген соң барлық өнімнің түрлерін көре алады және қажетті сұрақтарын почта желісі арқылы сатушыдан жауап алып, тапсырыс бере алады.

Marketing Automation (маркетингі автоматтандыру) – бірнеше арналар бойынша кросс-функционалды маркетингтік науқандарды автоматты түрде басқаратын технология.

Автоматтандыру мақсатты маркетингі жоспарлау мен қаржыландыруда, маркетингтік активтерді басқаруда, маркетингтік науқанды басқаруда, тұтынушыларды тартуда, өнімді сатуда, тұтынушылар деректерін өндеуде және маркетингтің басқа аспектілерінде орталық рөл атқарады. Компаниялар клиенттерге электрондық пошта, әлеуметтік желілер, мессенджерлер және т.б. арқылы автоматты хабарламалар арқылы сұқпат ұймдастыра алады. Маркетинг компанияның кірісін арттыру, шығындарды азайту және тиімділікті арттыру үшін маркетингі автоматтандыруды құру (Tao Zhai, et al., 2023; Chen, et al., 2023).

Social Media Marketing (Әлеуметтік медиа маркетингі) – барлық бизнес түрлері үшін тұрақты тұтынушыларға қол жеткізудің тиімді жолы. Мысалы, сатылымдағы өнімдері жайлы адамдар не айтатынына алаңдаған компания әлеуметтік желіде өз брендін бақылай алады. Әлеуметтік желілерде қалай жұмыс істеп жатқанын түсінгісі келетін кәсіпкерлер әлеуметтік медиа арқылы олардың қол жетімділігін, қатысуын және сатылымын қадағалай алады. Белгілі бір пайдаланушыларға қол жеткізгісі келетін компаниялар әдеттегі тұтынушылардың сипаттамаларына негізделген мақсатты жарнамаларды (Jianfeng Zou, et al., 2022; Савельева т.б., 2023) көрсетеді.

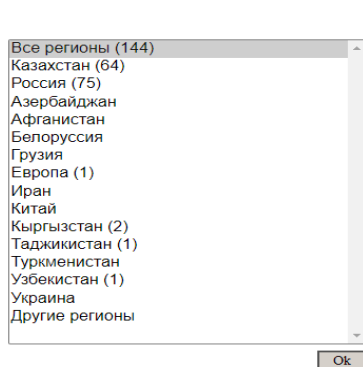
Әлеуметтік желілер ауылшаруашылық өндірушілері үшін танымалдылықты арттыратын ыңғайлы құралдардың бірі, оның көмегінсіз, жақын

мандағы қалаларда немесе елді мекендерге қажетті жарнаманы оңай тарата алмаймыз. Сондай-ақ тұтынушылармен тікелей әлеуметтік желі арқылы байланысып, олардың сұрақтарына жауап бере алмаймыз. Ауыл шаруашылығы өнімдері мен өндіріс құралдарын өндіруші, жеткізуші және тұтынушылардың мүдделерін біріктіретін Қазақстандағы жалғыз салалық жетекші порталы «Қазақстанның агроөнеркәсіп кешені» жұмыс істейді. **Agroprom.kz** -бұл азық-түлік өндірісі мен сатудың барлық циклдарымен және агробизнесінің байланысты салаларымен байланысты бизнес-аудиторияның шоғырлануы (Costa, et al., 2021; Васильева т.б., 2024). Осы порталды Кәсіпорындар каталогы бар, онда кәсіпорындар туралы толық мәлімет алуға болады. Жалғыз Қазақстандық кәсіпорындар емес, ТМД елдері бойынша ауылшаруашылығымен айналысатын ірі кәсіпорындар туралы мәліметтерді алуға болады. Осы порталдың мәліметіне сүйеніп, мынадай мәліметтерді алуға болады:

Товар	Цена USD/т	Кол-во	Дата	Продавец	Регион
Зерносушильный агрегат Пшеница тв. сорто	Договорная	200 т	20.09.2023	ИП Асеткалиев	Казакстан, Восточно-казакстанская область
Пшеница 2-й класс	242,58	10000 т	21.06.2023	ТОО «КазExport 2020»	Казакстан, Павлодарская область
Продовольственные 3 класса хлебопекарня 30 2-й класс	266,83		30.03.2023	Крестьянское хозяйство Дастан	Казакстан, Акмолинская область
Пшеница 2-ий 4-ий класс 4-й класс	274,11	500 т	26.03.2023	ТОО ПартнерАгро	Казакстан, Акмолинская область
Пшеница мягкая 3 класс 2-й класс	310,00		06.01.2023	Алты EXPORT	Казакстан, Восточно-казакстанская область
Пшеница мягкая яровая 2-й класс	274,11	1000 т	17.10.2022	КХ «ЕСЕНТАЙ»	Казакстан, Акмолинская область
Пшеница мягкая 3 класс 2-й класс	280,00	850 т	23.09.2022	КХ БЕК	Казакстан, Костанайская область
Пшеница 3 класс 2-й класс	280,00	1000 т	18.09.2022	ТОО «НПЦ ВЕК»	Казакстан, Костанайская область
Пшеница Пшеница тв. сорто	Договорная	150 т	21.08.2022	Кх Мерей	Казакстан, Восточно-казакстанская область
Продовольственные 2-й класс	Договорная	213 т	13.06.2022	ТОО «Алшар-агро»	Казакстан, Актюбинская область

1-сурет. Қазақстандық кәсіпкерлерге арналған сауда алаңы.

Бірінші суретте қазақстандық кәсіпкерлердің бидай өнімдерін сататын алаңы көрсетілген. Мұнда бағаны сұрыптауға болады, яғни ол АҚШ долларымен, еуромен, ресейлік рубльмен және қазақстандық теңгемен көрсетілген. Мұнда сауда аймағында 144 аймақ көрсетілді. (Сурет 2).

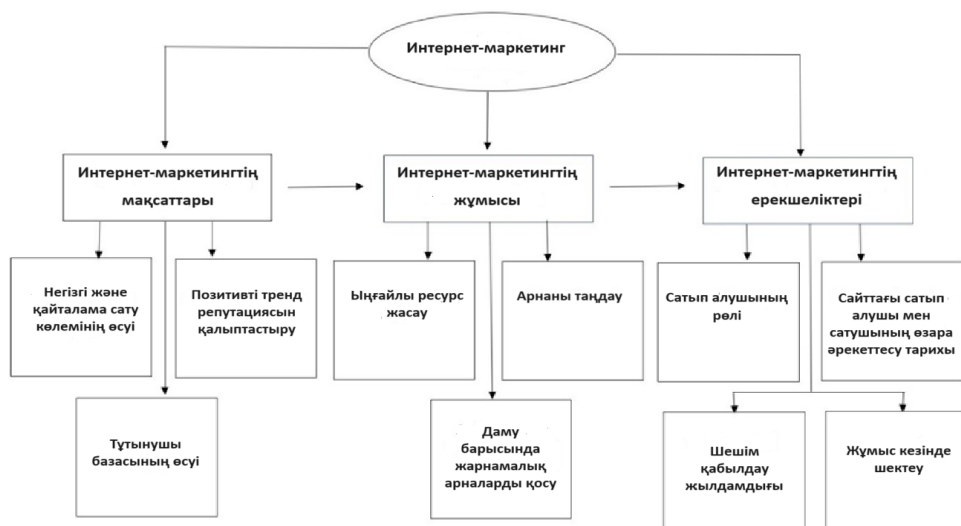


2-сурет. Кәсіпорындар елі бойынша

2 суретте бидай өнімдерін сатуға шығаратын әр елдегі кәсіпорындардың саны көрсетілген. Мұнда көріп тұрғанымыздай соңғы уақыттағы дағдарыстарға қарамастан жыл сайын сауда жүйелері дамуы артуда. Бұл дегеніміз ақпараттық технологиялардың арқасында интернеттің көмегімен Интернет-маркетингтің даму перспективасының пайда болуын байқатады (Krishnan, et al., 2020; Тусупов, т.б., 2024).

Қазір бизнесті дамытуда веб-сайт жасап, оны әдемі және жарқын суреттермен толықтыру жеткіліксіз. Көптеген бәсекелес сатушылар арасында тұтынушылардың өз өнімдеріне деген қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін көп уақыт пен ресурстар қажет. Дегенмен, бұл жай ғана жарнама трафикке кепілдік бере алмайды. Интернет-маркетинг іздеу жүйелерінің дамуымен кең таралды (Lin, et al., 2020). Бүгінгі күні олар бір-бірімен тығыз байланысты, дегенмен олардағы жарнама іздеу жүйелерінің талаптарына бағытталған.

Интернет-маркетингтің негізгі мақсаты – мақсатты аудитория өкілдерінің қажеттіліктерін қанағаттандыру арқылы сатылымды арттыру. Ол төмендегі сызба бойынша іске асыруға болады. (Сурет 3)



3-сурет. Интернет маркетингтің іске асырылуы

Интернеттегі жарнамалар жақсы дамып одан ары өзектілігі арта түспек. Өйткені онлайн түрде сауда саттық жасау көлемі жылдан жылға артуда. Маркетинг басқа салалармен өз ара байланысып күннен күнге өзгеруде және күннен күнге әр түрлі функцияларды қосуда. Бірақ жалпы көздеген мақсат – жаңа тұтынушыларды шақыру және қаржылық пайданы арттыру болып табылады

Нәтиже мен талқылау. Сандық платформа және цифрлы қызметтердің жүйесі. Заманауи электрондық коммерция маркетингтік платформаларында қолданылатын өнімдердің әртүрлі түрлері бар. Интернетте көптеген

ауылшаруашылық өнімдеріне маркетингтік платформалар бар, яғни ол ауылшаруашылық өнімдерінің маркетингін арттырады (Орлова, т.б., 2021; Балабанова, т.б., 2024). Электрондық коммерцияда ауылшаруашылық маркетингінің деңгейін көтеру үшін ауылшаруашылық маркетингінің дұрыс жүйесін құру қажет. Дәл осылай, жаңа маркетингті дамыту барысында тенденцияларға сәйкес ауылшаруашылық өнімдерінің электронды сауданы жеңілдете аламыз. Жалпы алғанда, ауыл шаруашылығындағы электронды коммерция – бұл саланы автоматтандыруға мүмкіндік беретін бағдарламалық-аппараттық шешімдердің жүйесі болып табылады, демек бұл жүйені енгізетін болсақ саланың негізгі көрсеткіштері: барлық өндірістік процестер қаржылық сипатқа ие болады, өнімнің сапасы мен саны артады және өндіріс өсуі жағынан барынша тиімді болады. Енді бұл жүйені қалай шешетінімізді қарастырайық.

Бұл жүйе ашық білімге негізделген, өзін-өзі ұйымдастыруға қабілетті және күрделі жүйелердің қасиеттерін көрсетеді; таратылған және бейімделген интеллектуалды қызмет көрсету жүйесі болып табылады және интеллектуалды қызметтерді ұсынатын көп агенттік технологияларға бағытталған жасанды интеллект жүйесі.

Осы интеллектуалды қызметтердің әрқайсысы кез келген оқиғаларға жауап беруге, шешім қабылдауға және олардың басқа агенттермен өзара әрекеттесуін ұйымдастыруға қабілетті бағдарламалық агенттерден тұрады.

Шешім қабылдау функциясы келесі қызмет агенттерін қамтиды:

1. Бақылау агенттері – өнімнің сапасын (ауруларын, құрт-жәндіктерін белгілерін) тануға арналған спутниктер/ ұшқышсыз ұшу аппараттарына негізделген мультиагенттік жүйе;

2. Өріс агенттері – егістік алқабтарын бөлу, оңтайландыру және егістіктерді басқаруға арналған мультиагенттік жүйе;

3. Машина агенттері – сұраныс бойынша қызметтерді және өнімді жеткізуді қамтамасыз ету үшін машиналар тобын басқаруға арналған мультиагенттік жүйе;

4. Өнімділік агенті (Агент урожайность) – өндірістік алқабынан барлық бірдей дақылдардан алынған өнімнің жалпы көлемі;

5. Өнім сапасының агенті (Агент качества продукции) – Өнімнің сапасына жауап беру. Кез келген қауіпті болдырмау үшін өндірушілер мен сатушылардан үлгілер мен сертификаттар алған дұрыс.

6. Өнімді жеткізу агенті (Агент доставка товара) – Өнімді уақытылы әрі сапалы өнімді жеткізу. Ұзақ уақыт бойы нарықта жоғары сапалы жұмыстарды орындайтын жеткізуші компаниялардың тәжірибелі курьерлері бар сенімді компаниялармен келісім жасасу арқылы жеткізудің кешігуі мен шығындар қаупін азайтуға болады.

Сервистік агенттер тапсырыстарды, технологиялық процестер мен өнімдерді және ауыл шаруашылығы бизнес объектілерін қамтамасыз ететін көп деңгейлі агенттердің арнайы мультиагенттік жүйесі арқылы жасалған

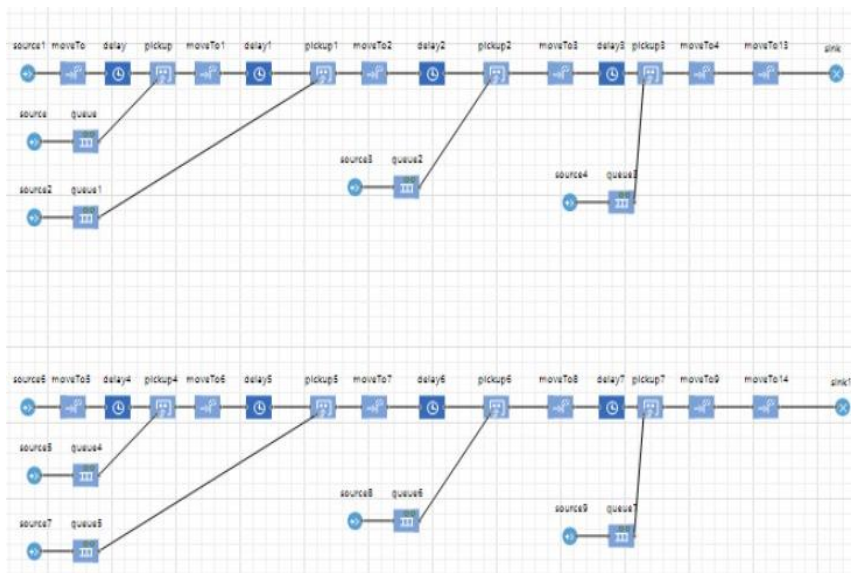
жөн. Бүгінгі таңда цифрлық платформалар мен смарт қызметтер өндірушілер мен ауыл шаруашылығы кәсіпорындарына проблемалық жағдайларды түсіну және ресурстарды басқару арқылы күнделікті жұмысын жақсартуға көмектесу үшін жасалған.



4-сурет . Агенттік платформада жоспарлау негіздері

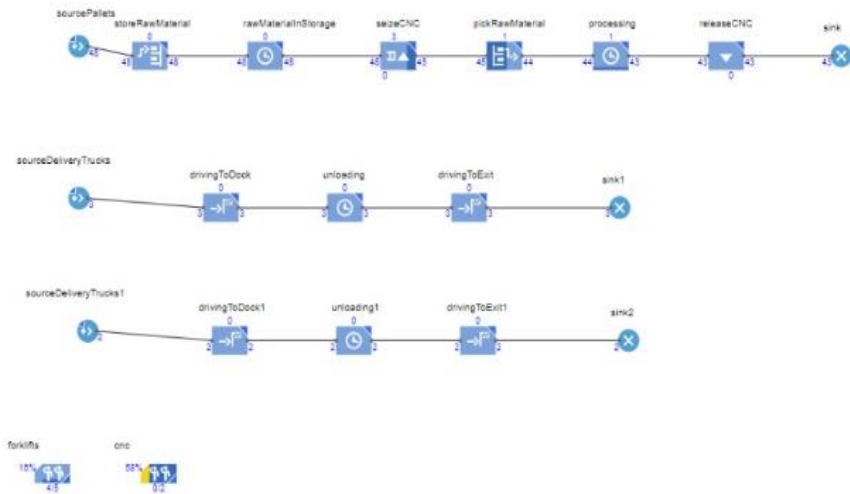
Осы агент платформасының жүйесін пайдаланып зерттеу жүргізу арқылы біз өнімді өндіру, сату және жеткізу кезінде проблемаларды анықтап, болжам жасай аламыз. (4 суретте). Қандайда проблемаларды шешу әрекеттерін білім қорын қолдану арқылы жүзеге асыруға болады.

Мұнда ұсынылған AnyLogic модельдеу әдістерін пайдалана отырып, динамикалық ынтымақтастық үлгілерін қарастырдық.



5-сурет. Өнімділік агенті

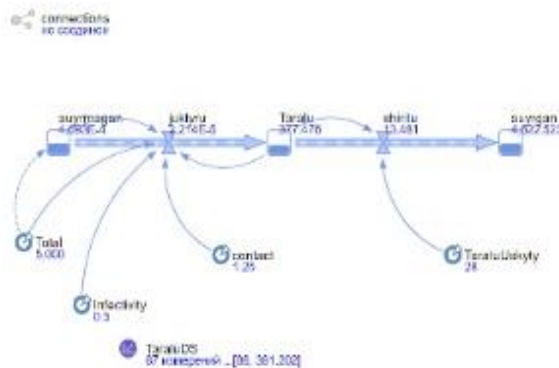
Өнімділік агентінің моделі бұрынғы өнімдерді және басқада әсер ететін факторларды, жалпы өнімділікті ескеріп, егістіктің жоғарғы деңгейдегі өнімділігіне қол жеткізу мақсатында ең тиімді дақылдарын таңдауын анықтау.

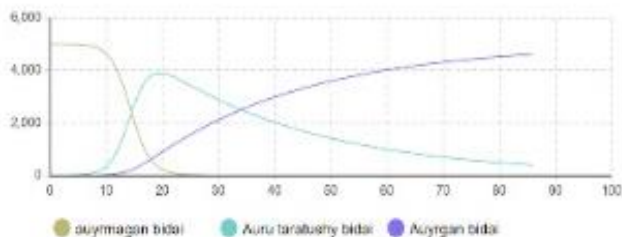


6-сурет . Өнімді жеткізу агенті

Өнімді жеткізу агентінің моделі ол бұл модельде менеджерлер мен логистердің маңызды рөлі жақсы ұйымдастырылған және пайдалы бағыттарды құрумен байланысты. Олардың міндеттеріне тапсырыстарды қабылдау және маршруттарды жасау кіреді.

Маршруттау – бұл тұрақты тұтынушылары бар немесе тіркелген тапсырыс көлемі бар салыстырмалы түрде үлкен қызметтерге тән қызмет көрсету талабы.





7-сурет. Өнім сапасын бақылау агенті

Өнім сапасының агентінің моделі – әрбір өнім мен зауыт бойынша технологиялық операцияларды анықтайды, бидай дәнінің сапасының негізгі көрсеткіштерін бақылайды, сонымен қатар өнімнің жалпы массасының сапасына және барлық стандарттарға талдау жасайды.

Қорытынды

Болашақта біз бұл модельді техникалық-экономикалық көрсеткіштерді қосып күрделендіреміз, оларға: жеткізу кезеңі жатады. Жеткізу кезеңінде көлікке кететін жанар-жағар май шығынын есептейміз, егін жинау кезеңіндегі уақытты есептейміз, механиктер мен жүргізушілердің жалақысы мен шығындарын қарастырамыз және т.б. Электронды маркетинг ауыл шаруашылық кәсіпкерлеріне өз өнімдерін белгілі бір елде және шетелде еркін ұсынуға және сатуға; онлайн түрде кеңседен шықпай ақ тұтынушыларды көбейтуге және аз уақыт ішінде көп күш пен ресурс жұмасамай ақ өзінің тұрақты клиенттерін жинай алуға; қыс жазы демей ауыл шаруашылығы өндірісін тиімді жоспарлауға айрықша мүмкіндік көрсетті. Тұрақты және жоғары деңгейдегі бәсекелестікті ұстап тұру үшін кәсіби түрде қызмет көрсете білу керек.

Жұмысты жоспарлау және оңтайландыру кезінде кез келген оқиға динамикасы және белгісіздік жағдайлар туындаған кезде шешімдер қабылдау үшін мультиагентті технологияны қолдану ең тиімдісі.

Біздің алдағы жұмысымыз – нақты ауыл шаруашылығына арналған білім базасын енгізу және дамыту.

Әдебиеттер

Lili Liu, Fan Zhang, Hengyu Li and Conggao Wen, «Research on the Community Group Buying Marketing Model of Fresh Agricultural Products in Jilin Province from the Perspective of Internet Marketing and Retail», IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 769 (2021) 022054, doi:10.1088/1755-1315/769/2/022054 (in Eng.)

Тусупов Ж., Есенова М., Әбдікерімова Г., Мурзабекова Г., Айтимова У. Дақылдардың зиянкестері мен ауруларын тексеруге арналған формальды тұжырымдамаларды машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы талдау, IEEE Access мақаласы, 2024, 12, стра2ницы, Open Access, 19910 doi: 10.1109/ACCESS.2024.3361046

Tao Zhai, Jiabin Liu, Daqing Wang, «Optimization path of agricultural products marketing channel based on innovative industrial chain» Economic Change and Restructuring (2023) 56:3949–3977 <https://doi.org/10.1007/s10644-023-09495-8>(in Eng.)

Jianfeng Zou and Hui Li, «Precise Marketing of E-Commerce Products Based on KNN Algorithm», Computational Intelligence and Neuroscience Volume 2022, Article ID 4966439, 12 pages <https://doi.org/10.1155/2022/4966439> (in Eng.)

Chen, Xiaozhong, Chen, Rongli, Yang, Cairu, «Research and design of fresh agricultural product distribution service model and framework using IoT technology», Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03447-8>(in Eng.)

Головина Т.А., Полянин А.В., Авдеева И.Л. Развитие цифровых платформ как фактор конкурентоспособности современных экономических систе. Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика» = Perm University Herald. Economy. 2019. Том 14. № 4. С. 551–564. doi: 10.17072/1994-9960-2019-4-551-564

Krishnan J, Shashank S, Balasubramanya H, «Robotics, IoT, and AI in the automation of agricultural industry: a review». In: 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology conference (B-HTC). <https://doi.org/10.1109/B-HTC50970.2020.9297856> (in Eng.)

Савельева, Е. А. Цифровые трудовые плат формы : новые формы организации и регулирования труда: монография / Е. А. Савельева. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 213 с. – (Научная мысль). – DOI 10.12737/1818511. – ISBN 978-5-16-017186-9. – Текст : электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/>.

Е.В. Васильевой, Б.Б. Славина. Цифровые платформы и экосистемы в го сударственном управлении: монография – Москва : ИНФРА-М, 2024. – 204 с. – (Научная мысль). – DOI 10.12737/2021353. – ISBN 978-5-16-018537-8. – Текст : электронный. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/2021353>.

А. Нургалиева, А. Кулембаева, З. Башиева, Г. Мукина, Б. Куанткан, К. Елубаева, Анализ рынка интеллектуальной собственности в Республике Казахстан, «Вестник НАН РК»: № 2 (2022).

Costa GB, Damiani JS, Marchesan G et al, «A multi-agent approach to distribution system fault section estimation in smart grid environment». Electr Power Syst Res 204:107658. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107658> (in Eng.)

Незамова О.А., Шапорова З.Е., Оленцова Ю.А. Развитие маркетинга в условиях цифровизации. *E-Management*. 2024;7(3):61-69. <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2024-7-3-61-69>

Орлова, Л. С. Тенденции развития и внедрения цифровых платформ[Цифрлық платформаларды әзірлеу және енгізу тенденциялары]. Л.С. Орлова. Креативная экономика. – 2021. – Т. 15, № 1. – С. 35-44. – DOI 10.18334/ce.15.1.111531

Балабанова Ю.П., Лукьянова А.В., Шацкая Е.Ю. Инновации и управление в современной цифровой экономике: предложения и перспективы. Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2024. – № 4-3. – С. 356-360; URL: <https://vael.ru/ru/article/view?id=3430> (дата обращения: 06.03.2025).

W. Lin, X. Huang, V. Wang et al., «Blockchain technology in current agricultural systems: from techniques to applications», IEEE Access, vol. 8, pp. 143920–143937, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3014522 (in Eng.)

References

Lili Liu, Fan Zhang, Hengyu Li and Conggao Wen, «Research on the Community Group Buying Marketing Model of Fresh Agricultural Products in Jilin Province from the Perspective of Internet Marketing and Retail», IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 769 (2021) 022054, doi:10.1088/1755-1315/769/2/022054 (in Eng.)

Tussupov J., Yessenova M., Abdikerimova G., Murzabekova G., Aitimova, U. Daqıldardıñ ziyankesteri men aurularyñ tekseruge arnalğan formal'dy tyžhyrymdamalardy mashinaluқ оқуtı әдістерin koldanu arkyly taldau [Analysis of Formal Concepts for Verification of Pests and Diseases of Crops Using Machine Learning Methods] Article IEEE Access, 2024, 12, страницы 19902–19910, Gold Open Access, doi:10.1109/ACCESS.2024.3361046 (in Kaz.)

Tao Zhai, Jiabin Liu, Daqing Wang, «Optimization path of agricultural products marketing channel based on innovative industrial chain» Economic Change and Restructuring (2023) 56:3949–3977 <https://doi.org/10.1007/s10644-023-09495-8>(in Eng.)

Jianfeng Zou and Hui Li, «Precise Marketing of E-Commerce Products Based on KNN Algorithm», *Computational Intelligence and Neuroscience* Volume 2022, Article ID 4966439, 12 pages <https://doi.org/10.1155/2022/4966439> (in Eng.)

Chen, Xiaozhong, Chen, Rongli, Yang, Cairu, «Research and design of fresh agricultural product distribution service model and framework using IoT technology», *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03447-8> (in Eng.)

Golovina T.A., Polyaniin A.V., Avdeyeva I.L. Razvitiye tsifrovyykh platform kak faktor konkurentosposobnosti sovremennykh ekonomicheskikh sistem [Development of digital platforms as a factor in the competitiveness of modern economic systems]. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser. «Ekonomika»*. Vestnik Permskogo universiteta. *Ekonomiya*. 2019. T. 14. № 4. S. 551–564. DOI: 10.17072/1994-9960-2019-4-551-564 (in Russ.)

Krishnan J, Shashank S, Balasubramanya H, «Robotics, IoT, and AI in the automation of agricultural industry: a review». In: 2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology conference (B-HTC). <https://doi.org/10.1109/B-HTC50970.2020.9297856> (in Eng.)

Saveleyeva Ye. A. Tsifrovyye trudovyye platformy: novyye formy organizatsii i regulirovaniya truda [Digital Labor Platforms: new Forms of Organization and Regulation of Labor]: monografiya. E.A. Saveleva. – M.: INFRA-M, 2023. – 213 s. – (Nauchnaya mysl'). – DOI 10.12737/1818511. – ISBN 978-5-16-017186-9. – Tekst: elektronnyy. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/>. (in Russ.)

E.V. Vasilyeva, B.B. Slava Bogu. Tsifrovyye platformy i ekosistemy v gosudarstvennom upravlenii [Digital platforms and ecosystems in public administration]: monografiya – M.: INFRA-M, 2024. – 204 s. – (Nauchnaya mysl'). – DOI 10.12737/2021353. – ISBN 978-5-16-018537-8. – Tekst: elektronnyy. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/2021353>. (in Russ.)

A. Nurgaliyeva, A. Kulembayeva, Z. Bashiyeva, G. Mukina, B. Kuantkan, K. Yelubayeva, Analiz rynka intellektual'noy sobstvennosti v Respublike Kazakhstan, «Vestnik Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan»: № 2 (2022): Vestnik Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan (in Russ.)

Costa GB, Damiani JS, Marchesan G et al, «A multi-agent approach to distribution system fault section estimation in smart grid environment». *Electr Power Syst Res* 204:107658. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107658> (in Eng.)

Nezamova O.A., Shaporova Z.Ye., Olentsova YU.A. Razvitiye marketinga v usloviyakh tsifrovizatsii. Elektronnoye upravleniye. [Marketing development in the context of digitalization. E-Management.] 2024;7(3):61-69. <https://doi.org/10.26425/2658-3445-2024-7-3-61-69> (in Russ.)

Orlova, L. S. Tendentsii razvitiya i vnedreniya tsifrovyykh platform [Trends in the development and implementation of digital platforms]. *L.S. Orlova. Kreativnaya ekonomika*. – 2021. – Tom. 15, № 1. – S. 35-44. – DOI 10.18334/ce.15.1.111531 (in Russ.)

Balabanova YU.P., Luk'yanova A.V., Shatskaya Ye.YU. Innovatsii i upravleniye v sovremennoy tsifrovoy ekonomike: predlozheniya i perspektivy [Innovation and Management in the Modern Digital Economy: Proposals and Prospects]. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava*. – 2024. – № 4-3. – S. 356-360; URL: <https://vael.ru/ru/article/view?id=3430> (in Russ.)

W. Lin, X. Huang, V. Wang et al., «Blockchain technology in current agricultural systems: from techniques to applications», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 143920–143937, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3014522 (in Eng.)

**A. Yerimbetova^{1,3}, M. Sambetbayeva^{1,2}, E. Daiyrbayeva^{1,3}, B. Sakenov¹,
U. Berzhanova^{1,4}, 2025.**

¹Institute of Information and Computational Technologies of the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan;

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan;

⁴Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: nurbekkyzy_e@mail.ru

CREATING A MODEL FOR RECOGNIZING THE KAZAKH SIGN LANGUAGE USING THE DEEP LEARNING METHOD

Yerimbetova Aigerim – PhD, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Leading Researcher of Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan; Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, aigerian8888@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-1513>;

Sambetbayeva Madina – PhD, Associate Professor at L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; Leading Researcher of Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan, madina_jgtu@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-1614>;

Daiyrbayeva Elmira – Master's degree, researcher of Institute of Information and Computing Technologies, Almaty, Kazakhstan; senior lecturer of Software Engineering department of Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, nurbekkyzy_e@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4255-5456>;

Sakenov Bakzhan – Master's degree in computer science, software engineer Institute of Information and Computing Technologies, Almaty, Kazakhstan, sbakzhan22@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9849-6176>;

Berzhanova Ulmeken – doctoral student of the 1st year of specialty 8D06101-Information systems Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; Junior researcher of the Institute of Information and computing technologies of the Ministry of education and Science Of The Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, berzhanovaulmekenn@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-2467-5721>.

Abstract: The main goal of the research is to analyze the effectiveness of deep neural networks for recognizing Kazakh sign language. This study is aimed at improving methods for recognizing Kazakh sign language using modern technologies.

The objective of the research is to process gestures and images representing the 42 letters of Kazakh sign language and classify them accurately using convolutional neural networks (CNN). The developed model is capable of recognizing hand gestures in real-time through a camera. Gesture recognition systems in the field of artificial intelligence are still in the active research and development stage, so this model is considered an important step in this direction. In particular, the development of a system that aligns with the characteristics of the Kazakh language helps preserve national cultural heritage. Additionally, this technology can be used to enhance communication opportunities for people with hearing and speech impairments. The results of the study revealed limitations in the current configuration of the model, including low levels of accuracy and completeness for many classes. This may be due to data imbalance, suboptimal model architecture, and insufficient tuning of the training parameters. To address these issues, it is important to use data balancing methods, improve the model architecture, and enhance data quality. Furthermore, collecting additional data, using data augmentation methods, and optimizing neural network parameters are crucial areas of the research. During the study, a dataset for recognizing the features of Kazakh sign language gestures was created, based on which the model was trained.

Key words: artificial intelligence, deep learning, Kazakh sign language recognition, Dactyl recognition, convolutional neural networks.

**А.С. Еримбетова^{1,3}, М.А. Сәмбетбаева^{1,2}, Э.Н. Дайырбаева^{1,3},
Б.Е. Сәкенов¹, У.Г. Бержанова^{1,4}, 2025.**

¹Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы, Қазақстан;

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

³ Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Алматы, Қазақстан;

⁴Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: nurbekkyzy_e@mail.ru

ТЕРЕҢ ОҚЫТУ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ҚАЗАҚ ҮМ ТІЛІН ТАНУҒА АРНАЛҒАН МОДЕЛЬ ҚҰРУ

Еримбетова Айгерим Сембековна – PhD, техн. ғылым. Кандидаты, қауымдастырылған профессор, ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының жетекші ғылыми қызметкері, Қазақстан, Алматы; Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан, aigerian8888@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-1513>;

Сәмбетбаева Мадина Аралбаевна – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің доценті, Қазақстан, Астана; ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының жетекші ғылыми қызметкері, Қазақстан, Алматы; madina_jgtu@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-1614>;

Дайырбаева Эльмира Нурбекқызы – магистр, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университетінің бағдарламалық инженерия кафедрасының аға оқытушысы, Қазақстан, Алматы; ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының

ғылыми қызметкері, Қазақстан, Алматы, Шевченко 28; nurbekkyzy_e@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4255-5456>;

Сакенов Бакжан Ерланұлы – магистр, ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының инженер-программисті, Қазақстан, Алматы; sbakzhan22@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9849-6176>;

Бержанова Улмекен Габитқызы – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің 8D06101 – Ақпараттық жүйелер мамандығының 1-курс докторанты; ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институтының кіші ғылыми қызметкері, Қазақстан, Алматы, berzhanovaulmekenn@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-2467-5721>.

Аннотация. Қазақ ым тілін тану үшін терең нейрондық желілердің тиімділігін талдау зерттеудің басты мақсаты болып табылады. Бұл зерттеу қазақ ым тілін заманауи технологияларды қолдану арқылы тану әдістерін жетілдіруге бағытталған. Зерттеудің міндеті – қазақ ым тілінің 42 әрпін білдіретін ым-ишара қимылдар мен кескіндерді өңдеу және оларды дәл жіктеу үшін конволюциялық нейрондық желілерді (CNN) қолдану. Құрылған модель нақты уақыт режимінде камера арқылы қол қимылдарын тануға қабілетті.

Жасанды интеллект саласындағы қол қимылдарын танудың кешенді жүйесі әлі де белсенді зерттелу және әзірлеу кезеңінде болғандықтан, бұл модель осы бағыттағы маңызды қадам ретінде қарастырылуда. Әсіресе, қазақ тілінің ерекшеліктеріне сәйкес келетін жүйені әзірлеу – ұлттық мәдени мұраны сақтауға ықпал етеді. Бұдан бөлек, бұл технологияны есту және сөйлеу қабілеті нашар адамдардың қарым-қатынас мүмкіндіктерін кеңейту үшін пайдалануға болады. Зерттеу нәтижелері модельдің ағымдағы конфигурациясындағы шектеулерді көрсетті, соның ішінде көптеген сыныптар үшін дәлдік пен толықтық деңгейінің төмен болуы. Мұның себебі деректер жиынының теңгерімсіздігі, таңдалған модель архитектурасының оңтайлы болмауы, сондай-ақ оқыту параметрлерінің жеткіліксіз реттелуінен болуы мүмкін.

Бұл қиындықтарды шешу үшін деректерді теңестіру әдістерін қолдану, модель архитектурасын жетілдіру және деректер сапасын арттыру маңызды. Сонымен қатар, қосымша деректерді жинау, деректерді ұлғайту әдістерін қолдану және нейрондық желінің параметрлерін оңтайландыру зерттеудің маңызды бағыттары болып табылады. Зерттеу барысында қазақ ым тілінің қол қимылдары ерекшеліктерін тануға арналған деректер жиыны құрылып, оның негізінде модельді оқыту жүргізілді.

Түйін сөздер: жасанды интеллект, терең оқыту, қазақ ым тілін тану, дактильді тану, конволюциялық нейрондық желілер.

Алғыс: Бұл зерттеу Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (Грант № BR24992875).

**А.С. Еримбетова^{1,3}, М.А. Самбетбаева^{1,2}, Э.Н. Дайырбаева^{1,3},
Б.Е. Сакенов¹, У.Г. Бержанова^{1,4}, 2025.**

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

²Евразийский университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан;

³Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан;

⁴Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
E-mail: nurbekkyzy_e@mail.ru

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ КАЗАХСКОГО ЖЕСТОВОГО ЯЗЫКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Еримбетова Айгерим Сембековна – PhD, к.т.н., ассистент профессор, ведущий научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК, Алматы, Казахстан, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: aigerian8888@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-1513>;

Самбетбаева Мадина Аралбаевна – PhD, доцент Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, Астана, ведущий научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий Комитета науки Министерства образования и науки РК, Казахстан, Алматы, E-mail: madina_jgtu@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9358-1614>;

Дайырбаева Эльмира Нурбеккызы – магистр, старший преподаватель кафедры Программной инженерии Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан, научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий Комитета науки Министерства образования и науки РК, Алматы, Казахстан, E-mail: nurbekkyzy_e@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4255-5456>;

Сакенов Бакжан Ерланулы – магистр, инженер-программист Института информационных и вычислительных технологий Комитета науки Министерства образования и науки РК, Алматы, Казахстан, E-mail: sbakzhan22@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9849-6176>;

Бержанова Улмекен Габиткызы – докторант 1-го курса по специальности 8D06101 – Информационные системы Казахского национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан, младший научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий Комитета науки Министерства образования и науки РК, Алматы, Казахстан, E-mail: berzhanovaulmekenn@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-2467-5721>.

Аннотация. Основной целью исследования является анализ эффективности глубоких нейронных сетей для распознавания казахского жестового языка. Это исследование направлено на совершенствование методов распознавания казахского жестового языка с использованием современных технологий. Задача исследования — обработка жестов и изображений, представляющих 42 буквы казахского жестового языка, и их точная классификация с использованием сверточных нейронных сетей (CNN). Созданная модель способна распознавать жесты рук в реальном времени с помощью камеры.

Сложные системы распознавания жестов в области искусственного

интеллекта все еще находятся на стадии активных исследований и разработки, поэтому эта модель рассматривается как важный шаг в данном направлении. Особенно разработка системы, соответствующей особенностям казахского языка, способствует сохранению национального культурного наследия. Кроме того, эта технология может быть использована для расширения возможностей общения людей с ограниченными возможностями слуха и речи.

Результаты исследования показали ограничения текущей конфигурации модели, включая низкий уровень точности и полноты для множества классов. Причиной этого могут быть дисбаланс в данных, неоптимальная архитектура выбранной модели, а также недостаточная настройка параметров обучения. Для решения этих проблем важно использовать методы балансировки данных, улучшить архитектуру модели и повысить качество данных. Кроме того, сбор дополнительных данных, использование методов увеличения данных и оптимизация параметров нейронной сети являются важными направлениями исследования. В ходе исследования была собрана база данных для распознавания особенностей жестов казахского жестового языка, на основе которой проводилось обучение модели.

Ключевые слова: искусственный интеллект, глубокое обучение, распознавание казахского жестового языка, распознавание дактиля, сверточные нейронные сети.

Кіріспе. Ым-ишараны тану – есту қабілеті бұзылған адамдар үшін коммуникациялық технологияларды жетілдіруге бағытталған зерттеудің маңызды бағыты болып табылады, себебі бұл технологиялар оларды қоғаммен байланыста болуға, ақпарат алмасуға және әлеуметтік интеграцияны арттыруға мүмкіндік береді (Амангелді, 2020). Сурдоаударма кимылдарын тиімді тану бірнеше маңызды мәселелерді, соның ішінде деректердің теңгерімсіздігі, әртүрлі жағдайларда жоғары дәлдікті қамтамасыз ету қажеттілігі және жүйенің сенімділігін арттыру қажеттілігін туындатады. Бұл факторлар зерттеуді одан әрі тереңдетуді және жаңа шешімдерді іздеуді талап етеді. Бұл мәселелерді шешу инклюзивті коммуникациялық шешімдерді дамытуға және саңырау мен нашар еститін қауымдастықтардың өзара әрекеттесу сапасын арттыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, олардың қоғамда толыққанды интеграциялануына және әлеуметтік қатынастарын нығайтуға оң әсер етеді (Амангелді, т.б., 2020).

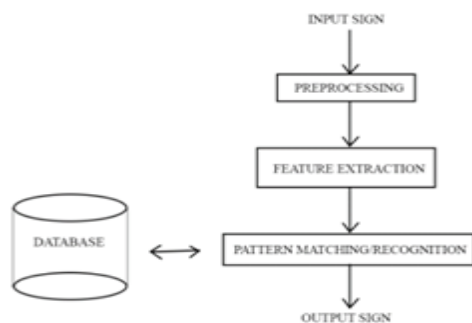
Осы саладағы көптеген зерттеулер, мысалы, (Priesnitz, et al., 2021; Ur Rehman, et al., 2021; Govalkar, et al., 2020), терең оқыту әдістері үлкен деректер жиынтығынан маңызды ерекшеліктерді автоматты түрде анықтай отырып, дәлдікті арттырады және күрделі тапсырмаларды шешуге мүмкіндік береді. Бұл әдістер визуализация, кеңістіктік-уақыттық ақпараттарды өңдеу, және модальдық сәйкестендіру сияқты ерекшеліктерге әсер етеді. Бірінші зерттеу DeepLabv3+ моделін қолдану арқылы саусақ ұштарын дәл сегментациялауға қол жеткізеді, бұл әсіресе гетерогенді фонды бар суреттерде жоғары дәлдікті

келтірген. Әдістің артықшылығы – осы екі типтегі қимылдарды тану үшін бейімделген алгоритмдер ұсынуында және олардың тиімділігін арттыру тәсілдерінде.

Келесі зерттеуде грек ым тілінің деректер жинағы (29 653 видео-аударма жұптары) қолданылады, ол грек бастауыш мектебінің ресми бағдарламасына негізделген. Бұл жаңа деректер жинағы SLT (Automatic Sign Language Translation) зерттеулеріне жаңа мүмкіндіктер ұсынады, себебі ол әртүрлі тақырыптарды қамтиды және аударманың шынайы өмірдегі мәнін арттырады. Бұл деректер жинағы қазіргі заманғы трансформатор негізіндегі әдістерді оқыту үшін қолданылады және SLT зерттеулерін жақсартуға мүмкіндік береді. Осы деректердің жан-жақты болуы және SLT зерттеулеріндегі шектеулерді жоюы оның нәтижелігін көрсеткен.

Кейінгі үшінші кеңістіктік-уақыттық ақпаратты көп модалды видео негізінде тану үшін Convolutional Transformer Fusion Blocks (CTFB) ұсынылған. Бұл әдіс бірнеше деректер жинағында (IsoGD, NVGesture, IPN hand) жоғары немесе бәсекеге қабілетті нәтижелер көрсеткен. CTFB жергілікті және жаһандық ерекшеліктерді қамтып, көп деңгейлі біріктіру жолдарын ұсынады, нәтижесінде модельдің жалпы тану дәлдігі артады. Бұл әдістің өнімділігі бірқатар факторлармен жақсарған: жергілікті ерекшеліктерді жинау және әртүрлі модальді ақпаратты біріктіру арқасында. Төртінші мақалада CT-HGR (Compact Transformer-based Hand Gesture Recognition) негізделген жаңа құрылым ұсынылған. Бұл әдіс жоғары тығыздықтағы беткі EMG (HD-sEMG) сигналдарын қолданып, статикалық және динамикалық қимылдарды тану мақсатында қолданылады. Әдіс көп арналы электродтар мен әртүрлі терезе өлшемдерін қолдану арқылы нәтижелерді жақсартып, қол протездерінде нақты уақыттағы тану тапсырмаларын шешуге арналған. Бұл әдістің артықшылығы — жеңіл әрі тиімді болуы, аз параметрлермен жұмыс істеп, жақсы нәтижелер көрсетуі.

Бұл жұмыстар әртүрлі деректер жинақтары мен әдістерді қолдану арқылы қол жетімді нәтиже көрсетуге мүмкіндік береді. Әр әдіс нақты тапсырмаға бейімделген және деректерді жинақтау, өңдеу мен моделдеуді оңтайландыру арқылы тану жүйелерінің тиімділігін арттырады.



2–сурет. Ұсынылған жүйенің негізгі архитектурасы

Sharma et al., (2020), Haq et al., (2023), Dong et al., (2021) мақалаларында қолданылған әдістер әр түрлі, олардың ішінде Histogram of Gradients (HOG), Local Binary Patterns (LBP), Principal Component Analysis (PCA), Canny Edge Detection, ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) бар. Бұл әдістер деректерді алдын ала өңдеу, ерекшеліктерді шығару және классификациялауда қолданылады.

Алғашқы еңбекте ORB арқылы ерекшеліктерді алу мен «bag of words» әдісі қолданылған. Бұл әдіс түрлі алдын ала өңдеу техникаларымен салыстырғанда, әсіресе Naïve Bayes, Logistic Regression, және KNN классификаторларымен жақсы нәтиже көрсеткен. Артықшылығы – ORB ерекшеліктерді алу мен канни шеткі анықтау әдістерінің тиімділігін көрсетіп, жоғары дәлдікке қол жеткізді.

Ұсынылған екіншісі жұмыста CNN негізіндегі жүйе қолдың бейнесін сегментациялау, ерекшеліктерін алу және оларды жіктеу бойынша үш негізгі кезеңге бөлінген. CNN модельдерінің артықшылығы бейнежазбалар мен суреттердегі ерекшеліктерді тиімді түрде анықтап, тануға мүмкіндік береді, сонымен бірге мұнда жақсы көрсеткіштерді (дәлдік, сезімталдық, спецификалық) берді. Артықшылығы – CNN архитектурасының суретке негізделген тапсырмаларға тиімді қолданылуы.

Ал үшінші мақалада 5-D кеңістік (диапазон, Доплер, азимут, көтерілу бұрышы) негізінде ерекшеліктерді алу әдісі қолданылған. Әдістің артықшылығы – бұл кеңістікте уақыт бойынша өзгерістерді бақылай отырып, қимылдардың геометриялық трансформацияларын қамтиды және жаһандық уақыт-кеңістік қатынастарын зерттейді, нәтижесінде жоғары тану деңгейіне қол жеткізеді.

Берілген әдістердің әрқайсысы сенсорлық және бейнелерді өңдеуде белгілі бір артықшылықтарға ие, бірақ әртүрлі архитектуралар мен ерекшелік алу тәсілдерінің комбинациясы олардың тиімділігін айтарлықтай арттыра алады, әсіресе қол қозғалыстарын тануда жоғары дәлдікке жету үшін.

Tsiganos et al., (2021), Colli Alfaro & Trejos, (2022) зерттеулерінде MSHilbNet, VGGNet, DenseNet, SqueezeNet және Adaptive Least-Squares Support Vector Machine (LS-SVM) архитектуралары қолданылды, олардың әрқайсысы сұлбалы электромиография сигналдарын классификациялау дәлдігін арттыруда және пайдаланушыға тәуелсіз интерфейстерді дамытуда маңызды рөл атқарды. Бірінші жұмыста сұлбалы электромиография (sEMG) сигналдарын бейнелерге айналдыру үшін Хилберт криволинейкалық әдіс қолданылған, ал ұсынылған архитектуралар VGGNet, DenseNet және SqueezeNet болды. Көп деңгейлі Хилберт криволинейкасын пайдалану арқасында MSHilbNet архитектурасы классикалық нейрон желілерімен салыстырғанда жақсы нәтиже көрсеткен.

Екінші жұмыста EMG және инерциялық өлшеу бірліктері (IMU) деректерін біріктіріп, пайдаланушыға тәуелсіз қимылдарды тану әдісі әзірленді. EMG және IMU деректерінің үйлесімі классификацияның дәлдігін едәуір арттырды, ал Adaptive Least-Squares Support Vector Machine (LS-SVM) моделі 92.9% дәлдікке жетті.

Екі зерттеуде де классификация нәтижелері үшін деректерді өңдеу әдістері және архитектуралық таңдау ерекше маңызға ие болды. Бірінші жұмыс MSHilbNet архитектурасы арқылы sEMG сигналдарының бейнелеуін жақсартса, екінші жұмыс EMG және IMU сенсорларының үйлесімділігі арқылы пайдаланушыға тәуелсіз ым-ишараны тану әдісін дамытуға назар аударды. MSHilbNet архитектурасы, аз параметрлермен, дәстүрлі архитектураларға қарағанда жақсы нәтиже көрсетті, ал Adaptive LS-SVM моделі пайдаланушыға тәуелсіз әдістер арасында ең жоғары дәлдікке жетті.

Ымтілінтану жүйелерінде құрылғылармен алгоритмдерін қолдану (Camgöz, et al., 2014; Sharma & Singh, 2023; Harris, et al., 2021; Zholshiyeva, et al., 2023) зерттеулерінде қарастырылған. Мысалы, Microsoft Kinect сияқты сенсорлар дене координаттарын дәл тіркеп, ымдарды тануға көмектеседі. Алгоритмдер, мысалы, Random Decision Forest, SVM, және терең үйрету (deep learning) модельдері ымдардың ерекшеліктерін дәл анықтауға және тану тиімділігін арттыруға ықпал етеді. Құрылғылардың жоғарғы сапасы мен алгоритмдердің тиімділігі біріктірілгенде, жүйенің жалпы өнімділігі елеулі түрде жақсарды. Бірінші еңбек, негізінен, қаңқа негіздегі ерекшеліктерді қолдану арқылы ымдарды тану әдісін қолданды. 7754 ым үлгілері мен 20 ым сөздігі бойынша жаттықтыру нәтижесінде, Jaccard индексі 0.74663-ке жетті. Бұл көрсеткіш, әсіресе, қаңқа негіздегі ерекшеліктерді қолданған әдістер арасында ең жоғары болды. Артықшылықтары – жоғары дәлдік, модельдің үздіксіз ымдарды тану қабілеті, сонымен қатар, шынайы уақыттағы тану мүмкіндігі.

Келесі жұмыс Mobilenetv2 архитектурасын қолдана отырып, 99.3% және 99.9% классификация дәлдігіне қол жеткізді. Бұл, негізінен, үлгі құрылымының ықшамдығына, алдын ала дайындалған салмақ файлдарын қолдануға және кросс-валидация арқылы тексерілгендікке байланысты. Алгоритмнің аз күш жұмсайтын сипаттамасы және қолданушы интерфейсі арқылы ақпаратты өңдеудің жеңілдігі, өнімділікті арттыруға көмектесті. Үшінші зерттеу MediaPipe негізіндегі қол ымдарын тану жүйесін дамытуға арналған. Бұл әдіс шынайы уақыттағы бейнелерді өңдеуді және тануды жеңілдетеді. MediaPipe құралдарын пайдалану, ымдардың дәл анықталуын және пайдаланушылардың ақпаратты алудағы жеңілдіктерін қамтамасыз етеді. Қол ымдарын тиімді түрде тану және өңдеу мүмкіндігі зерттеудің негізгі артықшылығы болып табылады.

Төртінші мақалада қазақ дактильді ымдарын тану үшін машина оқыту алгоритмі, атап айтқанда SVM қолданылады. Жұмыста 42 дактильді тануға арналған жүйе ұсынылған. Бұл әдіс шынайы уақыттағы тану қабілетін және жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді. Алгоритм тиімділігі 99%-ға жетуі, оның қол жетімділігі мен қарапайымдылығын көрсетеді. Барлық төрт зерттеу ым тілін танудағы алгоритмдердің және құрылғылардың маңызды рөлін көрсетеді, әрбір жұмыс өзінің ерекшеліктері мен әдістемелері арқылы жоғары нәтижелерге жетуге ұмтылады.

Біз терең нейрондық желілерді қолдана отырып, ым тілін тану саласында

зерттеулер жүргіздік. Біз мынаны анықтадық: терең нейрондық желілер, оның ішінде CNN, қимылдарды тануда жоғары тиімділікті көрсетеді; деректер сапасы мен саны модельдерді оқытуда шешуші рөл атқарады; деректерді ұлғайту дәлдікті айтарлықтай жақсартады. Деректерді өңдеудің және модельдік архитектураның көптеген тәсілдері бар (Amangeldi, et al., 2020; Amangeldi, et al., 2020), бұл осы саланың қарқынды дамуын көрсетеді. Жетістіктерге қарамастан, біз деректер теңгерімсіздігі, нақты уақыт режимінде қимылдарды тану және ым тілі арасындағы аударма мәселелерін шешуде қиындықтарға тап боламыз. Біздің жұмысымыз осы саладағы зерттеулердің жалпы көрінісіне сәйкес келеді және өз үлесін қосады: біз қазақ ым тілі үшін жаңа деректер жинағын жасадық, осылайша бар дерекқорды кеңейттік; қазақ ым тіліндегі қимылдарды тану үшін CNN-нің тиімділігін көрсеттік.

Материалдар мен әдістер. Бірінші мақала «Градиенттік оқытуды құжаттарды тануға қолдану» CNN туралы 1998 жылы жарияланып, терең оқыту мен тануда маңызды рөл атқарды. (Le Cun, et al., 1998) конволюциялық және толық байланыс қабаттарын қолданатын жаңа архитектураны таныстырды, градиенттік оқытудың тиімділігін көрсетті.

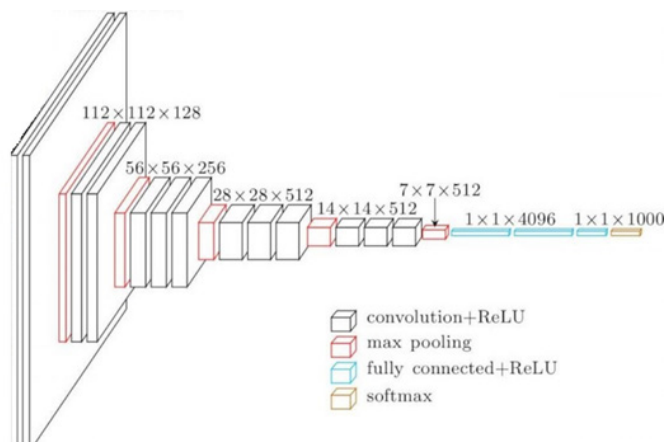
CNN архитектурасы градиенттік оқытуды қолдану арқылы құжаттарды автоматты тануды айтарлықтай жақсартты. Градиенттік түсуді пайдаланып, терең нейрондық желілердің енгізілуі заманауи құжаттарды өңдеудің негізгі кезеңіне айналды. Бұл жұмыс градиент негізіндегі оқытудың әлеуетін көрсетіп, компьютерлік көру мен табиғи тіл өңдеу саласындағы зерттеулерге негіз болды.

Деректерді алдын ала өңдеу

Деректерді стандарттау және модельді оқытуды жақсарту үшін TensorFlow кітапханасындағы `preprocess_input` функциясы арқылы кескіндер алдын ала өңделді. Деректерді ұлғайту модельдің стандарттау қабілетін жақсарту мақсатында кескіндерді масштабтау, айналдыру және жарықтығын өзгерту операцияларын қамтитын `ImageDataGenerator` сыныбының көмегімен жүзеге асырылды.

Ұсынылған модель 3-суретте көрсетілгендей Keras кітапханасы арқылы құрылды. Модель келесі қабаттарды қамтыды:

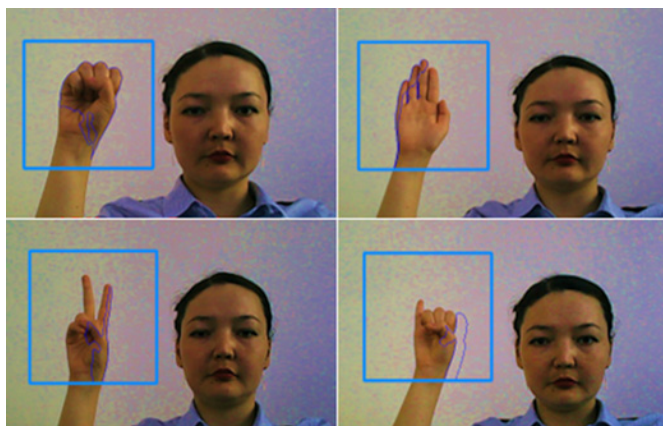
Модель 32 фильтрі бар конволюциялық қабаттан, субдискреттеу қабатынан, 64 фильтрі бар конволюциялық қабаттан, субдискреттеу қабатынан, 128 фильтрі бар конволюциялық қабаттан, субдискреттеу қабатынан, 256 фильтрі бар конволюциялық қабаттан, субдискреттеу қабатынан, Flatten қабатынан, 64 нейроннан тұратын толық байланыс қабатынан, 128 нейроннан тұратын толық байланыс қабатынан, Dropout қабатынан (0.2), 256 нейроннан тұратын толық байланыс қабатынан, Dropout қабатынан (0.3), 512 нейроннан тұратын толық байланыс қабатынан және 42 нейроннан тұратын шығу толық байланыс қабатынан және 'softmax' белсендіру функциясынан құралды.



3-сурет. CNN моделінің архитектурасы

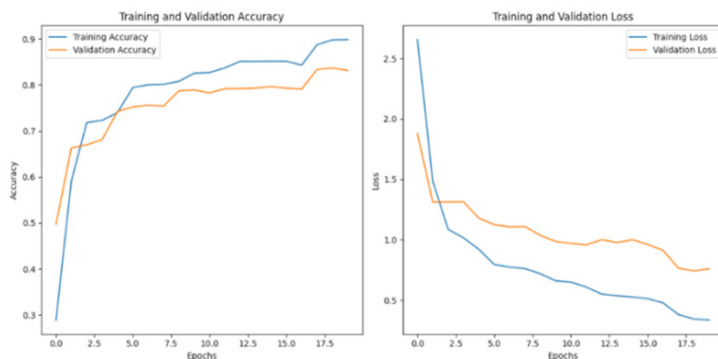
Зерттеу нәтижелері. Біздің жұмысымыздың нәтижесінде келесі маңызды нәтижелерге қол жеткіздік:

Қазақ ым тілінің 42 дактилін тану бойынша зерттеу жүргізілді, нәтижесінде әріптер мен ым тілінің жалпы сипаты туралы мәліметтер алынды. 4-суретте көрсетілгендей 25 200-ден астам деректер жиынтығы жасалған. Деректер жиынтығы модельдің тиімділігін бағалау мақсатында оқыту (20 790 сурет) және сынақ (4 410 сурет) үлгілеріне бөлінді.

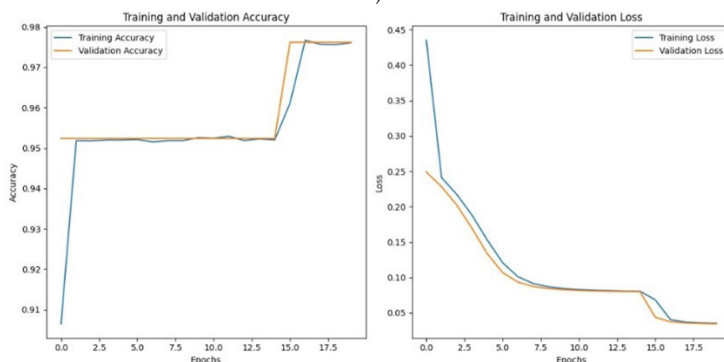


4-сурет. Қазақ ым тілінің 42 дактилі деректер жинағы

Оқыту CNN негізгі кескінді өңдеу үлгісін қолдану арқылы орындалды. Модельдің тиімділігі оқу және сынақ деректер жиынындағы дәлдік пен жоғалту көрсеткіштерімен бағаланды. Жаттығу нәтижелері 5-суретте көрсетілгендей графиктер арқылы көрнекі түрде көрсетілді, олар эпох бойынша дәлдік пен жоғалтудың өзгеруін бейнелейді. Бұл модельдің мәселелерін және жетілдіру үшін бағыттарды анықтауға мүмкіндік берді.



a)



b)

5–сурет. Оқыту процесі: а) CNN+ fully connected layer бойынша оқыту мен валидациядағы дәлдік және шығын; б) CNN + fully connected layer+data augmentation бойынша оқыту мен валидациядағы дәлдік және шығын

Қазақым тілі дактилін тану үшін әзірленген модель дәлдік метрикасы арқылы бағаланды. Оқыту аяқталғаннан кейін, модель (CNN+fully connected layer) 89,33% дәлдікке қол жеткізді. Деректерді ұлғайту әдістері қолданылғаннан кейін, модель (CNN + fully connected layer+data augmentation) нәтижелерін жақсартып, бағалау жиынтығында 95,34% дәлдік көрсетті, сондай-ақ тест жиынтығында көрсеткішін 4%-ға жуық жақсартты, бұл 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1 – Оқыту нәтижелері

Модель	Бағалау жиынтығындағы тану дәлдігі %	Тест жиынтығындағы тану дәлдігі %	Деректер көлемі
(Zholshiyeva, et al., 2023)			
ResNet50	62,69	78,612	4 449
VGG16	91,323	98,867	
CNN+ fully connected layer	89,33	77,611	25 200
CNN+fully connected layer+data augmentation	95,34	80,883	75 600

Тестілеу үлгісіндегі жоғалту функциясының мәні шектеулі диапазонда бағаланды, бұл классификация процесіндегі қателіктердің төмен деңгейін көрсетеді. Оқыту процесі барысында дәлдік пен жоғалтудағы өзгерістер графиктері модельдің өнімділігінің біртіндеп жақсаратынын көрсетеді. Бұл қолданылған оптимизаторлардың тиімділігін растайды.

Тестілеу деректерінің шағын жинағында модель қазақ әліпбиінің әріптерін сәтті болжайды. Болжамдар нақты белгілермен салыстырылып, танудың жоғары дәлдігін көрсетті.

Талқылау. Зерттеу барысында саңырау және нашар еститін адамдар үшін коммуникациялық технологияларды дамыту контекстінде өзекті және маңызды міндет болып табылатын қазақ сым тілін тану бойынша CNN-нің жұмысының тиімділігі бағаланады. Деректерді жинау және ұлғайту арқылы жаттығу деректерін арттыру бойынша айтарлықтай күш-жігерге қарамастан, нәтижелер ағымдағы конфигурацияда модельдің төмен өнімділігін көрсетті. Дәлдік метрикасы көпшілігі ым сыныптары үшін қанағаттанарлық мәндерді көрсетті. Зерттеу барысында анықталған негізгі мәселе-деректер жиынтығындағы теңгерімсіздік және таңдалған модель архитектурасының ықтимал оңтайлы еместігі. Бұл қимылдарды танудың дәлдігі мен сенімділігін арттыру үшін деректерді өңдеу әдістерін де, модель архитектурасын да одан әрі жетілдіру және түзету қажеттілігін көрсетеді.

Жұмыстың нәтижелері деректер сыныптарын теңдестіру бойынша қосымша зерттеулердің қажеттілігін көрсетеді. Бұл деректерді жинауға, қимылдардың әртүрлілігін және олардың нақты пайдалану жиілігін есепке алуға мұқият көзқарасты қамтуы мүмкін. Сондай-ақ ым тілін тану тапсырмасының ерекшеліктерін ескере отырып, CNN моделінің архитектурасын талдау және оңтайландыру маңызды. Келесі зерттеулер әртүрлі CNN-нің архитектураларымен, соның ішінде ым тілінің ерекшеліктеріне бейімделген терең немесе арнайы модельдермен тәжірибе жүргізуді қамтуы мүмкін. Бұл тану жүйесінің жалпы өнімділігін арттыруға көмектеседі. Сондай-ақ, нәтижелерді талдау және модель қателіктерін интерпретациялау әдістеріне назар аудару маңызды, бұл оқыту процесін одан әрі оңтайландыруға және тану сапасын жақсартуға мүмкіндік береді.

Осы зерттеу нәтижелерін іс жүзінде қолдану ымд тілін автоматты түрде тану технологияларын дамытуға, саңырау және нашар еститін адамдар үшін қарым-қатынастың қолжетімділігі мен тиімділігін арттыруға айтарлықтай үлес қоса алады. Терең оқыту модельдерін сәтті бейімдеу және оңтайландыру ымтілін коммуникацияда инновациялық технологиялық шешімдерді жасауға жаңа мүмкіндіктер ашады.

Қорытынды. Талдау нәтижелері оқыту деректер жинағындағы сыныптардың теңгерімсіздігін көрсетеді. Сыныптардың тең дәрежеде бөлінбеуі жиі жағдайларда кейбір сыныптардың шамадан тыс дайындалуына және сирек кездесетін сыныптардың нашар жіктелуіне әкеліп соғуы мүмкін.

Бұл теңгерімсіздік, өз кезегінде, модельдің жалпы тиімділігін төмендетіп, әдістемелік шешімдердің дәлдігін нашарлатуы ықтимал.

Модельдің өнімділігін арттыру гиперпараметрлерді реттеу және күрделі желілік архитектураларды қарастыру арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл процесс, соның ішінде бейне деректеріндегі негізгі ерекшеліктерді тиімдірек айқындай алатын назар аудару механизмдерін енгізу мүмкіндігін қамтиды. Мұндай механизмдер модельдің жұмысын айтарлықтай жақсартып, оның нәтижелерінің дәлдігін арттыруға ықпал етуі ықтимал. Keras арқылы CNN моделі қазақ ым тілі қимылдарын жоғары дәлдікпен және төмен шығынмен тануға табысты түрде оқытылды. Модель сапасын бағалау оның әріптерді тиімді тану және жіктеу қабілетін айқындайды, бұл ым тілін тану саласындағы болашақ зерттеулер мен дамулар үшін перспективалы құрал ретінде қызмет етеді. Мұндай модельдердің тиімділігі, сондай-ақ, коммуникациялық технологиялардың дамуына және есту қабілеті шектелген адамдардың өзара әрекеттесуін жақсартуға үлес қосады.

Қазақ ым тілін тану моделін зерттеу мен жетілдіру есту қабілеті шектеулі адамдарға арналған коммуникация мен білім беру үшін тиімді құралдарды құрумен қатар, нақты уақытта автоматты аудару технологияларын желтілдіруге және ым тілінде білім беру контентін құрастыруды жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл шаралар қоғамдағы инклюзивтілікті арттырып, ақпаратқа қолжетімділікті кеңейтеді, сондай-ақ, қазақ ым тілінің мәдени және әлеуметтік маңызын нығайтуға ықпал етеді.

Әдебиеттер

Амангелді Н., Кудубаева С.Ә. (2020) Қазақ ым тіліндегі сөз тіркесін танудың байланысқан облыстарды белгілеу және корреляциялық әдістері// ҚазҰТЗУ хабаршысы № 5 (141). Техникалық ғылымдар. 172-177 б.

Амангелді Н., Кудубаева С.Ә. (2020) Қазақ ым тілін тану есебінің пән облысына шолу. Есептің қойылуы. ҚазҰТЗУ хабаршысы № 5 (141). Техникалық ғылымдар. 177-183 б.

Priesnitz J., et al. Deep learning-based semantic segmentation for touchless fingerprint recognition. Pattern Recognition. ICPR International Workshops and Challenges: Virtual Event, January 10-15, 2021, Proceedings, Part VIII. – Springer International Publishing, 2021. – С. 154-168, doi:10.1007/978-3-030-68793-9_11 (in English).

Ur Rehman M. et al. Dynamic hand gesture recognition using 3D-CNN and LSTM networks. Computers, Materials & Continua. – 2021. – Т. 70. – №. 3, <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.019586> (in English).

Govalkar O., Gaikar P., Gavali P. Sign Language Recognition Techniques: A survey. – 2020, doi: 10.1109/TPAMI.2019.2929257

Zheng J. et al. Cvt-slr: Contrastive visual-textual transformation for sign language recognition with variational alignment. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2023. – С. 23141-23150, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.05725> (in English).

Voskou A. et al. A new dataset for end-to-end sign language translation: The greek elementary school dataset. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2023. – С. 1966-1975, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.04753> (in English).

Hampiholi B. et al. Convolutional transformer fusion blocks for multi-modal gesture recognition. IEEE Access. – 2023. – Т. 11. – С. 34094-34103, doi:10.1109/access.2023.3263812 (in English).

Montazerin M. et al. Transformer-based hand gesture recognition from instantaneous to fused

neural decomposition of high-density EMG signals. Scientific reports. – 2023. – T. 13. – №. 1. – C. 11000, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36490-w> (in English).

Sharma A. et al. Hand gesture recognition using image processing and feature extraction techniques //Procedia Computer Science. – 2020. – T. 173. – C. 181-190, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.06.022> (in English).

Haq E. U., Wuttisittikulij L., Vanichchanunt P. An efficient deep learning approach for human hand gesture recognition. – 2023, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3718831/v1> (in English).

Dong X. et al. FMCW radar-based hand gesture recognition using spatiotemporal deformable and context-aware convolutional 5-D feature representation //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2021. – T. 60. – C. 1-11, doi: [10.1109/tgrs.2021.3122332](https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3122332) (in English).

Tsinganos P., et al. Hilbert sEMG data scanning for hand gesture recognition based on deep learning. Neural Computing and Applications. – 2021. – T. 33. – C. 2645-2666, <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05128-7> (in English).

Colli Alfaro J. G., Trejos A. L. User-independent hand gesture recognition classification models using sensor fusion. Sensors. – 2022. – T. 22. – №. 4. – C. 1321, <https://doi.org/10.3390/s22041321> (in English).

Camgöz N.C., Kindiroglu A.A., Akarun L. Gesture recognition using template based random forest classifiers. European conference on computer vision. – Cham : Springer International Publishing, 2014. – C. 579-594, DOI: [10.1007/978-3-319-16178-5_41](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16178-5_41) (in English).

Sharma S., Singh S. ISL recognition system using integrated mobile-net and transfer learning method. Expert Systems with Applications. – 2023. – T. 221. – C. 119772, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119772> (in English).

Harris M. et al. Applying hand gesture recognition for user guide application using MediaPipe. 2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021). – Atlantis Press, 2021. – C. 101-108, <https://doi.org/10.2991/aer.k.211106.017> (in English).

Zholshiyeva L. et al. Real-time kazakh sign language recognition using mediapipe and svm. Известия НАН РК. Серия физико-математическая. – 2023. – №. 1. – C. 82-93, <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1726.170> (in English).

Le Cun Y., et al. Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE. – 1998. – T. 86. – №. 11. – C. 2278-2324, <https://doi.org/10.1109/5.726791> (in English).

References

Amangeldi N., Kudubaeva S.A. (2020) Kazak ym tilindegi soz tirkesin tanudyn baylanskan oblystardy belgileu zhane korrelyasyalyk adisteri. [Recognition of Phrases in Kazakh Sign Language Using Connected Region Marking and Correlation Methods]. KazNTU Bulletin, 5(141):172–177 (in Kazakh).

Amangeldi N., Kudubaeva S. (2020) Kazak ym tilin tanu esebinin pan oblysyna sholu. Eseptin koilylmy. [Overview of the Subject Area of Kazakh Sign Language Recognition Task]. Bulletin of KazNTU. – 5(141):177–183 (in Kazakh).

Priesnitz J., et al. Deep learning-based semantic segmentation for touchless fingerprint recognition. Pattern Recognition. ICPR International Workshops and Challenges: Virtual Event, January 10-15, 2021, Proceedings, Part VIII. – Springer International Publishing, 2021. – C. 154-168, doi:[10.1007/978-3-030-68793-9_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68793-9_11) (in English).

Ur Rehman M., et al. Dynamic hand gesture recognition using 3D-CNN and LSTM networks. Computers, Materials & Continua. – 2021. – T. 70. – №. 3, <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.019586> (in English).

Govalkar O., Gaikar P., Gavali P. Sign Language Recognition Techniques: A survey. – 2020, doi: [10.1109/TPAMI.2019.2929257](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2929257)

Zheng J., et al. Cvt-slr: Contrastive visual-textual transformation for sign language recognition with variational alignment. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2023. – p. 23141-23150, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.05725> (in English).

Voskou A., et al. A new dataset for end-to-end sign language translation: The greek elementary

school dataset //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2023. – p. 1966-1975, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.04753> (in English).

Hampiholi B., et al. Convolutional transformer fusion blocks for multi-modal gesture recognition. IEEE Access. – 2023. – T. 11. – C. 34094-34103, doi:10.1109/access.2023.3263812 (in English).

Montazerin M., et al. Transformer-based hand gesture recognition from instantaneous to fused neural decomposition of high-density EMG signals. Scientific reports. – 2023. – T. 13. – №. 1. – C. 11000, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36490-w> (in English).

Sharma A., et al. Hand gesture recognition using image processing and feature extraction techniques. Procedia Computer Science. – 2020. – T. 173. – p. 181-190, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.06.022> (in English).

Haq E.U., Wuttisittikulkij L., Vanichchanunt P. An efficient deep learning approach for human hand gesture recognition. – 2023, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3718831/v1> (in English).

Dong X. et al. FMCW radar-based hand gesture recognition using spatiotemporal deformable and context-aware convolutional 5-D feature representation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2021. – V. 60. – p. 1-11, doi: 10.1109/tgrs.2021.3122332 (in English).

Tsinganos P., et al. Hilbert sEMG data scanning for hand gesture recognition based on deep learning. Neural Computing and Applications. – 2021. – T. 33. – C. 2645-2666, <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05128-7> (in English).

Colli Alfaro J.G., Trejos A.L. User-independent hand gesture recognition classification models using sensor fusion. Sensors. – 2022. – V. 22. – №. 4. – p. 1321, <https://doi.org/10.3390/s22041321> (in English).

Camgöz N. C., Kindiroglu A. A., Akarun L. Gesture recognition using template based random forest classifiers //European conference on computer vision. – Cham : Springer International Publishing, 2014. – C. 579-594, DOI: 10.1007/978-3-319-16178-5_41 (in English).

Sharma S., Singh S. ISL recognition system using integrated mobile-net and transfer learning method //Expert Systems with Applications. – 2023. – V. 221. – p. 119772, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119772> (in English).

Harris M. et al. Applying hand gesture recognition for user guide application using MediaPipe //2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021). – Atlantis Press, 2021. – p. 101-108, <https://doi.org/10.2991/aer.k.211106.017> (in English).

Zholshiyeva L. et al. REAL-TIME KAZAKH SIGN LANGUAGE RECOGNITION USING MEDIAPIPE AND SVM //News of NAS RK. Series of physics and mathematics – 2023. – №. 1. – p. 82-93, <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1726.170> (in English).

LeCun Y. et al. Gradient-based learning applied to document recognition //Proceedings of the IEEE. – 1998. – V. 86. – №. 11. – p. 2278-2324, <https://doi.org/10.1109/5.726791> (in English).

**A.N. Zhidebayeva¹, S.T. Akhmetova², A.O. Aliyeva³, B.O. Tastanbekova²,
G.S. Shaimerdenova^{2*}, 2025.**

¹Peoples' Friendship University named after academician A. Kuatbekov,
Shymkent, Kazakhstan;

²Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan;

³Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh – Turkish University,
Turkistan, Kazakhstan.

E-mail: danel101kz@gmail.com

REVIEW OF DETECTION AND PREVENTION OF OFFENSIVE LANGUAGE VIA SOCIAL MEDIA DATA MINING

Zhidebayeva Aziza – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, department of Computer science and Mathematics, Peoples Friendship University named after Academician A. Kuatbekov, Shymkent, Kazakhstan, E – mail: aziza_68.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3768-4835>;

Akhmetova Sabira – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, department of Information system, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan, E – mail: sabdas65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5164-2028>;

Aliyeva Akbayan – candidate of technical sciences, department of Computer engineering, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan, E – mail: aliyevaakbayan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6932-7302>;

Tatanbekova Bayan – master, teacher, department of Information Communication technologies, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan, E – mail: baya2013@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4549-0344>;

Shaimerdenova Guldana – PhD, associate professor, department of Information Communication technologies, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan, E – mail: danel101kz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8685-7125>.

Abstract. This study delves into the multifaceted problem of cyberbullying among children and adolescents, focusing on developing an adapted framework to address this pervasive problem in the context of Kazakh social media. Based on a comprehensive analysis of international research, including contributions from the United States, England, and European countries, the paper integrates theoretical methodologies such as analysis, synthesis, empirical comparison, and experimentation. By contextualizing the findings in the unique cultural and digital landscape of Kazakhstan, the paper seeks to bridge the gap between global insights and local applications.

A central aspect of this study is the exploration of technical methodologies to combat cyberbullying. In particular, it examines the creation of a parser and systematic collection of data to train machine and deep learning algorithms capable of identifying and mitigating offensive or derogatory language in real time. These technologies promise to improve proactive moderation of online platforms and protect vulnerable users. Aimed at both novice and seasoned data scientists, this study highlights the need for further study into the practical implementation of deep learning algorithms. As part of the larger ongoing project, future work will refine these approaches, with subsequent publications looking in more detail at the deployment and optimization of advanced algorithmic models.

Keywords: classification, machine learning, deep learning, social media, social networks

**А.Н. Жидебаева¹, С.Т. Ахметова², А.О. Алиева³, Б.О. Тастанбекова²,
Г.С. Шаймерденова^{2*}, 2025.**

¹Академик Ә. Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университеті,
Шымкент, Қазақстан;

²М. Ауезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
Шымкент, Қазақстан;

³Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық Қазақ-Түрік Университеті,
Түркістан, Қазақстан.

E-mail: danel101kz@gmail.com

ӘЛЕУМЕТТІК ЖЕЛІЛЕРДЕН DATA MINING АРҚЫЛЫ БЕЙӘДЕП СӨЗДЕРДІ АНЫҚТАУ ЖӘНЕ АЛДЫН АЛУҒА ШОЛУ

Zhidebayeva Aziza – т.ғ.к., Академик А. Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университетінің «Информатика және математика» кафедрасының аға оқытушысы, Шымкент, Қазақстан, E – mail: aziza_68.kz@mail.ru , <https://orcid.org/0000-0002-3768-4835>;

Akhmetova Sabira – физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, Ақпараттық жүйе кафедрасы, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, E – mail: sabdas65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5164-2028>;

Aliyeva Akbayan – техника ғылымдарының кандидаты, «Компьютерлік техника» кафедрасы, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық Қазақ-Түрік университеті, Түркістан, Қазақстан, E – mail: aliyevaakbayan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6932-7302>;

Tatanbekova Bayan – магистр, оқытушы, ақпараттық коммуникациялық технологиялар кафедрасы, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан, E – mail: baya2013@inbox.ru , <https://orcid.org/0000-0002-4549-0344>;

Shaimerdenova Guldana – Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, «Ақпараттық коммуникациялық технологиялар» кафедрасының PhD, доценті, Шымкент, Қазақстан, E – mail: danel101kz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8685-7125>.

Аннотация. Бұл зерттеу қазақстандық әлеуметтік медиа контекстінде кең таралған проблеманы шешу үшін бейімделген құрылымды әзірлеуге назар аудара отырып, балалар мен жасөспірімдер арасындағы кибербуллингтің көп қырлы проблемасын зерттейді. Америка Құрама Штаттарының, Англияның

және Еуропа елдерінің үлестерін қоса алғанда, халықаралық зерттеулерді жан-жақты талдау негізінде жұмыс талдау, синтез, эмпирикалық салыстыру және эксперимент сияқты теориялық әдіснамаларды біріктіреді. Қазақстанның бірегей мәдени және цифрлық ландшафтындағы қорытындыларды контекстке келтіру арқылы мақала жаһандық түсініктер мен жергілікті қолданбалар арасындағы алшақтықты жоюға тырысады.

Бұл зерттеудің орталық аспектісі кибербуллингпен күресудің техникалық әдістемелерін зерттеу болып табылады. Атап айтқанда, ол нақты уақыт режимінде қорлайтын немесе кемсітетін тілді анықтауға және жеңілдетуге қабілетті машиналық және терең оқыту алгоритмдерін үйрету үшін талдаушыны құруды және деректерді жүйелі жинауды зерттейді. Бұл технологиялар онлайн платформалардың белсенді модерациясын жақсартуға және осал пайдаланушыларды қорғауға ықпал етеді.

Жаңадан келген ғалымдарға да, тәжірибелі мамандарға да бағытталған бұл зерттеу терең оқыту алгоритмдерін практикалық енгізу бойынша әрі қарай зерттеу қажеттілігін көрсетеді. Ағымдағы үлкен жобаның бөлігі ретінде болашақ жұмыс осы тәсілдерді нақтылайды, ал кейінгі жарияланымдар кеңейтілген алгоритмдік үлгілерді қолдану және оңтайландыру мәселелерін толығырақ қарастырады.

Түйін сөздер: классификация, машиналық оқыту, терең оқыту, әлеуметтік медиа, әлеуметтік желілер

**А.Н. Жидебаева¹, С.Т. Ахметова², А.О. Алиева³, Б.О. Тастанбекова²,
Г.С. Шаймерденова^{2*}, 2025.**

¹ Университет Дружбы Народов имени академика А. Куатбекова,
Шымкент, Казахстан;

² Южно-Казахстанский университет имени Мухтара Ауэзова,
Шымкент, Казахстан;

³ Международный Казахско-Турецкий Университет им. Ходжа Ахмета
Ясави, Туркестан, Казахстан.
E-mail: danel101kz@gmail.com

ОБЗОР ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОСКОРБИТЕЛЬНОЙ ЛЕКСИКИ С ПОМОЩЬЮ DATA MINING В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Жидебаева Азиза – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Информатики и математики, Университет Дружбы Народов имени академика А. Куатбекова, Шымкент, Казахстан, E-mail: aziza_68.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3768-4835>;

Ахметова Сабира – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Южно-Казахстанского университета имени Мухтара Ауэзова, Шымкент, Казахстан, E-mail: sabdas65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5164-2028>;

Алиева Акбаян – кандидат технических наук, кафедра «Вычислительная техника», Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмета Ясави, Туркестан,

Казахстан, E-mail: aliyevaakbayan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6932-7302>;

Тастанбекова Баян – магистр, преподаватель кафедры информационно-коммуникационных технологий, Южно-Казахстанский университет имени Мухтара Ауэзова, Шымкент, Казахстан, E-mail: baya2013@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4549-0344>;

Шаймерденова Гульдана – PhD, доцент кафедры информационно-коммуникационных технологий Южно-Казахстанского университета имени Мухтара Ауэзова, Шымкент, Казахстан, E-mail: danel101kz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8685-7125>.

Аннотация. Это исследование рассматривает многогранную проблему кибербуллинга среди детей и подростков, сосредотачиваясь на разработке адаптированной структуры для решения этой повсеместной проблемы в контексте казахских социальных сетей. Основываясь на всестороннем анализе международных исследований, включая вклад Соединенных Штатов, Англии и европейских стран, работа интегрирует теоретические методологии, такие как анализ, синтез, эмпирическое сравнение и экспериментирование. Контекстуализируя результаты в уникальном культурном и цифровом ландшафте Казахстана, статья стремится преодолеть разрыв между глобальными инсайтами и местными приложениями.

Центральным аспектом данного исследования является изучение технических методологий борьбы с кибербуллингом. В частности, рассматривается создание парсера и систематический сбор данных для обучения алгоритмов машинного и глубокого обучения, способных в реальном времени выявлять и смягчать оскорбительный или уничижительный язык. Эти технологии обещают улучшить проактивную модерацию онлайн-платформ и защитить уязвимых пользователей.

Нацеливаясь как на начинающих специалистов по обработке данных, так и на опытных профессионалов, это исследование подчеркивает необходимость дальнейшего изучения практической реализации алгоритмов глубокого обучения. В рамках более крупного текущего проекта будущая работа будет уточнять эти подходы, а последующие публикации будут более подробно рассматривать развертывание и оптимизацию продвинутых алгоритмических моделей.

Ключевые слова: классификация, машинное обучение, глубокое обучение, социальные медиа, социальные сети.

Introduction. Cyberbullying has become a growing social problem, especially during the pandemic, as traditional forms of mental and physical abuse have expanded to virtual environments. Although this form of aggression may initially seem harmless, it has significant differences compared to traditional bullying. The unique capabilities of the Internet – such as anonymity, the potential for a wide audience, 24/7 accessibility, and the ability to fake identities – have increased the impact and complexity of cyberbullying (Van, et al, 2018).

In 2017, a study conducted by the Russian Association of Electronic Communications (RAEC) identified cyberbullying as a pressing issue. This study

included structured surveys and independent analyses, although its results were partially disclosed to the public. The study involved 2,500 people aged 12 to 17 and 19 to 23, using targeted questions to examine the prevalence and characteristics of cyberbullying in these age groups. With the growing mental health risks of young people, the issue of online abuse is becoming increasingly important. Mental health, according to one concept, reflects “an individual’s harmonious alignment with oneself and the environment, including other people, nature, and space.” (Valle-Cano, et al, 2023).

Despite many surveys and analyses conducted on the topic, the development of methods to effectively detect or identify cyberbullying remains under-researched. For example, recent studies have begun to analyze specific text data from media platforms to identify patterns of online abuse (Van, et al, 2018). This shift is an important step toward automating the detection of cyberbullying, but significant challenges remain.

The prevalence of online bullying has increased alarmingly over the past two decades. Among US Internet users aged 10 to 17, instances of online bullying increased from 6% in 2000 to 9% in 2005, and then to 11% in 2010 (Khan, et al, 2022). These findings, from studies conducted by Finkelhor, Jones, and Mitchell (2013), highlight a clear trend of increasing online bullying. Similar trends have been noted in studies focusing on older adults, where 10% of respondents reported experiencing online bullying at least monthly. Interestingly, when researchers looked more deeply into hateful or harmful online content, these rates tended to be even higher, suggesting that cyberbullying is often underestimated in superficial surveys.

The findings are supported by a US review article, “The Changing Landscape of Peer Aggression: A Review of the Cyberbullying and Intervention Literature,” which provides a comprehensive overview of the evolution of cyberbullying and the decline of traditional forms of bullying. While this study offers valuable insights, it relied solely on manual methods of data collection and analysis. Specifically, the researchers collected data through survey responses, manually organized and analyzed the information, and then grouped the results accordingly. This approach, while effective for descriptive research, highlights the lack of automated systems or software solutions to facilitate the detection and analysis of cyberbullying content. To address these gaps, recent research has begun to focus on technological interventions, such as the use of machine learning and natural language processing to detect offensive content in real time. These tools can potentially provide scalable solutions for monitoring and mitigating cyberbullying on digital platforms. However, the application of such tools is still in its infancy, requiring significant refinement and testing to account for the nuances of language, context, and cultural sensitivity (Kumari, et al, 2020). The cyberbullying is a complex and rapidly evolving problem, exacerbated by the unique characteristics of digital environments. While traditional survey research has provided basic insights, there is a pressing need for automated and scalable solutions to effectively combat online aggression. Future research

should prioritize the integration of advanced computational methods to identify, analyze, and mitigate cyberbullying, with an emphasis on protecting vulnerable populations and promoting mental well-being in the digital age (Elzayady, et al, 2023).

Materials and methodology

In general, all of these works shared the same central idea, but different technologies were employed according to the goal that was more precisely defined. In addition to using machine and deep learning algorithms, some areas of the world involved more work with people, such as polling and pattern recognition. Databases play a critical role in studies where machine learning algorithms are mainly applied, and this is where the research methodology is usually divided into two main stages. In the first stage, datasets are often taken from public resources such as social media platforms, open access databases, or pre-existing repositories. The second stage involves the creation of customized data collection tools specifically designed to achieve the research goals. These tools are often accompanied by manual data labeling and cleaning to prepare them for further analysis. Once cleaned, the data is processed and experiments are conducted with various machine learning algorithms to detect and classify patterns such as cyberbullying. Unlike traditional approaches, our study stands out because it not only models harassment “attacks” but also examines the broader context of cyberbullying, including the more subtle interactions between perpetrators, victims, and witnesses. This broader approach is especially important because interactions between these three groups often signal that cyberbullying is occurring or escalating. Thus, rather than focusing on individual instances of harmful behavior, this study aims to identify the full spectrum of cyberbullying indicators, which may be critical to identifying ongoing harassment (Ghozali, et al, 2023). Despite the progress made, a fully automated system for real-time cyberbullying detection does not yet exist, and current systems still require human intervention to check when potential indicators of cyberbullying emerge. One of the challenges faced by previous studies is the uneven distribution of data, where only 4-7% of detected cases were labeled as positive for cyberbullying, and the majority of data was neutral or irrelevant (Jin-Liang, et al, 2018).

In contrast, (Agrawal, et al, 2018) conducted a study using Twitter, where they applied a binary classification approach to detect cyberbullying. They created a system capable of extracting the semantic meaning of words in tweets, using these word-level features along with additional text features such as sentiment analysis and vocabulary usage to differentiate between positive and negative sentiment. Their approach included both a binary classification model to determine the presence or absence of cyberbullying and a multi-class classification model to categorize the severity of the behavior as low, medium, or high. The methodology used in this study highlights the potential for more nuanced and scalable approaches to detecting cyberbullying on online platforms. However, challenges such as imbalances in datasets and the need for manual validation remain, requiring further improvements in algorithmic accuracy and data quality (Rezvan, et al, 2018).

The Random Forest classifier, combined with SMOTE, demonstrated excellent results with a kappa coefficient of 0.711, an overall accuracy of 91.153%, and an f-score of 0.898, achieving the highest overall classifier performance. In the binary classification setting, it performed even better with an AUC of 0.971 and an f-score of 0.929, confirming its effectiveness. The significance of the proposed features was highlighted through a comparative analysis with standard features in both multi-class and binary classification problems. The study highlights the need to explore a dataset that includes a balanced distribution of neutral and cyberbullying posts to enhance understanding and further improve the classification framework (Talpur, et al, 2020).

Table 1. Analysis of compared articles

Reference	Algorithms Used	Metrics	Corpus Size (words)	Application Area	Year	Notable Observations
[1]	Binary classification, Linear Regression	F-score, Precision, Recall, AUC, MSE	85,462	Sentiment Analysis	2019	Demonstrated high AUC for detecting sentiment polarity.
[3]	Naïve Bayes, KNN, Decision Trees, Random Forest, SVM	F-score, Precision, Recall, AUC	24,189	Cyberbullying Detection	2018	Random Forest outperformed others with the highest F-score and precision.
[14]	Logistic Regression, SGD Classifier, Random Forest, SVM, LGBM Classifier	Accuracy, Recall, Precision, F1 Score	37,373	Fake News Detection	2021	LGBM Classifier achieved the highest F1 score for binary classification tasks.
[12]	LDA, SVM, Linear Regression, Multiple Classification, Deep Learning	Accuracy, Recall, Precision	15,874	Topic Modeling	2020	Deep Learning models were more robust for complex datasets compared to traditional classifiers.
[6]	Clustering, Classification, Dimensionality Reduction	Accuracy, Recall, Precision	5,000	Spam Detection	2017	Clustering provided meaningful insights into unlabeled data, aiding classification tasks.
[17]	LDA, Random Forest, KNN, Classification, and Multiple Classification	Accuracy, Recall, Precision, MSA, MAE	17,546	Text Categorization	2022	Combined classifiers improved performance; MSA and MAE highlighted model efficiency for specific categories.

The methodologies employed in these studies demonstrate a consistent approach that emphasizes systematic data collection and preprocessing. Figure 1 illustrates the process of extracting information from a rich media landscape, highlighting

two primary scraping methods: API-based and custom system designs. API-based scraping requires token authentication, allowing for seamless and efficient access to structured data. In contrast, custom scraping leverages user agents to extract data from web resources, allowing for greater flexibility in analyzing system architecture. The choice between these methods depends on the requirements of the task—API integration offers speed and convenience, while custom scraping supports more complex, customized data collection needs (Masadeh, et al, 2022). This dual approach provides adaptability by enabling complex data preprocessing, which is critical for robustly training machine learning models and optimizing system design.

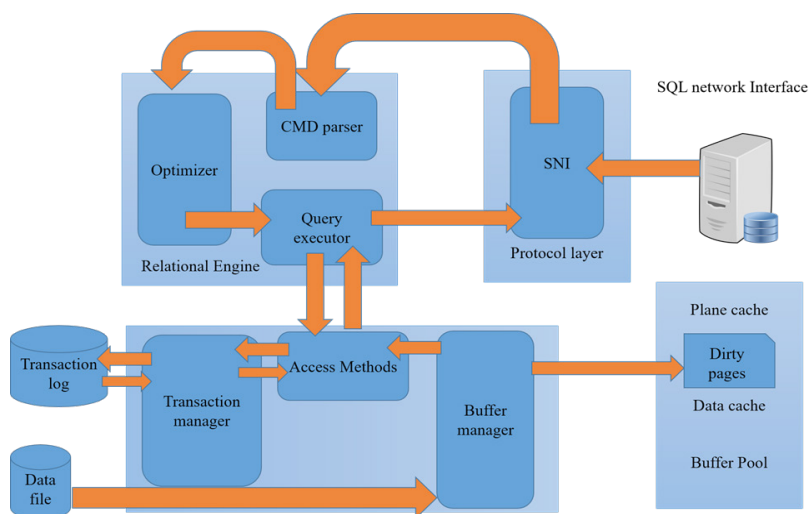


Fig. 1. Data processing scheme for web resources

Kaggle.com is an indispensable platform for newcomers to the data science community, offering an accessible entry point to learn and develop skills in the field. Users can upload their datasets and participate in competitions that require building predictive models, providing a great opportunity to work with real data. Although a wide range of datasets are available for free, the lack of an appropriate dataset for our specific research topic remains a challenge for this study (Sultan, et al, 2021).

Machine learning uses a variety of algorithms for classification and prediction problems. Logistic regression, a fundamental statistical model, is widely used for binary classification problems. It works by modeling the probability of a binary outcome as a function of one or more predictor variables, often using a logistic (sigmoid) function to produce output values between 0 and 1. Logit regression, a variant of logistic regression, focuses on analyzing the limits or boundaries of a classification model, providing valuable insights into how the predictor variables influence the outcome.

Introduced in 1951 by Evelyn Fix and Joseph Hodges, K-Nearest Neighbors (KNN) is a nonparametric machine learning method used primarily for classification problems, although it can also be applied to regression. KNN classifies a data point based on the majority of its nearest neighbors in the feature space. The method makes no assumptions about the distribution of the data, making it very flexible and effective for a wide range of problems. However, its performance can degrade when dealing with high-dimensional data due to the “curse of dimensionality” (Comito, et al, 2019).

Linear regression, another basic machine learning technique, models the relationship between a scalar dependent variable and one or more independent variables. Simple linear regression involves a single independent variable, while multiple linear regression can handle multiple predictors. This technique is widely used in economics, health care, and social sciences to understand the influence of various factors on an outcome. Its versatility in predicting continuous outcomes makes it a key tool in predictive analytics.

These algorithms, although varying in complexity, are critical to building accurate models in a variety of fields, such as finance, health care, and social media analytics. The SVM (Support Vector Machine) is a supervised learning model that analyzes data for order and relapse investigation. In addition to conducting direct grouping, SVMs can effectively use a technique known as the part stunt to play out a nonstraight characterisation, verifiably planning their contributions to high-dimensional element spaces.

Random Forests are a group learning technique for characterization, relapse, and various assignments that produce the class that is the method of the classes (order) or mean/normal forecast (relapse) of the individual trees by developing a large number of decision trees at preparation time. Choice trees have a tendency to overfit their preparation set in irregular choice woodlands. Although irregular woodlands typically encircle preferred trees, their accuracy is inferior to that of angled-helped trees. In every situation, the presentation of the information can be affected by its properties.

Make comparisons between the algorithms.

The analysis and presentation of the authors’ findings on this topic was all fairly strong. Most often used metrics to assess the algorithms were:

$$Pr = \frac{TP}{TP+FP} \tag{1}$$

Precision (Pr): Precision is the ratio of true positives (TP) to the total number of predicted positives, which includes both true positives (TP) and false positives (FP). This reflects how many of the objects that the model classified as positive are actually positive. Precision is important in scenarios where false positives are costly or undesirable.

$$\text{recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

Recall (or Sensitivity): Recall is the ratio of true positives (TP) to the total number of true positives, which includes both true positives (TP) and false negatives (FN). It measures the ability of the model to correctly identify all relevant cases in the dataset. Recall is especially important in contexts where false negatives are more critical, such as in medical diagnostics.

$$F1 = \frac{2 \text{ precision} * \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \quad (3)$$

F1 Score: The F1 score is the harmonic mean of precision and recall, providing a balanced measure between the two. It is particularly useful when there is a need to balance precision and recall, and is often used when the class distribution is unbalanced.

$$\text{accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+FN+TN+FP} \quad (4)$$

Accuracy: Accuracy is the ratio of correctly predicted cases (both true positives and true negatives) to the total number of cases in the dataset. While accuracy is easy to understand, it can be misleading in imbalanced datasets where the number of negative examples greatly outnumbers the positive ones (Landau, et al, 2022).

These metrics are critical to understanding how well a classification model performs in various aspects, such as identifying true positives, avoiding false positives, and minimizing false negatives. Depending on the context, you may want to prioritize precision, recall, or F1-score over accuracy.

When determining whether the model operates in a relevant manner, those four marks are the most frequently used.

Results and discussion

There are several related research studies on this subject, one of which is mentioned in the introduction. This piece focuses on a few key areas of recent writing on cyberbullying among young people nowadays. We specifically need a better understanding of which young people are most likely to be threats, victims, or observers online, as well as the circumstances that will lead young people to speak out against cyberbullying behavior. The characteristics of current anti-cyberbullying initiatives being used in American schools and the gathering of young people for these activities should be noted as an important component of our investigation. This information will make it easier to decide which mediations need to be strengthened and expanded and which need to be replaced.

Utilizing artificial intelligence to find hate speech in text. The results of applying multiple machine learning techniques to classify hate speech using different feature combinations are compared in this section. The following strategies are among the

most widely used in modern research for building and training classifiers: Picture of decision tree, random forest, naive Bayes, logistic regression, k-nearest neighbors, and support vector machine

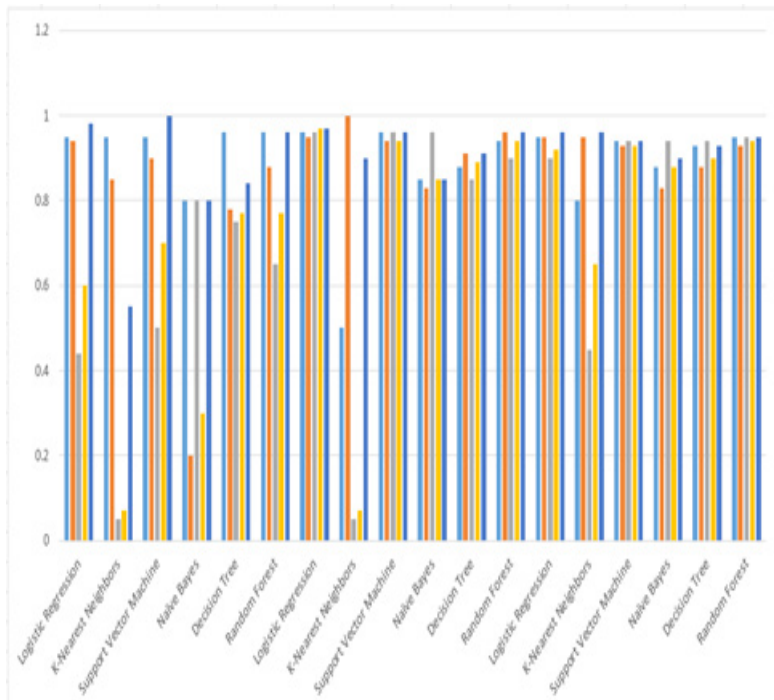


Fig. 2. Comparison of results of classification algorithms

The study synthesizes key findings related to the conceptualization of cyberbullying, making comparisons with traditional bullying, highlighting their common features and varying degrees of severity. Different types of cyberbullying are explored, profiling the characteristics of both cyberbullies and their victims. The impact of cyberbullying on the psychosocial development of young people is also considered, taking into account the factors of age and sexual orientation. In addition, the study delves into the underlying causes of cyberbullying and describes intervention strategies at the individual, organizational and societal levels. Recommendations for young people, parents, educators and schools are presented to effectively address and mitigate the problem from a holistic well-being perspective.

Conclusion. Based on the findings of previous studies, we decided to automate the process of detecting cyberbullying in text data. Our first step was to investigate whether similar studies had been conducted in Kazakhstan or in the former Soviet Union. Although we found some conceptually related works, none of them fully met our specific requirements for the project. This led us to the conclusion that we needed to develop our own autonomous system capable of automatically detecting

cases of cyberbullying and implementing preventive measures. Given the lack of existing tools that could meet our needs, we decided to take on this task ourselves, focusing on creating a customized solution to fill this gap. This approach allowed us to tailor the system to the unique needs of our study and the specific characteristics of the Kazakh digital environment.

References

- Van Hee C., Jacobs G., Emmery C., Desmet B., Lefever E., Verhoeven B., ... & Hoste V. (2018). Automatic detection of cyberbullying in social media text. *PloS one*, 13(10), e0203794. (in English)
- G. Valle-Cano L., Quijano-Sánchez F., Liberatore, and J. Gómez. "Social haterBERT: a dichotomous approach for automatically detecting hate speech on twitter through textual analysis and user profiles," *Expert Systems with Applications*, vol. 216, no. 1, pp. 1-17, 2023. (in English)
- S. Khan, M. Fazil, V. Sejwal, M. Alshara, R. Alotaibi et al., "BiCHAT: BiLSTM with deep CNN and hierarchical attention for hate speech detection," *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 7, pp. 4335-4344, 2022. (in English)
- Kumari K., Singh J. P., Dwivedi Y.K., & Rana N.P. (2020). Towards Cyberbullying-free social media in smart cities: a unified multi-modal approach. *Soft Computing*, 24(15), 11059-11070. (in English)
- H. Elzayady, M. Mohamed, K. Badran and G. Salama, "A hybrid approach based on personality traits for hate speech detection in Arabic social media," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 1979-1988, 2023. (in English)
- I. Ghozali, K. Sungkono, R. Sarno and R. Abdullah, "Synonym based feature expansion for Indonesian hate speech detection," *International Journal of Electrical & Computer Engineering* vol. 13, no. 1, pp. 2088-8708, 2023. (in English)
- Jin-Liang Wang, Linda A. Jackson, James Gaskin, Hai-Zhen Wang, "The effects of Social Networking Site (SNS) use on college student's friendship and wellbeing", *Elsevier, Computers in Human Behavior* 37 (2014). (in English)
- Agrawal S., & Awekar A. (2018, March). Deep learning for detecting cyberbullying across multiple social media platforms. In *European conference on information retrieval* (pp. 141-153). Cham: Springer International Publishing. (in English)
- Rezvan M., Shekarpour S., Balasuriya L., Thirunarayan, K., Shalin, V. L., & Sheth, A. (2018, May). A quality type-aware annotated corpus and lexicon for harassment research. In *Proceedings of the 10th acm conference on web science* (pp. 33-36). (in English)
- Talpur B.A., & O'Sullivan D. (2020). Cyberbullying severity detection: A machine learning approach. *PloS one*, 15(10), e0240924. (in English)
- M. Masadeh, H. Davanager, and A. Muaad, "A novel machine learning-based framework for detecting religious Arabic hatred speech in social networks," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 13, no. 9, pp. 767-776, 2022. (in English)
- Sultan D., Suliman A., Toktarova A., Omarov B., Mamikov S., & Beissenova G. (2021, January). Cyberbullying detection and prevention: Data mining in social media. In *2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)* (pp. 338-342). IEEE. (in English)
- C. Comito, A. Forestiero and C. Pizzuti, "Word embedding based clustering to detect topics in social media," In *2019 IEEE/WIC/ACM Int. Conf. Web Intell. WI 2019, Thessaloniki, Greece*, pp. 192-199, 2019 (in English)
- A. Landau, S. Ferrarello, A. Blanchard, K. Cato, N. Atkins et al., "Developing machine learning-based models to help identify child abuse and neglect: key ethical challenges and recommended solutions," *Journal of the American Medical Informatics Association*, vol. 29 no. 3, pp. 576-580, 2022. (in English)

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.330>

MPHTI: 89.25.21

УДК: 621.01

K.S. Ivanov¹, D.T. Tulekenova^{2*}, 2025.

^{1,2}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after
G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan;

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: dana_tul@mail.ru

ENSURING THE DETERMINABILITY OF MOTION OF AN ADAPTIVE SPACECRAFT DRIVE BY INTRODUCING AN ADDITIONAL VELOCITY CONSTRAINT FORCE

Konstantin Samsonovich Ivanov – professor, doctor of technical sciences, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: ivanovgreek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3750-8081>;

Dana Toleubekovna Tulekenova – senior lector, master of natural sciences, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: dana_tul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9509-4331>.

Abstract: The adaptive drive of a docking mechanism is a critical component in automatic docking systems, widely used in spacecraft, marine vessels, and industrial robots. The primary goal of developing such a drive is to ensure precise and reliable connections between two objects under variable external conditions and within limited maneuvering space.

The reliable adaptation of a two-movable self-regulating mechanical drive consists in self-adaptability to an external load balancing friction clutch, which ensures the connection of the friction moment with the relative angular velocity. Recent studies of the interaction of force and kinematic parameters, reported at a Symposium dedicated to the 60th anniversary of the MMT journal, have opened up the possibility of creating an additional connection without losing the degree of freedom. Such a connection can be obtained by replacing the action of the above reaction with the action of the friction moment in the hinge of the intermediate link. The friction moment creates a force connection, which is taken into account in the equilibrium condition, and the friction joint retains relative mobility. The obtained equilibrium conditions ensure the definiteness of motion and the ability of self-regulation in the form of an inversely proportional dependence of the speed of the output link depending on the variable external load. The described method makes

it possible to create a fundamentally new class of self-regulating mechanisms in all branches of technology.

The developed mathematical model of the existing central-type docking mechanism can be used for an adaptive drive docking mechanism by using the above simplifications of the changes. The paper briefly formulates the basics of the theory of power adaptation of a gear drive and develops a prototype of an adaptive drive for the docking mechanism of a spacecraft.

Key words: self-regulating transmission, planetary mechanism, force adaptation, mathematical model, design, simulation

К.С. Иванов¹, Д.Т. Тулекенова^{2*}, 2025.

^{1,2}Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы, Қазақстан;

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: dana_tul@mail.ru

ЖЫЛДАМДЫҚ БАЙЛАНЫСЫНЫҢ ҚОСЫМША КҮШІН ЕНГІЗУ АРҚЫЛЫ ҒАРЫШ АППАРАТЫНЫҢ БЕЙІМДЕЛГЕН ЖЕТЕК ҚОЗҒАЛЫСЫНЫҢ АЙҚЫНДЫЛЫҒЫН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ

Константин Самсонович Иванов – профессор, техника ғылымдарының докторы, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: ivanovgreek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3750-8081>;

Дана Толеубековна Тулекенова – аға оқытушы, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: dana_tul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9509-4331>.

Аннотация: Қондыру механизмінің бейімделген жетегі ғарыш аппараттарында, теңіз кемелерінде және өнеркәсіптік роботтарда кеңінен қолданылатын автоматты қондыру жүйелерінің маңызды құрамдас бөлігі болып табылады. Мұндай жетекті дамытудың негізгі мақсаты – сыртқы жағдайларға бейімделетін және маневр жасау үшін шектеулі кеңістікте екі нысанның дәл және сенімді байланысын қамтамасыз ету.

Екі дәрежелі өзін-өзі реттейтін механикалық жетектің сенімді бейімделуі үйкеліс моментінің салыстырмалы бұрыштық жылдамдықпен байланысын қамтамасыз ететін жүктемені теңестіретін сыртқы үйкеліс муфтасына өзін-өзі реттеу болып табылады. ММТ журналының 60 жылдығына арналған Симпозиумда баяндалған күш пен кинематикалық параметрлердің өзара әрекеттесуі туралы соңғы зерттеулер еркіндік дәрежесін жоғалтпай қосымша байланыс орнатуға мүмкіндік берді. Мұндай байланысты жоғарыда аталған реакцияның әрекетін аралық буынның топсасындағы үйкеліс моментінің әсерімен алмастыру арқылы алуға болады. Үйкеліс моменті тепе-теңдік жағдайында ескерілетін күш байланысын тудырады, ал үйкеліс буыны салыстырмалы қозғалғыштығын сақтайды. Алынған тепе-теңдік шарттары

қозғалыстың анықтығын және ауыспалы сыртқы жүктемеге байланысты шығыс байланысының жылдамдығының кері пропорционалды тәуелділігі түрінде өзін-өзі реттеу қабілетін қамтамасыз етеді. Сипатталған әдіс технологияның барлық салаларында өзін-өзі реттейтін механизмдердің түбегейлі жаңа класын құруға мүмкіндік береді.

Қолданыстағы орталық типті қондыру механизмінің математикалық моделін жоғарыда келтірілген өзгертулерді жеңілдету арқылы бейімделген жетекті қондыру механизмі үшін пайдалануға болады. Мақалада беріліс вариаторының күштік бейімделу теориясының негіздері қысқаша сипатталған және ғарыш аппаратының қондыру механизмі үшін бейімделген жетектің прототипі жасалған.

Түйін сөздер: бейімделген тісті жетек, күштік бейімделу, планетарлық тісті механизм, математикалық моделі, жобалау, моделдеу.

К.С. Иванов¹, Д.Т. Тулекенова^{2*}, 2025.

^{1,2}Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева,
Алматы, Казахстан;

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан.
E-mail: dana_tul@mail.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПРЕДЕЛИМОСТИ ДВИЖЕНИЯ АДАПТИВНОГО ПРИВОДА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ВВЕДЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИЛЫ СКОРОСТНОЙ СВЯЗИ

Константин Самсонович Иванов – профессор, доктор технических наук, Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан, E-mail: ivanovgreek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3750-8081>;

Дана Толеубековна Тулекенова – старший преподаватель, магистр естественных наук, Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан, E-mail: dana_tul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9509-4331>.

Аннотация. Адаптивный привод стыковочного механизма является важнейшим компонентом систем автоматической стыковки, широко используемых в космических аппаратах, морских судах и промышленных роботах. Основная цель разработки такого привода – обеспечить точное и надежное соединение двух объектов в изменяющихся внешних условиях и в ограниченном пространстве для маневрирования.

Надежная адаптация двухподвижного саморегулирующегося механического привода заключается в самоприспособляемости к внешней уравновешивающей нагрузке фрикционной муфте, обеспечивающей связь фрикционного момента с относительной угловой скоростью. Последние исследования взаимодействия силовых и кинематических параметров, представленные на Симпозиуме, посвященном 60-летию журнала ММТ, открыли возможность создать дополнительную связь без потери степени

свободы. Такая связь может быть получена путем замены действия вышеупомянутой реакции действием фрикционного момента в шарнире промежуточного звена. Фрикционный момент создает силовую связь, учитываемую в условии равновесия, а фрикционный шарнир сохраняет относительную подвижность. Полученные условия равновесия обеспечивают определенность движения и способность саморегулирования в виде обратной пропорциональной зависимости скорости выходного звена в зависимости от переменной внешней нагрузки. Описанный способ позволяет создать принципиально новый класс саморегулирующихся механизмов во всех отраслях техники.

Разработанная математическая модель существующего стыковочного механизма центрального типа может быть использована для стыковочного механизма с адаптивным приводом благодаря вышеописанным упрощениям и модификациям. В статье кратко излагаются основы теории силовой адаптации зубчатого привода и разрабатывается прототип адаптивного привода для стыковочного механизма космического аппарата.

Ключевые слова: саморегулирующаяся трансмиссия, планетарный механизм, силовая адаптация, математическая модель, проектирование, моделирование.

Introduction. The existing drive has a limited range of action due to the lack of sufficient conditions for determining the movement of the required power factor of the existing design is not enough to achieve the required control range. The existing total moment of friction in kinematic pairs turned out to be insufficient to achieve a practical control range (Syromyatnikov, et al., 1984).

The drive mechanism of a spacecraft docking system is a critical component that ensures the precise and reliable connection between two spacecraft. This mechanism must operate effectively in the unique and challenging environment of space, which includes factors such as weightlessness, high relative velocities, and potential external disturbances. One innovative approach to improving the control and determinacy of the docking mechanism drive is through the introduction of additional velocity coupling forces (Fehse, et al., 2003).

The drive mechanism of a spacecraft docking system plays a vital role in ensuring successful and reliable docking operations. By incorporating additional velocity coupling forces into the control system, the docking mechanism can achieve higher levels of precision, stability, and adaptability. This approach addresses the challenges posed by the space environment and enhances the overall performance and reliability of the docking process (Boesso, et al., 2013).

Docking mechanisms have been employed in space missions for more than 50 years. With the start of the Space Stations era, the new concept of standardization was born and the contribution of different participants from various countries led to the definition of common design requirements (Yaskevich, 2019).

Materials and methods of research.

1) The proposed solution for the drive of the docking mechanism.

Fig. 1 shows one of the options for an illustrative example of a spacecraft docking mechanism drive. In the drive of the tightening device, two duplicate electric motors 1 relate to the output shaft 5 through locking clutches 2, planetary mechanism (differential) 3 and two planetary gears 4.

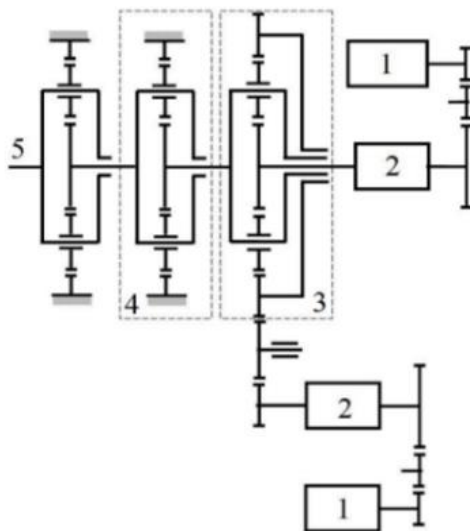


Figure 1. An example of drive of docking mechanism as a kinematic design: planetary unit-4,5; planetary gear-3; motors-1,2 (Golubev, 2019).

The locking clutches prevent transmission of motion from the main wheels of the differential to the electric motors.

The drives of electromechanical docking devices use DC collector motors. Permanent magnet motors in four-pole design, with a duplicated brush assembly and armature winding, as practice shows, are highly reliable. These motors have a high ratio of starting torque to nominal torque for the applied power range ($M_p/M_n = 5...10$) and therefore have a good overload capacity, which favorably affects the reliability of the drives, but requires the use of safety couplings. Despite the presence of a brush collector, the engines have good performance in vacuum. To further increase the life of engines and other elements in outer space, it is possible to completely seal housings, use AC motors, brushless DC motors. Disadvantages of motors can be indicated in: need for on-board DC-to-AC converters; large mass and dimensions of the engines themselves; lower efficiency (for low-power engines); 4) worse overload capacity (lower starting torque multiplicity $M_p/M_n = 1.5 \dots 2$).

Disadvantages of the existing drive of the docking mechanism: 1. The complexity of the design; 2. Large dimensions and weight; 3. Large energy losses; 4. Relatively low reliability.

2) Design of an adaptive drive.

The proposed design is based on previous works for new design of a gear drive. The adjustable drive proposed in this paper contains an electric motor and a gear variator. Adaptive gear variator contains input driver , closed loop of gears 1–2–3–6–5–4 a closed loop of gears and an output driver . The closed loop contains the input satellite 2, solar wheel unit 1-4, ring wheel unit 3-6 and output satellite 5 (Ivanov, 2019).

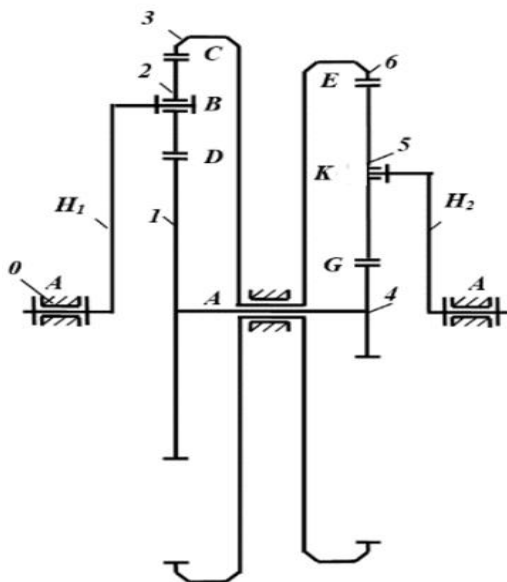


Figure 2. Kinematic scheme of the proposed adaptive drive

The drive in Fig. 2 is considered to replace the existing drive Fig. 1 of the spacecraft docking mechanism.

The formulation of the problem of force analysis of a mechanism with two degrees of freedom (Fig. 2) and with two inputs is as follows: according to the given external forces, reactions in kinematic pairs and generalized external forces F_{H1} and F_{H2} are determined (or moments $M_{H1} = F_{H1}r_{H1}$ and $M_{H2} = F_{H2}r_{H2}$) on the two input leads H_1 and H_2 . The force analysis should begin by considering the structural group 1-2-3-6-5-4 in the form of a four-link closed circuit consisting of gears. The structural group contains a block of solar wheels 1-4, satellite 2, a block of epicyclic wheels 3-6 and satellite 5.

These conditions can be represented as equilibrium conditions based on the principle of possible displacements.

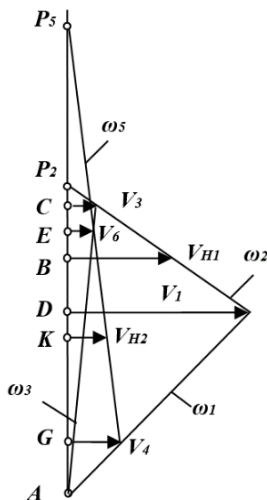


Figure 3. Linear velocity plan of the adaptive drive

Linear velocities are determined using known angular velocities and wheel radii using the formula $V_i = \omega_i r_i$.

A closed loop allows you to create static equations. Let's make up the equilibrium conditions for the links of the contour 2 and 5.

$$R_{12} + R_{32} = F_{H1}, \quad (1)$$

$$R_{45} + R_{65} = F_{H2}. \quad (2)$$

For satellite 2, we obtain from the equations of moments

$$R_{12} = 0.5F_{H1}, \quad (3)$$

$$R_{32} = 0.5F_{H1} \quad (4)$$

Multiply equation (3) by V_1 (the velocity of the point D of the satellite 2 or the circumferential velocity of the wheel 1). Multiply equation (4) by (the velocity of the satellite point 2 or the circumferential velocity of the gear 3).

$$R_{12}V_1 = 0.5F_{H1}V_1 \quad (5)$$

$$R_{32}V_3 = 0.5F_{H1}V_3 \quad (6)$$

Add up equations (5) and (6).

$$R_{12}V_1 + R_{32}V_3 = 0.5F_{H1} V_3 \quad (7)$$

According to the linear velocity plan of the mechanism (Fig. 3) $0.5 V_3 = V_H$ where V_{H1} is the velocity of point B the satellite point 2 or the circumferential velocity of the carrier H_1 .

Then from equation (7) we obtain the equilibrium equation of satellite 2 according to the principle of possible displacements using capacities instead of work

$$R_{12}V_1 + R_{32}V_3 = F_{H1}V_{H1} \quad (8)$$

In a similar way, we obtain the equilibrium condition of the satellite 5

$$R_{45}V_4 + R_{65}V_6 = F_{H2}V_{H2} \quad (9)$$

Where V_4, V_6, V_{H2} are the velocities of the points E, G, K of the satellite 5 or the circumferential velocities of the wheels 4, 6 and the carrier H_2 .

Using equations (8), (9) it is possible to obtain an equilibrium equation based on the principle of possible displacements for the entire mechanism. Add up the equations (8), (9)

$$R_{12}V_1 + R_{32}V_3 + R_{45}V_4 + R_{65}V_6 = F_{H2}V_{H2} + F_{H2}V_{H2} \quad (10)$$

It is convenient in equation (10) to convert the linear parameters of the satellites into the angular parameters of the central wheels, as well as the linear parameters of the drivers into angular parameters.

To do this, we will use a replacement according to the formula. $V = \omega r$ with the appropriate indices for speeds, and for forces, we will replace reactions on satellites with reactions applied to the central wheels according to the $R_{12} = -R_{21}$ principle, etc.

$$-R_{12}\omega_1 r_1 - R_{23}\omega_3 r_3 - R_{54}\omega_4 r_4 - R_{56}\omega_6 r_6 = F_{H1}\omega_{H1} r_{H1} + F_{H2}\omega_{H2} r_{H2} \quad (11)$$

The product of the force by the radius determines the moment using the appropriate indices. Equation (11) will take the form

$$-M_{21}\omega_1 - M_{23}\omega_3 - M_{54}\omega_4 - M_{56}\omega_6 = M_{H1}\omega_{H1} + M_{H2}\omega_{H1} \quad (12)$$

Equation (12) contains the parameters of all the links of the mechanism and represents the equilibrium equation of the entire mechanism according to the principle of possible displacements. Note that such an equation can be composed only if there is a closed loop.

Let's transform equation (12) considering the equality of the angular velocities of the wheels in the wheel blocks $\omega_4 = \omega_1, \omega_6 = \omega_3$

$$-M_{21}\omega_1 - M_{23}\omega_3 - M_{54}\omega_1 - M_{56}\omega_3 = M_{H1}\omega_{H1} + M_{H2}\omega_{H1} \quad (13)$$

According to equation (13), the sum of the powers of the moments of internal forces on the blocks of the central wheels 1-4 and 3-6 is equal to the sum of the powers of the moments of external forces on the input drivers.

On the left side of equation (13), there is a sum of capacities (corresponding to the sum of work) of the internal forces of the contour. The connections in the kinematic pairs of the contour are ideal and stationary. The work of external forces cannot turn into the work of internal forces. Therefore, the work (power) of internal forces on possible displacements is zero

$$M_{21}\omega_1 + M_{23}\omega_3 + M_{54}\omega_1 + M_{56}\omega_3 = 0 \quad (14)$$

The right side of equation (13) is the sum of the capacities (corresponding to the sum of the work) of the external forces of the contour. When condition (14) is fulfilled, we obtain from equation (13) the equilibrium condition for external forces according to the principle of possible displacements.

$$M_{H1}\omega_{H1} + M_{H2}\omega_{H2} = 0 \quad (15)$$

Equation (15) analytically represents an additional connection to the static conditions between the parameters of the kinematic chain. Consequently, a closed loop in a conventional kinematic circuit with two degrees of freedom and two input links also imposes an additional connection on the movement of the links.

Equation (15) allows us to determine the output angular velocity.

The combination of two degrees of freedom with additional coupling ensures the dependence of the output angular velocity on the external load. This property follows from the formula (15)

$$\omega_{H2} = M_{H1} \omega_{H1} / M_{H2} \quad (16)$$

Here M_{H1} is the input driving torque, and M_{H2} is the output torque of the resistance (external load).

Equation (16) expresses the main theoretical result – the effect of force adaptation in mechanics. The effect of force adaptation has the following essence: for given constant input power parameters and a given output moment of resistance, the output angular velocity is inversely proportional to the variable output moment of resistance.

Results and discussion.

The CAD design of adaptive drive in Fig. 2. is a self-regulating mechanism.

An experiment was conducted with an adaptive drive. At the beginning, it is considered when the adaptive drive is made of metal (Fig. 5). The second case is when the adaptive drive is made of plastic (Fig. 8).

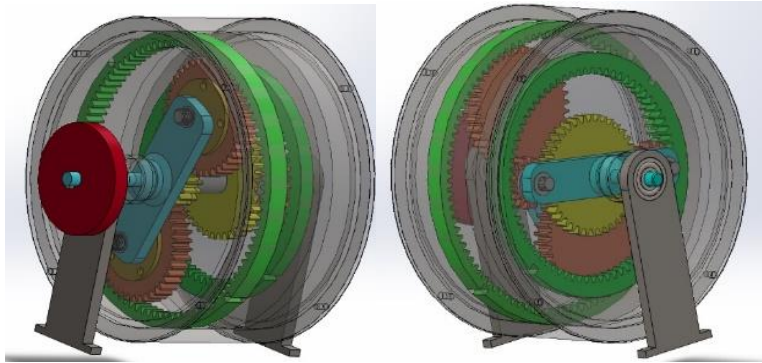


Fig. 4.1.

Fig. 4.2.

Figure 4. Structural description of a three-dimensional adaptive drive model left view (4.1) and right view (4.2)

The module is equal to two, the number of teeth is shown in Table 1.

Table 1. Number of teeth and radius for gears in Fig.4

Gear	Number of teeth	Diameter (mm)
Input sun gear, Z1	40	80
Input satellite, Z2	16	32
Input ring gear, Z3	72	144
Output sun gear, Z4	16	32
Output satellite, Z5	40	80
Output ring gear, Z6	96	192

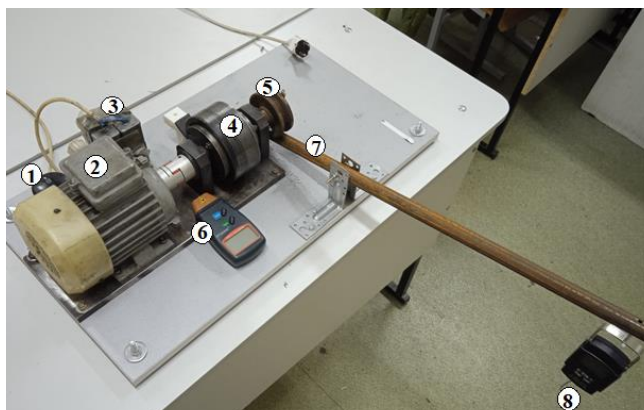


Figure 5. The prototype design of the metal Adaptive drive (Ivanov, 2019)

Fig. 5 shows the prototype of metal adaptive drive and consists of the following parts: 1 – the switch, 2 – motor, 3 – battery, 4 – adaptive drive, 5 – pulley, 6 – device for measuring angular velocity, 7 – lever, 8 – load.

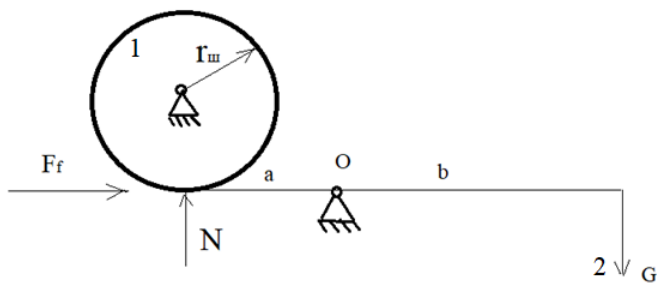


Figure 6. Torque sensor using a dynamometer

Fig. 6 shows the prototype of metal adaptive drive and consists of the following parts: 1 – pulley; 2 – load; a and b – lever arms.

The experimental moment is found by this formula.

$$M_f = Nf r_{III} \tag{17}$$

$$\text{Friction power} \quad P_f = M_f \omega_f \tag{18}$$

where $M_f \omega_f$ – an additional non-holonomic connection or connection that introduces force restrictions, but does not change the number of degrees of freedom equal to two.

$$\text{where} \quad F_f = Nf, \quad Na = Gb, \quad N = Gb/a, \quad G=mg \tag{19}$$

here N – normal force, f – coefficient of friction, $f = 0.6$, G – gravity; r_{III} – pulley radius; a , b – lever arms. The results of the experiment of a metal adaptive drive at

$$\omega_{H1} = 155,5 \text{ s}^{-1}, \quad M_{H1} = 1,6 \text{ Nm}$$

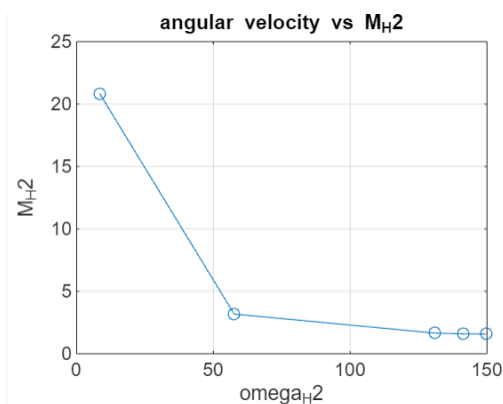


Figure 7. Computed output moment of resistance from the output angular velocity

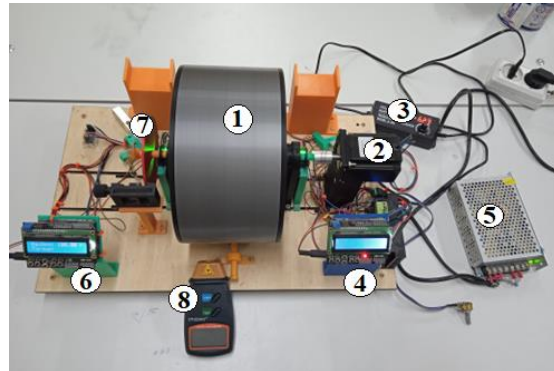


Figure 8. The prototype design of the plastic Adaptive drive (Tulekenova, et al, 2021)

Fig. 8 shows the prototype of adaptive drive and consists of the following parts: Drive: 1 – electric motor, 2 – adaptive gear variator; Test bench: 3 – AC to DC converter, 4 – voltage converter, 5 – input RPM meter, 6 – output RPM meter, 7 – output disc, 8 – device for measuring angular velocity.

The results of the experiment of plastic adaptive drive at $\omega_{H1} = 11,94 \text{ s}^{-1}$, $M_{H1} = 1,8 \text{ Nm}$

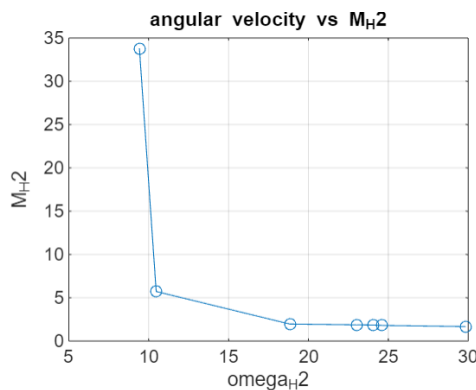


Figure 9. Computed output moment of resistance from the output angular velocity

As shown in (Fig.7) and (Fig.9) the output angular velocity decreases and the output torque increases accordingly. These graphs show the dependence of the output moment of resistance on the output angular velocity from numerical calculation, from the CAD model and the experimental sample. This explains the operating mode of the power adaptation of the drive.

The readings of the speed counters on the test bench correspond to the theoretical values obtained. Fig. 6 shows the traction characteristic of the prototype of a toothed adaptive variator in the form of a graph of the change in the traction torque on the output shaft in Nm depending on its rotation speed in rad/sec. The theoretical

results are consistent with the test results on the stand. A closed loop as part of a kinematic chain with two degrees of freedom, in the presence of ideal connections, provides confidence in movement both in a state with two degrees of freedom and in a state with one degree of freedom.

Conclusion. The experiment confirms the presence of definability of movement and the effect of force adaptation. The adaptive drive with two degrees of freedom was developed considering aspects of mechanical design and kinematic modeling. The design of the adaptive drive is shown in the kinematic diagram. The mathematical model with an adaptive drive reduces loads over the entire range of initial docking conditions and allows you to implement specified external design constraints and the possibility of docking with nodes with different shapes of the receiving cone due to a slight narrowing of the set of permissible combinations of parameters from this range: 1) A scheme for actuating a coupling mechanism with an adaptive drive has been developed, based on the design requirements for the drive. The drive is greatly simplified. The brake motor, an additional degree of freedom, a differential mechanism, planetary mechanisms (2) and a control system that changes the gear ratio to the output shaft have been replaced. 2) The main design parameters of the adaptive drive (engagement module, number of teeth, gear ratio adjustment range, etc.) are calculated. 3) A dynamic analysis of the driving modes is carried out. 4) The analysis confirmed the advantages of the developed drive design.

Литература

Сыромятников В.С. (1984) Стыковочные устройства космических аппаратов. Машиностроение, Москва. 216 с. (in Russian)

Langley R.D. (1972) Apollo experience report – the docking system. NASA Technical note, NASA TN D-6854, NASA. (in English)

Paine T.O., Fentress C.E. (1970) Expanding center probe and drogue. Patent US3526372. (in English)

Armstrong W.W. (1979) Recursive solution to the equation of motion of an n-link manipulator. Proc. of 5 World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, Montreal, P. 343-1346. (in English)

Olivieri L. (2012) Design of docking mechanism for small spacecraft. CISAS “G. Colombo”, University of Padova, Italy, P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.02.004>. (in English)

Boesso, A., Francesconi, A. (2013) ARCADE small-scale docking mechanism for micro-satellites. Acta Astronautica 86, P. 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.01.006> (in English)

Lion L., Caon A., Olivieri L., Francesco F., Francesconi A. (2023) Kinematic tests on a docking mechanism for microsatellites. CEAS Space Journal, Springer, Vol. 16, P. 56-63. doi: 10.21203/rs.3.rs-3745650/v1 (in English)

Kyoichi Ui, et al. (2005) Microgravity experiments of nano-satellite docking mechanism for final rendezvous approach and docking phase. Microgravity-Science and Technology, Vol. (17)3, P.56-63. doi: 10.1007/BF02872088 (in English)

Fehse, W. (2003) Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft. Cambridge University Press, Cambridge. (in English)

McFatter, J., Keiser, K., Rupp, T. (2018) NASA Docking System Block 1: NASA’s new direct electric docking system supporting ISS and future human space exploration. In: 44th Aerospace Mechanisms Symposium, P. 471-484. (in English)

Golubev Y. F., Yaskevich A.V. (2019) Computer simulation of dynamics of central type docking

mechanisms for spacecraft. Preprint IPM M.V. Keldysh. doi:10.20948/prepr-2019-89. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-89>, №. 89. P. 40. (in English)

Yaskevich A. (2014) Real time simulation of contact interaction during spacecraft docking and berthing. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, V.4(1), P. 1–15. (in English)

Yaskevich A.V. (2017) Kinematic scheme of the pin-cone type docking mechanism for promising spacecraft. V.4(19). *Space technics and technology*. Moscow, P. 95–104. (in English)

Golubev Y.F., Yaskevich A.V. (2019) Computer modeling of the dynamics of the peripheral elastic-adaptive docking mechanism of spacecraft // *Preprints of IPM named after M.V. Keldysh*, V.76. P.34. doi:10.20948/prepr-2019-76. (in English)

Ivanov K.S. (2019) Prospects of Creation of Mechanisms with Two Degree of Freedom. IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science. *Advances in Mechanism and Machine Science*. Springer Nature Switzerland AG, P. 937-946. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_93. (in English)

Ivanov K.S. (2019) Prospects of Creation of Mechanisms with Two Degree of Freedom. IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science. *Advances in Mechanism and Machine Science*. Springer Nature Switzerland AG, P. 937-946. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_93. (in English)

Ivanov K.S., Ceccarelli M., Tulekenova D.T. (2021) An Adaptive Drive of Spacecraft Docking Mechanism. *Mechanisms and Machine Science*, Springer, 2021, Vol.103, P. 168-178. DOI: 10.1007/978-3-030-75271-2_18. (in English)

Tulekenova, D.T., Ivanov K.S., Ceccarelli, M. (2024) Design of an Adaptive Drive for Spacecraft Docking Mechanism. *Mechanisms and Machine Science*. *Proceedings of IFToMM Asian MMS 2024, MMS*, Springer. P. 52–61. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_7. (in English)

References

Syromyatnikov V.S. (1984) *Stykovochnye ustrojstva kosmicheskikh apparatov [Spacecraft docking devices. Mechanical engineering]*. Mashinostroenie, Moskva. - 216 p. (in Russian)

Langley R.D. (1972) Apollo experience report – the docking system. NASA Technical note, NASA TN D-6854, NASA. (in English)

Paine T.O., Fentress C.E. (1970) Expanding center probe and drogue. Patent US3526372. (in English)

Armstrong W.W. (1979) Recursive solution to the equation of motion of an n-link mathnipulator. *Proc. of 5 World Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, Montreal, P. 343-1346. (in English)

Olivieri L. (2012) Design of docking mechanism for small spacecraft. CISAS “G. Colombo”, University of Padova, Italy, P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.02.004>. (in English)

Boesso, A., Francesconi, A. (2013) ARCADE small-scale docking mechanism for micro-satellites. *Acta Astronautica* 86, P. 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.01.006> (in English)

Lion L., Caon A., Olivieri L., Francesco F., Francesconi A. (2023) Kinematic tests on a docking mechanism for microsatellites. *CEAS Space Journal*, Springer, Vol. 16, P. 56-63. doi: 10.21203/rs.3.rs-3745650/v1 (in English)

Kyoichi Ui, et al. (2005) Microgravity experiments of nano-satellite docking mechanism for final rendezvous approach and docking phase. *Microgravity-Science and Technology*, Vol. (17)3, P.56-63. doi: 10.1007/BF02872088 (in English)

Fehse, W. (2003) *Automated Rendezvous and Docking of Spacecraft*. Cambridge University Press, Cambridge. (in English)

McFatter, J., Keiser, K., Rupp, T. (2018) NASA Docking System Block 1: NASA’s new direct electric docking system supporting ISS and future human space exploration. In: 44th Aerospace Mechanisms Symposium, P. 471-484. (in English)

Golubev Y.F., Yaskevich A.V. (2019) Computer simulation of dynamics of central type docking mechanisms for spacecraft. Preprint IPM M.V. Keldysh. doi:10.20948/prepr-2019-89. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-89>, №. 89. P. 40. (in English)

Yaskevich A. (2014) Real time simulation of contact interaction during spacecraft docking and berthing. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, V.4(1), P. 1–15. (in English)

Yaskevich A.V. (2017) Kinematic scheme of the pin-cone type docking mechanism for promising spacecraft. V.4(19). *Space technics and technology*. Moscow, P. 95–104. (in English)

Golubev Y.F., Yaskevich A.V. (2019) Computer modeling of the dynamics of the peripheral elastic-adaptive docking mechanism of spacecraft // *Preprints of IPM named after M.V.Keldysh*, V.76. P.34. doi:10.20948/prepr-2019-76. (in English)

Ivanov K.S. (2019) Prospects of Creation of Mechanisms with Two Degree of Freedom. *IFTToMM World Congress on Mechanism and Machine Science. Advances in Mechanism and Machine Science*. Springer Nature Switzerland AG, P. 937-946. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_93. (in English)

Ivanov K.S. (2019) Prospects of Creation of Mechanisms with Two Degree of Freedom. *IFTToMM World Congress on Mechanism and Machine Science. Advances in Mechanism and Machine Science*. Springer Nature Switzerland AG, P. 937-946. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_93. (in English)

Ivanov K.S., Ceccarelli M., Tulekenova D.T. (2021) An Adaptive Drive of Spacecraft Docking Mechanism. *Mechanisms and Machine Science*, Springer, 2021, Vol.103, P. 168-178. DOI: 10.1007/978-3-030-75271-2_18. (in English)

Tulekenova, D.T., Ivanov K.S., Ceccarelli, M. (2024) Design of an Adaptive Drive for Spacecraft Docking Mechanism. *Mechanisms and Machine Science. Proceedings of IFTToMM Asian MMS 2024, MMS*, Springer. P. 52–61. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_7. (in English)

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 151–167

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.331>

UDC 50.47.29

**M.N. Kalimoldayev¹, Z.D. Ormansha², K.B. Begaliyeva^{2,*}, A.S. Ainagulova²,
A.O. Aukenova², 2025.**

¹Institute of Informatics and Computing Technology, SC MSHE RK,
Almaty, Kazakhstan;

²S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan.

*E-mail: begaliyevakalamkas@gmail.ru

A BLOCKCHAIN MODEL FOR AGRICULTURAL PRODUCT TRACKING THAT SUPPORTS FEDERAL TRAINING

Kalimoldayev M.N. – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, E-mail: mnk@ipic.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0025-8880>;

Ormansha Z.D. – Doctoral student of the specialty „8D06103 - Modeling and optimization of business processes“, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, E-mail: zangar.ormansha@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6223-7650>;

Begaliyeva K.B. – PhD, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, E-mail: kalamkas_b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4216-9184>;

Ainagulova A.S. – Candidate of Technical Sciences, Acting Assoc.Professor, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, E-mail: aliya080982@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9354-2180>;

Aukenova A.O. – Senior Lecturer at the Department of Computer Science, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, E-mail: ai-k-a@mail.ru, 0000-0003-3442-32-15.

Abstract. The article presents an integrated blockchain model for monitoring agricultural products, enhanced by federated learning technology. The study aims to improve transparency, security in agricultural supply chains through decentralized data processing and artificial intelligence insights. A review of global literature on the topic identifies the limitations of existing systems, and a comparative analysis is presented using a Venn diagram. The methodology involves designing blockchain architecture, developing a privacy-focused federated learning model, and integrating and testing the systems.

The results indicate that the proposed model effectively enhances data integrity, security, and confidentiality. The use of IoT sensors and decentralized processing enables real-time monitoring of agricultural products. Furthermore, federated learning facilitates decentralized data processing while preserving the confidentiality of agricultural information and reducing reliance on centralized systems. This

approach minimizes cybersecurity risks and enhances overall system reliability. The article explores future research directions, including the development of eco-friendly consensus algorithms and the integration of blockchain with artificial intelligence to enhance sustainability in agriculture.

This research contributes to the field by demonstrating how blockchain and federated learning can complement each other in creating an intelligent and secure agricultural tracking system. The implementation of the proposed model can significantly improve food safety, regulatory compliance, and consumer trust by ensuring transparency and accountability. The findings provide valuable insights for researchers and industry professionals interested in optimizing digital transformation and agricultural traceability in the agri-food sector.

Keywords: blockchain, agricultural product tracking, federated learning, decentralization, data privacy.

**М.Н. Калимолдаев¹, З.Д. Орманша², К.Б. Бегалиева^{2*},
А.С. Айнагулова², А.О. Аукунова², 2025.**

¹Информатика және есептеу технологиялық институты, ҒК ЖБЖҒМ,
Алматы, Қазақстан;

²С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Астана, Қазақстан.

*E-mail: kalamkas_b@mail.ru

ФЕДЕРАТИВТІ ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАЙТЫН АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ӨНІМДЕРІН БАҚЫЛАУҒА АРНАЛҒАН БЛОКЧЕЙН МОДЕЛІ

Калимолдаев М.Н. – физика-математика ғылымдарының докторы, ҚР ҰҒА академигі, Алматы, Қазақстан, E-mail: mnk@ipic.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0025-8880>;

Орманша З.Д. – «8D06103-Бизнес үдерістерін модельдеу және оңтайландыру» мамандығының 2-курс докторанты, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: zangar.ormansha@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6223-7650>;

Бегалиева К.Б. – философия докторы (Phd), Компьютерлік ғылымдар кафедрасының аға оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: kalamkas_b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4216-9184>;

Айнагулова А.С. – техника ғылымдарының кандидаты, Компьютерлік ғылымдар кафедрасының ассоц.профессор м.а., С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: aliya080982@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9354-2180>;

Аукунова А.О. – магистр, компьютерлік ғылымдар кафедрасының аға оқытушысы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: ai-k-a@mail.ru, 0000-0003-3442-32-15.

Аннотация. Мақалада федеративті оқыту технологиясымен жетілдірілген ауыл шаруашылық өнімдерін бақылауға арналған интеграцияланған блокчейн моделі ұсынылады. Зерттеу орталықтандырылмаған деректерді өңдеуді және жасанды интеллектке негізделген түсініктерді пайдалану арқылы ауылшаруашылық жеткізу тізбегіндегі ашықтықты, қауіпсіздікті және тиімділікті арттыруға бағытталған. Зерттеу тақырыбы бойынша әлемдік

әдебиеттерді шолып, қазіргі жүйелердің шектеулерін анықталды, Венн диаграммасы арқылы салыстырмалы талдау ұсынылды. Ұсынылған әдістемеді бірнеше кезеңдер қарастырылған: блокчейн архитектурасын жобалау, деректердің құпиялылығын сақтау үшін федеративті оқыту моделін құру және аталған жүйелерді интеграциялау мен тестілеу сияқты бірнеше кезеңдік тәсіл баяндалады.

Нәтижелер ұсынылған модельдің деректердің тұтастығын, қауіпсіздігін және құпиялылығын арттыруға тиімді екенін көрсетеді. IoT сенсорлары мен орталықсыздандырылған өңдеуді пайдалану арқылы модель нақты уақыт режимінде мониторинг жүргізуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, федеративтік оқыту орталықтандырылған жүйелерге тәуелділікті азайта отырып, ауылшаруашылық құпия деректерінің құпиялылығын сақтай отырып, орталықтандырылмаған деректерді өңдеуге мүмкіндік береді. Бұл орталықтандырылмаған тәсіл киберқауіпсіздік тәуекелдерін азайтады және жүйенің жалпы сенімділігін арттырады. Мақала экологиялық таза консенсус алгоритмдерін әзірлеу және блокчейн мен жасанды интеллект интеграциясын ауыл шаруашылығында тұрақтылықты арттырудың болашақ зерттеу бағыттары ретінде қарастырады.

Бұл зерттеу ауыл шаруашылығын қадағалаудың зияткерлік және қауіпсіз жүйесін құру үшін блокчейн мен федеративті оқытудың бір-бірін қалай толықтыра алатындығын көрсету арқылы салаға үлес қосады. Сонымен қатар, ұсынылған модельді енгізу негізінде бақылану мен есеп беруді қамтамасыз ету арқылы азық-түлік қауіпсіздігін, нормативтік талаптарға сәйкестікті және тұтынушылар арасындағы сенімділікті айтарлықтай жақсарты алады. Қорытындылар азық-түлік өнеркәсібіндегі ауылшаруашылық қадағалауды және цифрлық трансформацияны оңтайландыруды көздейтін зерттеушілерге және сала мамандары үшін құнды түсінік береді.

Түйін сөздер: блокчейн, ауылшаруашылық өнімдерін бақылау, федеративті оқыту, орталықсыздандыру, деректердің құпиялылығы.

**М.Н. Калимолдаев¹, З.Д. Орманша², К.Б. Бегалиева^{2*}, А.С. Айнагулова²,
А.О. Аукенова², 2025.**

¹Институт информатики и вычислительной технологии, КН МНВО РК,
Алматы, Казахстан;

²Казахский агротехнический исследовательский университет
им. С. Сейфуллина, Астана, Казахстан.

*E-mail: kalamkas_b@mail.ru

БЛОКЧЕЙН-МОДЕЛЬ ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С ПОДДЕРЖКОЙ ФЕДЕРАТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ

М.Н. Калимолдаев – доктор физико-математических наук, академик НАН РК, Алматы, Казахстан, E-mail: mnk@ipic.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0025-8880>;

З.Д. Орманша – докторант специальности «8D06103 – Моделирование и оптимизация бизнес-процессов», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, E-mail: zangar.ormansha@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6223-7650>;

К.Б. Бегалиева – PhD, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, E-mail: kalamkas_b@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4216-9184>;

А.С. Айнагулова – кандидат технических наук, и.о. асоц.профессора, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, E-mail: aliya080982@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9354-2180>;

А.О. Аукунова – магистр, старший преподаватель кафедры компьютерных наук, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан, E-mail: ai-k-a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3442-32-15>.

Аннотация. Статья представляет интегрированную блокчейн-модель для мониторинга сельскохозяйственной продукции, усовершенствованную с помощью технологии федеративного обучения. Исследование направлено на повышение прозрачности, безопасности и эффективности в цепочках поставок сельского хозяйства за счет использования децентрализованной обработки данных и аналитики на основе искусственного интеллекта. В ходе исследования проведен обзор мировой литературы по данной теме, выявлены ограничения существующих систем и предложен сравнительный анализ с использованием диаграммы Венна. Предлагаемая методология включает несколько этапов: разработку архитектуры блокчейна, создание модели федеративного обучения для обеспечения конфиденциальности данных, а также интеграцию и тестирование данных систем.

Результаты показывают, что предложенная модель эффективно повышает целостность, безопасность и конфиденциальность данных. Использование IoT-сенсоров и децентрализованной обработки позволяет осуществлять мониторинг сельскохозяйственной продукции в режиме реального времени. Кроме того, федеративное обучение обеспечивает децентрализованную обработку данных, сохраняя конфиденциальность сельскохозяйственной информации и уменьшая зависимость от централизованных систем. Такой подход снижает киберриски и повышает общую надежность системы. В статье рассматриваются перспективные направления будущих исследований, включая разработку экологически чистых алгоритмов консенсуса и интеграцию блокчейна с искусственным интеллектом для повышения устойчивости сельского хозяйства.

Данное исследование вносит вклад в отрасль, демонстрируя, как блокчейн и федеративное обучение могут дополнять друг друга при создании интеллектуальной и безопасной системы отслеживания сельскохозяйственной продукции. Внедрение предложенной модели может значительно улучшить безопасность пищевых продуктов, соответствие нормативным требованиям и уровень доверия потребителей за счет обеспечения прозрачности и подотчетности. Выводы исследования представляют ценную информацию для

исследователей и специалистов отрасли, заинтересованных в оптимизации цифровой трансформации и отслеживания сельскохозяйственной продукции в агропромышленном секторе.

Ключевые слова: блокчейн, отслеживание сельскохозяйственной продукции, федеративное обучение, децентрализация, конфиденциальность данных.

Кіріспе. Жасанды интеллект және блокчейн технологиялары ауыл шаруашылығы саласындағы жеткізу тізбегінің ашықтығы мен тиімділігін арттыруда маңызды рөл атқарады. Олар өнім сапасын бақылауды жақсартып, ресурстарды тиімді пайдалануға және тұтынушылардың сенімін арттыруға жаңа мүмкіндіктер ұсынады. Алайда, Акильжанованың зерттеуінде дәстүрлі жеткізу тізбектерінде инфрақұрылымның жетіспеушілігі, деректерді басқару мен қауіпсіздікті қамтамасыз ету мәселелері әлі де өзекті екені анықталды (Акильжанова, et al., 2023).

Қазақстан Президенті Қ.К. Тоқаев ауыл шаруашылығын дамыту және оны тұрақты ету үшін озық технологияларды енгізудің маңыздылығын атап өтуде. Осыған сәйкес, Қазақстан Республикасының агроөнеркәсіптік кешенін дамытудың 2021–2030 жылдарға арналған тұжырымдамасында саланы цифрландыру мен автоматтандырудың маңызына ерекше назар аударылған. Аталған тұжырымдама аясында «өсімдік шаруашылығында қадағалаудың ақпараттық жүйесі енгізіледі, бұл жүйе тұқым шаруашылығы мен дақылдарды өсіру, сақтау және есепке алуды цифрландыруға мүмкіндік береді. Сонымен қатар өнімнің ел ішінде және импорттық жеткізу тізбегіндегі қауіпсіздігін қамтамасыз ете отырып, «сұр» схемалардың алдын алуды көздейді» делінген.

Блокчейн және федеративті оқыту деректердің өзгермейтіндігін қамтамасыз ету және орталықсыздандырылған өңдеу арқылы ақпараттың құпиялылығын сақтай отырып, өнімнің сапасын бақылау мен реттеуде тиімді шешімдер ретінде қолданылуда. Мақаланың мақсаты – деректер құпиялылығын, қадағалауды және қауіпсіздікті қамтамасыз ететін ауыл шаруашылық өнімдерін бақылауға арналған блокчейн UML диаграммасы ұсынылады. Зерттеу аясында блокчейннің өзгермейтін деректер тіркеу қабілетін және федеративті оқытудың деректердің құпиялылығын сақтаудағы тиімділігін біріктіру арқылы жүйе қауіпсіздігін қамтамасыз етудің жаңа әдістері ұсынылады.

Материалдар мен әдістер. Ауыл шаруашылығының жеткізу тізбегінде деректердің ашықтығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін блокчейн және федеративті оқыту технологиялары қолданылады. Ең алдымен екі технологияға қатысты анықтамаларды айқындайық.

Федотованың зерттеуінде блокчейн – «деректердің біртұтас және өзгермейтін архивін қамтамасыз ететін технология» деп сипатталған, ол жүйедегі әрбір қатысушыға бірегей жазбаларға қол жеткізуді және тексеруді қамтамасыз етеді делінсе, Тапскоттың еңбегінде блокчейнді «ақпаратты қауіпсіз және тұрақты түрде сақтауға мүмкіндік беретін, өзгермейтін, орталықсыздандырылған тізбектік жүйе» деп сипаттайды (Федотова, et al.,

2018; Tapscott, et al., 2016). Блокчейнді тек қана қаржылық транзакциялар үшін емес, сонымен қатар әртүрлі саладағы сенімді ақпарат алмасу және қадағалау үшін қолдануға болатынын дәлелдеген. Иманбаева және соавтарларының зерттеуінде блокчейн - ақпаратты орталықсыздандырылған және қауіпсіз түрде сақтауға арналған таратылған тізбектік мәліметтер базасы. Блокчейнде барлық деректер блоктарға топтастырылып, бұрынғы блоктармен байланысып, өзгермейтін тізбек құрады. Әрбір блоктың деректері шифрланған және тізбектегі алдыңғы блокпен байланысқандықтан, ақпарат өзгермейтін және сенімді болып қалады. Бұл технология деректердің қауіпсіздігі мен айқындылығын қамтамасыз етеді, сондықтан оны банкинг, логистика, жеткізу тізбегі және ауыл шаруашылығы сияқты салаларда қолдануға болатынын көрсеткен (Иманбаева, et al., 2008).

«Федеративті оқыту – деректерді орталықсыздандырылған түрде өңдеуге арналған машиналық оқыту әдісі. Федеративті оқыту кезінде деректерді орталық серверге жібермей-ақ, әрбір қатысушы немесе құрылғы өз деректерінде модельді жергілікті деңгейде оқытады. Осылайша, жеке мәліметтер серверге тасымалданбайды, тек алынған модельдің параметрлері ғана орталық серверге жіберіледі» - деп Новикова және соавтарларының зерттеуінде толық сипаттаған (Новикова, et al., 2023). Ал Бектемысованың еңбегінде федеративті оқыту «орталықтандырылмаған деректерді өңдеуге мүмкіндік беретін жүйе» ретінде анықтама берген, мұнда деректер әрбір құрылғыда сақталып, жеке пайдаланушылардың құпиялылығы сақталады. Жүйе тек модельді оқыту нәтижелерін біріктіріп, ортақ үлгіні жаңарту үшін пайдаланатынын дәлелдеген (Бектемысова, et al., 2024).

Жоғарыдағы әр зерттеушінің анықтамаларында блокчейн және федеративті оқыту технологиялары бойынша анықтамалар беріліп, зерттеу мәселелері мен шешімдері ұсынылған. Дегенмен әр технологияның өзіндік ерекшеліктері мен ортақ сипаттамалары бар. Төмендегі сызбада әлемдік зерттеулерді зерттей отырып, екі технологияға Венн диаграммасы арқылы талдау жасалды (Сурет - 1).



Сурет 1 - Блокчейн және федеративті оқыту технологияларын салыстыру диаграммасы

Венн диаграммасында көрсетілген әрбір сипаттама әлемдік зерттеу жұмыстарымен негізделді. Яғни, блокчейн және федеративті оқыту технологиялары ауыл шаруашылығы өнімдерінің жеткізу тізбегіндегі ашықтықты, деректер қауіпсіздігін және құпиялылықты сақтауға бірлесіп ықпал ете алады. Блокчейн орталықсыздандырылған, өзгермейтін деректер тізбегі арқылы әрбір қатысушының деректерді тексеріп, қауіпсіз сақтауға мүмкіндік береді. Бұл технология әсіресе Мухамедованың зерттеуінде көрсетілгендей сенімі шектеулі ортада маңызды, себебі әр қатысушы үшін деректерді тексеру және өзгеріссіз сақтау қамтамасыз етіледі (Мухамедова, et al., 2022). Сонымен қатар, Гальвес еңбегінде блокчейн транзакцияларды қауіпсіз тіркеп, деректердің шынайылығын қамтамасыз ететін белгілі (Galvez, et al., 2018). Алайда, Сахипов блокчейннің үлкен есептеу ресурстарын талап етуі мен энергия шығындары – оның шектеулері болып табылатынын көрсеткен (Сахипов, et al., 2024).

Запечников және соавторлардың еңбегінде федеративті оқыту деректерді жергілікті деңгейде өңдеп, жеке ақпараттың құпиялылығын сақтай отырып, үлгіні оқытуға мүмкіндік беретінін айқындады. (Запечников, et al., 2020). Ал Ян және соавторлары ауыл шаруашылығы саласында федеративті оқыту фермерлердің деректерін жергілікті деңгейде өңдеуді қамтамасыз етіп, модель құруға ықпал ететінін көрсеткен (Yang, et al., 2019).

Блокчейн мен федеративті оқытуды біріктіру, аталған екі технологияның тиімді жақтарын қолдану арқылы ауыл шаруашылығы жеткізу тізбегіндегі бақылауды жақсартады. Блокчейн транзакциялардың қауіпсіздігін қамтамасыз етсе, федеративті оқыту деректердің құпиялылығын сақтай отырып, тиімді талдауды жүзеге асырады. Дегенмен, келесі зерттеушілер тобы екі технологияны бірлесіп қолдануда жоғары есептеу шығындары мен қажетті ресурстарды талап ететін кедергілер барын анықтаған (Qi, et al., 2020; Yin, et al., 2021). Сонымен блокчейн және федеративті оқыту технологияларының ауыл шаруашылығындағы тиімділігін арттыру мақсатында оларды біріктіріп қолдану зерттеудің негізгі бағыты болып табылады. Сондықтан зерттеуде өнімді қадағалаудың инновациялық тәсілін ұсыну үшін бірнеше кезеңдік әдістер қолдану ұсынылады:

Бірінші кезең, модельді әзірлеудің жалпы құрылымы. Зерттеуде ауыл шаруашылығы өнімдерінің әрбір жеткізу кезеңін (фермерлерден тұтынушыларға дейін) тиімді түрде бақылау үшін блокчейн және федералды оқыту технологияларын біріктіру қажетігі қарастырылады. Әдіс жеке деректердің сақталуын қамтамасыз етуге және өнімнің әр кезеңіндегі ақпаратты нақты бақылауға мүмкіндік береді. Екінші кезең, блокчейн архитектурасын әзірлеу. Блокчейн деңгейі өнімдерге қатысты деректерді қорғау және оларды өзгермейтін, орталықсыздандырылған жүйеде тіркеу үшін пайдаланылады. Жүйеде әрбір өнімнің сипаттамасы, тасымалдау уақыты және қоймада сақталу кезеңі туралы мәліметтер транзакция ретінде тіркеледі және барлық ақпараттар блоктар тізбегінде сақталады. Степановтың

еңбегінде деректерді тіркеу кезінде деректердің сенімділігі мен шынайылығы қамтамасыз етіледі, себебі жүйедегі әрбір жаңа транзакция бұрынғы блоктарға тәуелдігін көрсеткен (Степанов, et al., 2023).

Үшінші кезең, федеративті оқыту тәсілін құру. Новикова әрбір фермер немесе жеткізуші жеке деректерін серверге жібермей-ақ, үлгіні жергілікті оқытатынын айқындаған (Новикова, et al., 2023). Кейіннен жергілікті жаңартулар орталық моделге интеграцияланады. Бұл әдіс деректердің құпиялылығын сақтауға және үлгіні орталықтандырылған деректерсіз оқытуға мүмкіндік береді. Кайруз еңбегінде федеративті оқыту әдісі мәліметтерді өңдеудің орталықсыздандырылған жолдарын зерттеу үшін маңызды, өйткені ол деректердің сақталуын қамтамасыз етіп, оқыту нәтижесін жақсартатынын дәлелдеген (Kairouz, et al., 2019).

Төртінші кезең, жүйелерді интеграциялау және тестілеу. Жүйені біріктіру кезеңі блокчейн және федеративті оқыту модульдерін біріктіру арқылы жүзеге асады. Бұл кезеңде блокчейнде тіркелген әрбір өнім туралы ақпарат федеративті оқыту арқылы оқытылады және ақпарат өнімнің бастапқы орнынан тұтынушыға дейінгі қозғалысын қадағалауға мүмкіндік береді (Qi, et al., 2020). Интеграциялау кезінде әрбір кезеңдегі өнімнің жағдайын бағалау үшін федеративті оқыту арқылы алынған нәтижелер қолданылады. Тестілеу кезеңінде блокчейн және федеративті оқыту жүйелерінің сенімділігі, деректердің құпиялылығы және өңдеу уақыты бағаланады. Жүйенің өнімділігі тізбектер арасындағы ақпараттың дәйектілігі, өнім қозғалысын қадағалау қабілеті және деректердің дер кезінде жаңартылу мүмкіндігі арқылы өлшенеді (Кашеварова, et al., 2024).

Бесінші кезең, деректерді жинау және талдау. Almeida зерттеуінде ауыл шаруашылығы өнімдерін қадағалаудың тиімділігін бағалау үшін екі түрлі деректер жинау әдісі қолданылатынын көрсеткен. Біріншісі, нақты деректерді жинау - фермерлер, тасымалдаушылар және бөлшек сауда өкілдері арқылы алынған өнім туралы деректер. Екіншісі, федеративті оқыту арқылы алынған нәтижелерді талдау, фермерлердің өнімді сақтау, тасымалдау және қайта өңдеу тәсілдерін жақсарту үшін қажетті ақпарат алынған (Almeida, et al., 2018).

Алтыншы кезең, қолданылатын әдістердің шектеулері. Блокчейн мен федеративті оқыту мүмкіндіктерін кеңінен пайдаланғанымен, кейбір шектеулер бар. Мысалы, блокчейннің энергия шығындарының көптігі, ал федеративті оқыту әдісінде үлгі дәлдігін қамтамасыз ету үшін жоғары сапалы деректер қажеттілігі бар. Сондай-ақ, Янның федеративті оқыту технологиясының орталықсыздандырылған құрылымында пайдаланушылар арасында деректер сәйкестігін қамтамасыз ету қиын болуы мүмкіндігін айтқан (Yang, et al., 2019). Сондықтан жүйені дамыту кезінде қосымша тестілеулер және түзетулер қажет болады.

Нәтижелер және талқылау. Өзірленген үлгіде блокчейн тізбегін жасау үшін Hyperledger Fabric немесе Corda сияқты рұқсат етілген (permissioned) блокчейн желісіне негізделген бөлінген архитектурасы бар желі қолайлы.

Себебі, блокчейн платформалары жеке және қауіпсіз тізбектерді қолдайды, қатынасты жоғары деңгейде басқаруды қамтамасыз етіп, фермерлер мен басқа қатысушылардың құпия деректерін қорғауға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, деректерді бөлінген өңдеуді қамтамасыз ету үшін федеративті оқыту алгоритмдерімен интеграция жасау мүмкіндігі бар.

Блокчейнге жазылатын деректер:

- Қоршаған орта жағдайлары туралы деректер (температура, ылғалдылық, жарықтандыру) – деректер типі: сандық (float немесе integer).
- Өнімнің орналасқан жері туралы деректер (GPS координаттары, уақыт және күн) – жолдық және уақыт деректер типі.
- Өнімнің күйі (жетілу деңгейі, салмақ, сапа) – сандық және жолдық деректер типі.
- Өнім қозғалысы туралы транзакциялар (күн мен уақыт, жіберуші және қабылдаушы) – уақытжәне жолдық деректер типі.

Тізбектегі әрбір блок жеткізу тізбегі бойынша әрі қарай бақылау үшін негіз ретінде қызмет ететін бірегей өнім идентификаторымен байланысты өнім жазбасын қамтуы мүмкін. Әр жазба негізгі өрістері бар JSON-объект ретінде ұсынылады:

```
{
  «product_id»: «string»,
  «location»: {
    «latitude»: «float»,
    «longitude»: «float»
  },
  «environment_conditions»: {
    «temperature»: «float»,
    «humidity»: «float»,
    «light»: «float»
  },
  «status»: «string»,
  «timestamp»: «ISO 8601 формат»
}
```

Әрбір транзакцияға қол қойылады және деректерді шифрлау үшін AES (Advanced Encryption Standard) шифрлауымен және асимметриялық кілт шифрлау үшін RSA арқылы қорғалады. Деректердің өзгермейтіндігін қамтамасыз ету үшін SHA-256 негізіндегі хэштеу әрбір жазбаны өзгертуге немесе өзгертуге болмайтындығына көз жеткізу үшін пайдаланылады. Әрбір жаңа блоктың хәші бұрмалауға төзімді тізбекті құра отырып, алдыңғы блокқа байланады. Федеративті оқыту орталықтандырылған дерекқорда сақталмаған, бірақ жергілікті түрде талданатын және жалпы үлгі үшін блокчейнде синхрондалған IoT сенсорларынан жергілікті өңделген деректерді біріктіруге көмектеседі. Бұл барлық қатысушылардың деректерінің қауіпсіздігі мен құпиялылығын сақтайды.

Агроөнеркәсіп саласында блокчейн шешімін енгізу үшін Hyperledger Fabric сияқты платформаларда кең қолдауды қамтамасыз ететін Python, Go және JavaScript (Node.js) программалау тілдері қолданылады. IoT сенсорларынан келетін деректерді өңдеу үшін Python тілін пайдалануға болады. IoT сенсорлары мен федеративті оқытуды пайдалана отырып, ауылшаруашылық өнімдерінің қозғалысын бақылайтын блокчейн тізбегі әр блокты өнімнің және сақтаудың күйі туралы деректері бар өнімді жеткізудің жеке кезеңі (мысалы, ферма, көлік, қойма) ретінде көрсететін құрылымға ие болады. Әрбір блокта алдыңғы блоктың хәші, уақыт белгісі және өнім деректері жинақталады.

Python программалау тілін пайдаланатын блок тізбегі құрылымының мысалы:

```
class Block:
    def __init__(self, index, previous_hash, timestamp, data, sensor_data_hash):
        self.index = index # Блоктың бірегей идентификаторы
        self.previous_hash = previous_hash # Алдыңғы блоктың хәші
        self.timestamp = timestamp # Уақыт белгісі
        self.data = data # Блок деректері (мысалы, жеткізу кезеңі)
        self.sensor_data_hash = sensor_data_hash # IoT-деректер хәші
        self.hash = self.calculate_hash() # Ағымдағы блоктың хәші

    def calculate_hash(self):
        block_string = f»{self.index} {self.previous_hash} {self.timestamp} {self.
data} {self.sensor_data_hash}»
        return hashlib.sha256(block_string.encode()).hexdigest()

class Blockchain:
    def __init__(self):
        self.chain = [self.create_genesis_block()] # Бастапқы блокты құру

    def create_genesis_block(self):
        # Бастапқы блок (тізбектің алғашқы блогы)
        return Block(0, «0», time.time(), «Genesis Block», «0»)

    def get_latest_block(self):
        return self.chain[-1]

    def add_block(self, new_block):
        new_block.previous_hash = self.get_latest_block().hash
        new_block.hash = new_block.calculate_hash()
        self.chain.append(new_block)

# Блокчейн тізбегін құру және блоктарды қосу
blockchain = Blockchain()
```



```

# Жеткізу тізбегінің кезеңдеріне қатысты блоктар деректерінің мысалы
sensor_data_farm = «температура: 20С, ылғалдылық: 50%, орналасуы:
ферма»
sensor_data_transport = «температура: 18С, ылғалдылық: 52%, орналасуы:
жолда»
sensor_data_warehouse = «температура: 16С, ылғалдылық: 55%, орналасуы:
қойма»
# IoT-датчиктерден алынған деректерді хэштеу
farm_data_hash = hashlib.sha256(sensor_data_farm.encode()).hexdigest()
transport_data_hash = hashlib.sha256(sensor_data_transport.encode()).
hexdigest()
warehouse_data_hash = hashlib.sha256(sensor_data_warehouse.encode()).
hexdigest()

```

```

# Жеткізу тізбегінің әртүрлі кезеңдері үшін блоктарды тізбекке қосу
blockchain.add_block(Block(1, blockchain.get_latest_block().hash, time.
time(), «Farm», farm_data_hash))
blockchain.add_block(Block(2, blockchain.get_latest_block().hash, time.
time(), «Transport», transport_data_hash))
blockchain.add_block(Block(3, blockchain.get_latest_block().hash, time.
time(), «Warehouse», warehouse_data_hash))

```

Блоктық тізбектің сипаттамасы:

Генезис блогы (*genesis_block*) өнім туралы ақпаратты қамтымайтын тізбектің бастапқы элементі болып табылады. Оның 0 индексі бар және алдыңғы блоктың хэші «0» деп орнатылған. Хэш берілген блокта қамтылған бірегей деректер негізінде жасалады.

Жеткізу тізбегінің әртүрлі кезеңдерінде келесі блоктар қалыптасады:

- Ферма кезеңіне сәйкес келетін *бірінші блок* хэш ретінде ұсынылған температура, ылғалдылық және орналасу сияқты IoT сенсорлары арқылы жиналған деректерді қамтиды.

- Тасымалдаумен байланысты *екінші блокта* өнімді тасымалдау шарттары туралы ақпаратты қамтиды.

- Қоймаға қатысты *үшінші блокқа* қоймадағы тауарлардың жай-күйі туралы деректер қамтылады.

Ерекшеліктер мен түсініктемелер:

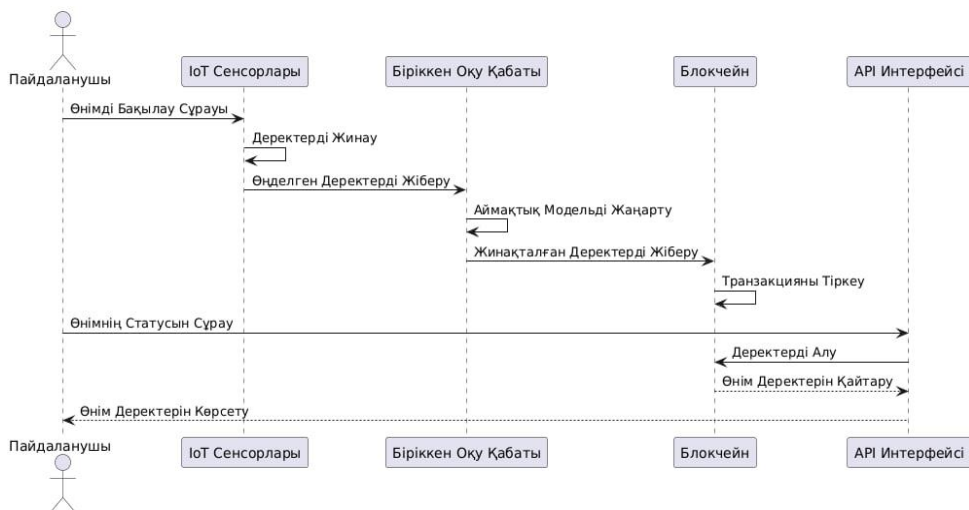
- Әрбір блок *sensor_data_hash* деп белгіленген IoT сенсорларынан жиналған деректер хэшін қамтиды. Бұл шара деректердің тұтастығын қамтамасыз етеді және бұрмалау мүмкіндігін болдырмайды.

- Блоктар арасындағы байланыс әрбір жаңа блокта алдыңғысының хэші болуымен қамтамасыз етіледі, осылайша толық тізбекті құрайды. Блоктардың біріндегі деректерді өзгерту тізбектің тұтастығын бұзуға әкеледі, өйткені хэштер енді сәйкес келмейді.

- Хэшингті пайдалану тізбектегі барлық келесі блоктарды өзгертпей

өзгертуге болмайтын криптографиялық қауіпсіз жазбаларды жасауға мүмкіндік береді.

Қолданылатын технологиялардың ішінде негізгілері Hyperledger Fabric немесе Ethereum болып табылады, қажет болған жағдайда Parity немесе басқа жеке нұсқалар сияқты шешімдерді пайдалана отырып, таратылған блок тізбегін құруға мүмкіндік береді. Docker технологиясы контейнерлеуді қамтамасыз етеді, ал Flask немесе Django құрылымдары API серверін жасау үшін пайдаланылады. InterPlanetary File System (IPFS) блокчейн ресурстарын оңтайландыруға және оның жұмысын жақсартуға көмектесетін тікелей блокчейнде сақтауға арналмаған үлкен көлемдегі деректерді сақтау үшін пайдаланылады, қатысушыларға құпиялылықты сақтай отырып, әр кезеңде өнімдерді бақылауға және тексеруге мүмкіндік береді.



Сурет 2 - Жүйедегі өзара әрекеттесудің UML диаграммасы

Ұсынылып отырған жүйенің мақсаты – ауыл шаруашылығы өнімдерін жеткізу тізбегінің барлық кезеңдерінде қауіпсіз және ашық қадағалауды қамтамасыз етіп, қатысушылардың деректерінің құпиялылығын сақтау. Жүйе бірнеше негізгі компоненттерден тұрады: пайдаланушы, IoT-датчиктер, федеративті оқыту деңгейі, блокчейн және соңғы пайдаланушылармен өзара әрекеттесу үшін API интерфейсі. Деректерді жинаудан бастап олардың сақталуы мен өңделуіне дейінгі жеткізу тізбегінің әр кезеңінде тиімділік пен сенімділікті арттыру үшін озық технологиялар қолданылады. Процестің қатысушыларын қарастыратын болсақ:

- Пайдаланушы - өнімнің шығу тегі, орналасқан жері және сақтау шарттары туралы деректерді алуға мүдделі жүйенің соңғы пайдаланушысы. Пайдаланушы бөлшек сауда өкілі, сатып алушы немесе жеткізу тізбегінің кез келген басқа қатысушысы бола алады.

• IoT-сенсорлары - өнімді тасымалдау кезінде қоршаған орта жағдайларын және өнімнің жағдайын тіркейтін құрылғылар. Бұл сенсорлар температура, ылғалдылық, геолокация және өнімнің сапасына әсер ететін басқа параметрлер туралы ақпаратты жинайды.

• Федеративті оқыту деңгейі — IoT-датчиктерінен алынған деректерді біріктіретін және аймақтық үлгілер жасау үшін федеративті оқыту әдістерін қолданатын компонент. Деректер орталық қоймаға жіберілмей, жергілікті түрде өңделетіндіктен деректердің құпиялылығы сақталады.

• Блокчейн - өнімнің қозғалысы мен жағдайына байланысты барлық транзакциялар жазылатын таратылған реестр. Әр жазба өзгермейтін және криптография арқылы қорғалған, бұл жеткізу тізбегінің барлық қатысушылары үшін деректердің ашықтығы мен сенімділігін қамтамасыз етеді.

• API интерфейсі — соңғы пайдаланушыларға өнім туралы ақпаратқа қол жеткізуді қамтамасыз ететін компонент. API интерфейсі арқылы өнімнің ағымдағы күйі, орналасқан жері және қозғалыс тарихы туралы сұраулар жасауға болады.

Жүйедегі өзара әрекеттестік өнімнің ағымдағы күйі мен жеткізу тізбегіндегі алдыңғы кезеңдер туралы ақпаратты алу үшін пайдаланушы өнімді қадағалау сұрауын жібергеннен басталады. Сұрау жүйенің API интерфейсі арқылы келіп түседі және нақты уақытта деректерді жинайтын IoT-сенсорларына беріледі. Жеткізу тізбегінің әр кезеңінде IoT-сенсорлары қоршаған орта шарттарын (мысалы, өнімнің температурасы, ылғалдылығы және орналасқан жерін) тіркейді. Бұл деректер үнемі жаңартылып, жергілікті құрылғыларда өңделеді. Кейін өңделген деректер бірнеше датчиктерден жиналған деректерді пайдалана отырып, аймақтық модельдер жасау және жаңарту мүмкіндігін беретін федеративті оқыту деңгейіне бағытталады, бұл ретте фермерлер мен жеткізу тізбегінің басқа қатысушыларының деректерінің құпиялылығы сақталады. Осылайша, жүйе орталық қоймаға деректерді жібермей, жергілікті түрде өңделгендіктен жоғары құпиялылықты қамтамасыз етеді. Осы деректер негізінде аймақтық модельдер жаңартылып, өнімнің сапасы туралы деректердің дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Аймақтық модель жаңартылғаннан кейін агрегатталған деректер блокчейнге жіберіледі, яғни әрбір транзакция өзгермейтін жазба ретінде тіркеледі. Блокчейн өнімнің қозғалысының әр кезеңі туралы ақпаратты сақтайды, бұл оны жеткізу тізбегінің барлық қатысушыларының тексеруіне қолжетімді етеді. Әрбір транзакция криптографиялық хэш көмегімен жазылады, бұл деректердің өзгермейтіндігін қамтамасыз етеді. Өнімнің жағдайы мен орналасқан жері, сондай-ақ тасымалдау кезеңдерінің әр кезеңінде сақтау шарттарының сақталуы туралы ақпарат бұрмаланудан қорғалған және барлық мүдделі тараптар үшін қолжетімді болады.

Пайдаланушы қажет болған жағдайда өнімнің ағымдағы күйі туралы деректерді алу сұрауын жібере алады. Бұл сұрау блокчейнде сақталған ақпаратқа қол жеткізуді қамтамасыз ететін API интерфейсі арқылы өңделеді.

API интерфейсі блокчейнге жүгініп, өнімнің орналасқан жері, күйі және қозғалыс тарихы туралы деректерді алып, оларды пайдаланушыға қайта береді. Осы кезеңде пайдаланушы өнімнің тарихы мен ағымдағы жағдайы туралы толық ақпарат алады, бұл оған өнімнің сапасы мен қауіпсіздігі стандарттарының сақталуына көз жеткізуге мүмкіндік береді.

Ұсынылған блокчейн мен федеративті оқыту негізіндегі жүйе деректердің мөлдірлігі мен сенімділігін жоғары деңгейде қамтамасыз етіп, жеткізу тізбегінің қатысушыларының құпиялылығын сақтайды. Транзакциялар мен сақтау шарттары туралы деректерді сақтау үшін блокчейнді пайдалану және өнім туралы деректерді жинау үшін IoT-сенсорларын қолдану өнімнің қозғалысын қадағалауға ғана емес, сонымен қатар өнім туралы ақпаратқа деген сенімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Жүйе ауыл шаруашылығының экологиялық тұрақтылығын арттыруға инновациялық әдістер ұсынады, себебі ол сапаны бақылауды жақсартуға және деректердің бұрмалануына жол бермейді, бұл азық-түлік нарығының жаһандануы жағдайында ерекше маңызды.

Жүйені дамыту бағытында бірнеше маңызды зерттеу бағыттары бар. Біріншіден, блокчейн технологиясын жасанды интеллект элементтерімен интеграциялау арқылы өнім сапасын автоматты түрде бақылауды жетілдіруге болады. Бұл тәсіл өнімнің сапасын бақылауды жылдамдатуға және ақауларды анықтауға ықпал етеді. Екіншіден, федеративті оқыту алгоритмдерін жетілдіру арқылы жергілікті өңдеу тиімділігін арттыру мүмкіндігі бар. Сонымен қатар, ауыл шаруашылығындағы экологиялық тұрақтылықты арттыру маңызды бағыт болып табылады. Блокчейн мен федеративті оқыту жүйелерін экологиялық тиімді ету үшін жаңа консенсус алгоритмдерін әзірлеу болашақ зерттеулердің бағыты бола алады. Бұл әдіс экологиялық ресурстарды үнемдеуге және өнімдерді қадағалауда экологиялық таза тізбекті қамтамасыз етуге көмектеседі.

Қорытынды. Мақалада ауыл шаруашылығы өнімдерінің жеткізу тізбегін қадағалау үшін блокчейн және федеративті оқыту технологияларын біріктіретін жаңа инновациялық тәсіл ұсынылды. Әдебиеттерге талдау негізінде бұл технологиялардың ауыл шаруашылығында өнім сапасын бақылауды, деректер қауіпсіздігін және жүйенің ашықтығын жақсартуда маңызды екені көрсетілді.

Жасалған жүйедегі өзара әрекеттесудің UML диаграммасы арқылы деректердің өзгермейтіндігін, ал федеративті оқыту арқылы деректердің құпиялылығын қамтамасыз етеді. Бұл тәсіл жеткізу тізбегіндегі әрбір өнім қозғалысын нақты уақытта бақылауға және қажетті ақпаратты қауіпсіз сақтауға мүмкіндік береді. Нәтижесінде фермерлер мен жеткізу тізбегінің қатысушылары үшін жеке мәліметтер сақталып, тұтынушылар өнімнің сапасы мен қауіпсіздігі туралы нақты мәлімет ала алады. Болашақ зерттеулерде жүйенің ауқымдылығын кеңейту және экологиялық тиімділігін арттыру мақсатында қосымша мүмкіндіктер қарастырылады. Ауыл

шаруашылығындағы деректердің ашықтығын, өнім сапасын бақылауды және тұтынушылар сенімін нығайтуға жаңа жолдар ұсынады және азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету мен ауыл шаруашылығының тұрақты дамуына ықпал етеді.

Әдебиеттер

Об утверждении Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021 – 2030 годы. (2021). Постановление Правительства Республики Казахстан от 30 декабря 2021 года №960. URL:<https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2100000960> (in Russian).

Акильжанова Л., Рахметова А., Саркулова Н., & Райханова Г.А. (2023). Государственное управление информационными процессами в регионе (Казахстан и зарубежный опыт). «Вестник НАН РК», 402(2), 278–288. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1467.472>. (in Russian).

Федотова В.В., Емельянов Б.Г., Типнер Л.М. (2018). Блокчейн – главная тема науки. Европейская наука. — No 1 (33). — 2018. — Pp. 40–41. (in Russian).

Tapscott D., Tapscott A. (2016). Blockchain revolution: How the technology behind bitcoin is changing money, business, and the world. Penguin. (in Eng).

Иманбаева З., Токтарова М., Кушенова М., Айтманбетова Р., & Абуселидзе Г. (2024). Ауылшаруашылық секторында блокчейн технологиясын қолданудың теориялық аспектілері. «Вестник НАН РК», 407(1), 498–512. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1467.688>. (In Kazakh)

Новикова Е. С., Федорченко Е. В., Котенко И. В., & Холод И. И. (2023). Аналитический обзор подходов к обнаружению вторжений, основанных на федеративном обучении: преимущества использования и открытые задачи. Информатика и автоматизация, 22(5), 1034-1082. (in Russian).

Бектемысова Г., & Бакирова Г. (2024). Анализ алгоритмов федеративного обучения. Вестник КазАТК, 131(2), 297-304. (in Russian).

Мухамедова З.Г., Осадчук В.Д., & Тулаев А.У. (2022). Перспективы использования технологии блокчейн в организации перевозочного процесса и цепочке поставок. Известия Транссиба, (2 (50)), 142-156. (in Russian).

Galvez J.F., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. (2018). Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. Trends in Analytical Chemistry, 107, - P. 222-232. (in Eng).

Сахипов А., Мектепбаева А., Рыстыгулова В., Абильдина А., & Омаржанова Г. (2024). Machine learning strategies and algorithms for enhancing real-time data processing in dynamic and big data systems. Вестник КазАТК, 134(5), 278-291 (in Eng).

Запечников С.В. (2020). Модели и алгоритмы конфиденциального машинного обучения. Безопасность информационных технологий, 27(1), 51-67 (in Russian).

Yang Q., Liu Y., Chen T., Tong Y. (2019). Federated machine learning: Concept and applications. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 10(2), -P. 1-19. <https://doi.org/10.1145/3298981> (in Eng).

Qi J., Wu C., Wang T., Guo Y. (2020). Blockchain-based federated learning for privacy-preserving system in agriculture. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 7(5), -P. 992-1001. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2020.3025133>(in Eng).

Yin X., Su C., Liu H., Qi J. (2021). A blockchain-enabled federated learning system for secure data sharing in smart agriculture. Sustainability, 13(4), -P. 1899. <https://doi.org/10.3390/su13041899> (in Eng).

Степанов И.Е. (2023). Применение технологии блокчейн для обеспечения надежности и безопасности данных в интернете вещей. Вестник науки, 4(5 (62)), 762-769. (in Russian).

Kairouz P., McMahan B., Avent B., Bellet A., Bennis M., Bhagoji A. N., Zhao S. (2019). Advances and open problems in federated learning. URL: <https://arxiv.org/abs/1912.04977> (in Eng).

Кашеварова Н.А., & Куликова М.Е. (2024). Интеграция блокчейна и искусственного интеллекта как механизма модернизации различных отраслей экономики. Вестник университета, (5), 54-67. (in Russian).

Almeida O.X.B., Rodriguez M.C., Samaniego T., Gomez E.C.F., Cabezas-Cabezas R., Bazan V. (2018). Blockchain in Agriculture: A Systematic Literature Review. In Proceedings of the Technologies and Innovation, Guayaquil, Ecuador, November 6–9, -01.003. (in Eng).

References

Ob utverjdenii Konsepsii razvitiia agropromyshlennogo kompleksa Respubliki Kazahstan na 2021 – 2030 gody [On approval of the Concept of development of the agro–industrial complex of the Republic of Kazakhstan for 2021-2030] (2021). Postanovlenie Pravitelstva Respubliki Kazahstan ot 30 dekabra 2021 goda №960. URL:<https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2100000960>. (in Russian).

Akiljanova L., Rahmetova A., Sarkulov, N., & G.A. Raihanova. (2023). Gosudarstvennoe upravlenie informatsionnymi prosesami v regione (Kazahstan i zarubejniy opyt) [State management of information processes in the region (Kazakhstan and foreign experience)]. «Vestnik NAN RK», 402(2), 278–288. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1467.472>. (in Russian).

Fedotova V.V., Emelyanov B.G., Tipner L.M. (2018). Blockchain - glavnaya tema nauki [Blockchain is the main topic of science]. Evropeiskaya nauka. — No. 1 (33). —2018. — Pp. 40–41. (in Russian).

Tapscott D., Tapscott A. (2016). Blockchain revolution: How the technology behind bitcoin is changing money, business, and the world. Penguin. (in Eng).

Imanbaeva Z., Toktarova M., Kushenova M., Aitmanbetova R., & Abuselidze G. (2024). Auylyaruashylyq sektorynda blokchein tehnologiasyn qoldanudyñ teoralyq aspektileri [Theoretical aspects of the application of blockchain technology in the agricultural sector]. «Vestnik NAN RK», 407(1), 498–512. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1467.688> (In Kazakh)

Novikova E.S., Fedorchenko E.V., Kotenko I.V., & Holod I.I. (2023). Analiticheski obzor podhodov k obnaruzheniu vtorjeni, osnovannyh na federativnom obuchenii: preimushstva ispolzovania i otkrytye zadachi [An analytical review of intrusion detection approaches based on federated learning: advantages of use and open tasks]. Informatika i avtomatizatsia, 22(5), 1034-1082. (in Russian).

Bektemysova G., & Bakirova G. (2024). Analiz algoritmov federativnogo obucheniia [Analysis of federated learning algorithms]. Vestnik KazATK, 131(2), 297-304. (in Russian).

Muhamedova Z.G., Osadchuk V.D., & Tulaev A.U. (2022). Perspektivy ispolzovania tehnologii blokchein v organizatsii perevozochnogo prosesa i sepochnke postavok [Prospects of using blockchain technology in the organization of the transportation process and supply chain]. Izvestia Transiba, (2 (50)), 142-156. (in Russian).

Galvez J.F., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. (2018). Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. Trends in Analytical Chemistry, 107, - P. 222-232. (in Eng).

Sahipov A., Mektepbaeva A., Rystygulova V., Abildina A., & Omarjanova G. (2024). Machine learning strategies and algorithms for enhancing real-time data processing in dynamic and big data systems. Vestnik KazATK, 134(5), 278-291. (in Eng).

Zaprechnikov S.V. (2020). Modeli i algoritmy konfidentsialnogo mashinnogo obucheniia. Bezopasnost informatsionnykh tehnologi [Confidential machine learning models and algorithms. Information technology security], 27(1), 51-67. (in Russian).

Yang Q., Liu Y., Chen T., Tong Y. (2019). Federated machine learning: Concept and applications. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 10(2), -P. 1-19. <https://doi.org/10.1145/3298981> (in Eng).

Qi J., Wu C., Wang T., Guo Y. (2020). Blockchain-based federated learning for privacy-preserving system in agriculture. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 7(5), -P. 992-1001. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2020.3025133> (in Eng).

Yin X., Su C., Liu H., Qi J. (2021). A blockchain-enabled federated learning system for secure data sharing in smart agriculture. Sustainability, 13(4), -P. 1899. <https://doi.org/10.3390/su13041899> (in Eng).

Stepanov I. E. (2023). Primenenie tehnologii blokchein dlä obespecheniia nadejnosti i bezopasnosti dannyh v internete vešei [The use of blockchain technology to ensure the reliability and security of data in the Internet of Things. Bulletin of Science]. Vestnik nauki, 4(5 (62)), 762-769. (in Russian).

Kairouz P., McMahan B., Avent B., Bellet A., Bennis M., Bhagoji A.N., Zhao S. (2019). Advances and open problems in federated learning. URL: <https://arxiv.org/abs/1912.04977> (in Eng).

Kashevarova, N.A., & Kulikova, M.E. (2024). Integratsia blokcheina i iskusstvennogo intelekta kak mehanizma modernizatsii razlichnyh otraslei ekonomiki [Integration of blockchain and artificial intelligence as a mechanism for modernization of various sectors of the economy]. *Vestnik universiteta*, (5), 54-67. (in Russian).

Almeida O.X.B., Rodriguez M.C., Samaniego T., Gomez E.C.F., Cabezas-Cabezas R., Bazan V. (2018). Blockchain in Agriculture: A Systematic Literature Review. In *Proceedings of the Technologies and Innovation*, Guayaquil, Ecuador, November 6–9, -01.003. (in Eng).

**I. Massyrova¹, O. Joldasbayev², S. Joldasbayev¹, A. Bolysbek¹,
S. Mambetov^{3*}, 2025.**

¹International IT University, Almaty, Kazakhstan;

²Branch of the Academy of Public Administration under the president of the
Republic of Kazakhstan in Almaty region, Konayev, Kazakhstan;

³Turan University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: s.mambetov@turan-edu.kz

AUTOMATION OF THE SYSTEM FOR INDUSTRIAL PRACTICE AND INTERNSHIPS FOR STUDENTS IN ORGANIZATIONS OUTSIDE OF THE UNIVERSITY

Indira Massyrova – Master, Assistant professor, Department of Cybersecurity, International IT University, Almaty, Kazakhstan, i.massyrova@iitu.edu.kz, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0006-7338-0472>;

Orynbassar Joldasbayev – PhD in Project Management, Senior Lecturer of the branch of the Academy of Public Administration under the president of the Republic of Kazakhstan in Almaty region, Konayev, Kazakhstan, orynbassarjoldasbayev@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0991-1575>;

Serik Joldasbayev – MSc, Assistant professor, Department of Computer Engineering, International IT University, Almaty, Kazakhstan, s.joldasbayev@iitu.edu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8689-1822>;

Aruzhan Bolysbek – Student, Department of Computer Engineering International IT University, Almaty, Kazakhstan, 31132@iitu.edu.kz, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0002-1781-8493>;

Saken Mambetov – Master of Technical Sciences, Director of the Higher School of Information Technology, Turan University, Almaty, Kazakhstan, s.mambetov@turan-edu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7249-5378>.

Abstract: The organization of students' industrial practice during their studies is a key element in preparing specialists, especially in the IT sector, which requires a special approach. Universities usually collaborate with partner companies to create joint solutions, which involves providing material and educational resources, selecting qualified personnel, and exchanging experience. Despite the well-established work of universities and their partners, there are still many inconveniences and unresolved issues regarding coordination during industrial practice, such as determining the placement of students, coordinating the parties involved, and ensuring compliance with requirements, agreeing on criteria,

preparing necessary documents, and reporting. The biggest issue, however, is the lack of a unified digital automated platform, which forces all routine work to be done manually and requires passing through numerous administrative steps and approvals across different instances. **The purpose of the paper** is to investigate and develop an innovative system aimed at introducing digital document management and automating the process of organizing students' industrial practice using modern digital technologies. To enhance efficiency, contemporary technologies were applied, and optimization algorithms and models were developed to improve coordination and management of the process. The system being created meets high requirements for fault tolerance, security, and integration with current IT technologies, which contributes to improving the educational process and strengthening collaboration with partner organizations.

Key words: digitalization, automation, quality improvement, QoS, application, electronic document management.

**И. Масырова¹, О.К. Джолдасбаев², С.К. Джолдасбаев¹, А. Болысбек¹,
С.Т. Мамбетов^{3*}, 2025.**

¹ «Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті»,

Алматы, Қазақстан;

² «ҚР Президентінің жанындағы мемлекеттік басқару академиясы Алматы облысы бойынша филиалы», Қонаев, Қазақстан;

³ «Тұран университеті», Алматы, Қазақстан.

E-mail: s.mambetov@turan-edu.kz

УНИВЕРСИТЕТТЕН ТЫС ҰЙЫМДАРДА СТУДЕНТТЕРДІҢ ӨНДІРІСТІК ПРАКТИКАСЫ МЕН ТАҒЫЛЫМДАМАСЫН АВТОМАТТАНДЫРУ ЖҮЙЕСІ

Масырова Индира – магистр, Ассистент профессор, «Киберқауіпсіздік» кафедрасы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан, i.massurova@iitu.edu.kz, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0006-7338-0472>;

Жолдасбаев Орынбасар Қапарұлы – PhD, Аға оқытушы, ҚР Президентінің жанындағы мемлекеттік басқару академиясы Алматы облысы бойынша филиалы, Қонаев, Қазақстан, orynbassarjoldasbayev@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0991-1575>;

Жолдасбаев Серик Қапарұлы – магистр, Ассистент профессор, «Компьютерлік инженерия» кафедрасы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан, s.joldasbayev@iitu.edu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8689-1822>;

Болысбек Аружан – студент, «Компьютерлік инженерия» кафедрасы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан, 31132@iitu.edu.kz, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0002-1781-8493>;

Мамбетов Сәкен Төлегенұлы – магистр, Ақпараттық технологиялар жоғары мектебі директоры, Тұран университеті, Алматы, Қазақстан, s.mambetov@turan-edu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7249-5378>.

Аннотация: Студенттердің оқу процесіндегі өндірістік тәжірибесін ұйымдастыру – мамандарды даярлаудың негізгі элементтерінің бірі болып

табылады, әсіресе IT саласы ерекше көзқарасты талап етеді. Әдетте, жоғары оқу орындары серіктес компаниялармен бірлескен шешімдер жасау үшін ынтымақтасады, бұл материалдық және білім беру ресурстарын ұсынуды, білікті мамандарды іріктеуді және тәжірибе алмасуды қамтиды. Жоғары оқу орындары мен олардың серіктестері арасындағы жүйелі жұмысына қарамастан, өндірістік тәжірибеден өту кезінде көптеген қолайсыздықтар мен шешілмеген үйлестіру мәселелері бар: білім алушыларға тәжірибе орнын белгілеу, тараптардың келісімі, талаптардың сәйкестігі, келісу критерийлері, қажетті құжаттарды рәсімдеу, есептілік және ең үлкен мәселе – бірыңғай цифрлық автоматтандырылған кеңістіктің болмауы. Бұл барлық рутиналық жұмысты қолмен орындауға және әртүрлі инстанциялардағы көптеген әкімшілік рәсімдерден өтуге мәжбүрлейді.

Осы жұмыстың мақсаты – студенттердің өндірістік тәжірибесін ұйымдастыру процесін цифрлық құжат айналымын енгізу және заманауи цифрлық технологияларды пайдалану арқылы автоматтандыруға бағытталған инновациялық жүйені зерттеу және әзірлеу. Тиімділікті арттыру үшін заманауи технологиялар қолданылып, процесті үйлестіру мен басқаруды жақсартуға бағытталған оңтайландыру алгоритмдері мен модельдері әзірленді. Жасалған жүйе жоғары сенімділік, қауіпсіздік талаптарына сәйкес келеді және заманауи IT-технологиялармен интеграциялануға қабілетті, бұл оқу процесінің тиімділігін арттыруға және серіктес ұйымдармен өзара әрекеттестікті күшейтуге ықпал етеді.

Түйін сөздер: цифрландыру, автоматтандыру, сапаны арттыру, қосымша, электрондық құжат айналымы, қауіпсіздік.

**И. Масырова¹, О.К. Джолдасбаев², С.К. Джолдасбаев¹, А. Болысбек¹,
С.Т. Мамбетов^{3*}, 2025.**

¹ «Международный университет информационных технологий»,
Алматы, Казахстан;

² «Филиал академии государственного управления при Президенте РК по
Алматинской области», Конаев, Казахстан;

³ «Университет Туран», Алматы, Казахстан.

E-mail: s.mambetov@turan-edu.kz

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ И СТАЖИРОВКИ СТУДЕНТОВ В ОРГАНИЗАЦИЯХ ВНЕ ВУЗА

Масырова Индира – магистр, Ассистент профессор, Кафедра «Кибербезопасность», Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан, E-mail: i.massyrova@iitu.edu.kz, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0006-7338-0472>;

Джолдасбаев Орынбасар Капарович – PhD, Старший преподаватель, Филиал академии государственного управления при Президенте РК по Алматинской области, Конаев, Казахстан, E-mail: orynbassarjoldasbayev@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0991-1575>;

Джолдасбаев Серик Капарович – магистр, Ассистент профессор, Кафедра «Компьютерной инженерии», Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан, E-mail: s.joldasbayev@iitu.edu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8689-1822>;

Болысбек Аружан – студент, Кафедра «Компьютерной инженерии», Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан, E-mail: 31132@iitu.edu.kz, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0002-1781-8493>;

Мамбетов Сакен Толегенулы – магистр, Директор Высшей школы информационных технологий, Университет Туран, Алматы, Казахстан, E-mail: s.mambetov@turan-edu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7249-5378>.

Аннотация. Организация производственной практики студентов в процессе обучения является ключевым элементом подготовки специалистов, особенно сфера IT требует особый подход. Обычно вузы сотрудничают с компаниями-партнерами для создания совместных решений, что предполагает предоставление материальных и образовательных ресурсов, подбор квалифицированных кадров и обмен опытом. Несмотря на отлаженную работу вузов и их партнеров, существуют большое количество неудобств и нерешенных задач согласования при прохождении производственной практики: определение места обучающимся, согласование сторон, соответствие требований, критерии согласования, оформление необходимых документов, отчетность и самая большая проблема — отсутствие единого цифрового автоматизированного пространства, что вынуждает выполнять всю рутинную работу вручную и проходить через многочисленные административные этапы и согласования в различных инстанциях.

Целью данной работы является исследование и разработка инновационной системы, направленной на внедрение цифрового документооборота и автоматизацию процесса организации производственной практики студентов с использованием современных цифровых технологий. При реализации для повышения эффективности были применены современные технологии, а также разработаны оптимизационные алгоритмы и модели, направленные на улучшение координации и управления процессом. Создаваемая система соответствует высоким требованиям отказоустойчивости, безопасности и интеграции с актуальными IT-технологиями, что способствует повышению эффективности учебного процесса и усилению взаимодействия с организациями-партнерами.

Ключевые слова: цифровизация, автоматизация, повышение качества, приложение, электронный документооборот, безопасность.

Introduction. The interaction between students and employers and the active development of digital platforms for more efficient internship organization seems quite natural. Rapidly growing solutions in this area offer broad opportunities. One such direction today is the modernization and digitalization of business processes in education, which must meet the requirements for security, scalability, and fault tolerance of information systems, given the growing volume of information and

big data. One area that has not yet been fully realized in business processes is the digitalization of the student industrial practice process in various organizations, particularly for specialized fields. Workplace training is a crucial foundation for competency development during university studies, strengthening the connection between theoretical knowledge and real-world practice at enterprises. However, sometimes internships do not fully provide opportunities to develop practical skills, and the tasks assigned to interns are only indirectly related to their future profession, often involving routine, low-skilled operations. The success of an internship depends on many factors, one of which is finding a potential internship placement. Typically, universities provide students with a list of companies where they can complete their industrial practice, or the students find a placement independently. Both of these processes are done offline, taking up a lot of time for all three parties involved. The need for an information system that provides students with internship placement opportunities arises from the aforementioned issues, as well as several technical factors: the ability to process structured and unstructured big data, data protection, decision-making, document management, and the cost of services (Balakayeva, et al, 2022). Universities are obligated to take responsibility for organizing student internships in their own interest, ensuring a model of partnership between the university, students, and employers. The “connection of parties” through online platforms provides an opportunity for communication and interaction between these parties starting from the early stages of the internship, offering significant advantages. To enhance the efficiency of digital interaction between students and employers, there are many foreign analogs. There are a large number of such platforms, each with its own set of qualitative characteristics, advantages, and limitations. These systems are widely used in many countries, including the United States, European Union countries, and others. The issues related to adjusting the actions of managers of industrial practice, organizing internships, and communication platforms are discussed in (Daugherty, 2011). The problems related to finding and completing industrial practice by students are more broadly covered in (Alpert, et al, 2009).

Some of the most well-known platforms for student internships include Handshake, Riipen, Parker Dewey, and Virtual Internships. However, these solutions are not entirely suitable for domestic universities or have a number of drawbacks or compatibility issues with our conditions and laws. Another important reason for creating a custom platform is the internal labor market. For example, using external platforms might negatively impact the retention of young professionals. One such platform is Handshake, which is widely used in the United States to connect students with potential employers. It offers extensive opportunities for job and internship searches and is integrated with many university career services (TechCrunch). The Riipen platform specializes in experiential learning by integrating real-world projects into university courses. Employers post projects that students can work on as part of their coursework, gaining practical experience while studying (Faggiani, et al, 2018). Parker Dewey offers “micro-internships” — short-

term, paid professional assignments that help students gain valuable experience and build a work portfolio, while also allowing employers to complete specific tasks (TechCrunch). Virtual Internships provides remote internships in various fields and locations. It guarantees placement and offers flexible start dates and internship durations, making it accessible to a wide range of students, regardless of their location (Waddill, 2023). It is worth noting that in (Molodchik, et al, 2020), it was determined that platforms specialized in specific industries or fields are the most effective.

Despite the large number of internship platforms, there is still a shortage or even a lack of domestic solutions with similar functionality that could provide convenience for students, employers, and universities. Moreover, decentralized internship search, limited data analysis capabilities, and inefficient interaction among process participants remain key issues that could be addressed by implementing more effective, intelligent solutions capable of automating and optimizing the internship placement process. Such solutions could improve interaction between all participants and provide students with the quality experience necessary for a successful start in their profession. The absence of an electronic document management system may mean that participants need to perform more administrative tasks manually, which can slow down the process of signing and validating the necessary documents between students, companies, and universities. Furthermore, most existing internship organization solutions do not fully leverage modern technologies, such as artificial intelligence and machine learning, to automate the internship selection process and personalize recommendations for students, which we see as a potential development for the platform.

A brief review of the literature. Researchers emphasize that digitalization not only reduces time and administrative costs but also improves the organization of educational activities. According to the work of (Balakayeva, et al, 2023), automated systems allow for the optimization of tasks such as planning, reporting, documentation, and workflow coordination. Learning management systems (LMS) demonstrate high effectiveness in supporting students and instructors; however, they have limitations in the context of internship organization, where a more flexible approach to collaboration with external organizations is required.

Digital document management plays a central role in automating administrative processes. Research shows that the implementation of electronic documents significantly reduces processing time and costs, increases transparency, and enables real-time tracking (Balakayeva, et al, 2023). In the context of organizing internships, digital document management can ensure the efficient processing of contracts, applications, reports, and other mandatory documents, minimizing human error and the risk of information loss. Key technologies in this area include electronic signatures, automated document routing systems, and cloud solutions for data storage and access.

Platforms such as Handshake, Riipen, Parker Dewey, and Virtual Internships have already established themselves as tools for organizing internships and practical

programs for students. These platforms automate the processes of searching, coordinating, and completing tasks, connecting students with employers and providing them with hands-on experience. Research on the use of such platforms in the educational environment shows their high demand among students, particularly due to access to real-world tasks and the opportunity to work remotely. However, each platform has its limitations. For example, Handshake and Parker Dewey focus on short-term projects and primarily offer local opportunities, which limits their applicability for students seeking international experience. In contrast, Virtual Internships emphasizes remote work and offers a wide range of international internships, making it more versatile, though less accessible to universities with limited resources (Adler, et al, 2021).

The Beam.kz platform is focused on the domestic labor market of the Republic of Kazakhstan and currently collaborates with over 80 universities and more than 5,000 companies in the country. The platform does not have publicly available documentation online for viewing its document management system or workflows. However, demo versions are provided to educational institutions or corporate partners interested in the platform, allowing them to explore its integration capabilities with universities and companies (beam.kz, 2024)

Table 1 - Comparison of existing production practice platforms

	Beam.kz	Handshake	Riipen	Parker Dewey	Virtual Internships	JobTeaser
Location	Kazakhstan	USA, Canada, Europe	USA, Canada	USA	International	Europe, international
Users	university students, graduates, companies	students, employers, universities	students, teachers, companies	students, employers	students, employers	students, employers, universities
Partnerships	more than 80 universities and 5,000 companies in Kazakhstan	universities, employers	universities, colleges	universities	companies	universities, companies
the main purpose	job search/ internships, resume writing, career planning	search for internships, employment	project work with companies	short-term projects	virtual internships	career resources, vacancies
benefits for students	free access, resume creation, career fairs, job listings, digital career resources	access to vacancies, events	work experience in projects	flexibility, payment for projects	access to global internships	user-friendly interface, career resources

benefits for employers	access to the candidate database, simplified job posting, communication with educational institutions	direct access to students	quick access to talents	easy hiring for micro projects	access to international students	interaction with universities, branding
the application process	submission via the platform	profile and resume submission	registration, project selection	submission via the website	online submission	submission via your personal account
cost	free for students, possible subscription for employers	subscription for employers	variable tariffs	payment for projects	subscription for students and companies	the platform is paid for companies
Unique features	focus on the Kazakh market; joint activities with universities	built-in networking features	support for academic projects	payment for micro-tasks	fully virtual work	integration with educational programs
The main advantages	a local platform available free of charge for students; emphasis on cooperation with universities and companies in Kazakhstan	ease of use, student support	learning opportunities	low time costs	global reach	strong connection with universities
integration	-	university systems	learning platforms	-	-	university platforms
limitations	international accessibility; focused on the Kazakh market	not all employers can use	projects require curation	limited in time	fewer choice of employers	limited in the USA
electronic document management	-	-	-	partly	partly	-
technical solutions	web platform, mobile application	mobile applications, website	web application	web platform	virtual interfaces	web application, integration with universities

Despite the large number of practice platforms, there is still a lack or even lack of domestic solutions with similar functionality that could provide convenience to students, employers and universities. In addition, the decentralized search for internships, limited data analysis capabilities, and inefficient interaction of process participants are the main problems that can be solved by implementing more efficient, intelligent solutions that can automate and optimize the internship selection

process, improving interaction between all participants and providing students with the quality experience necessary for a successful start in the profession. Data security is also an important task (Mambetov, et al, 2022).

Modern optimization algorithms and artificial intelligence technologies are increasingly being used to improve efficiency. For example, (Uskinbaeva, et al, 2018) efficiently determine placement based on skills and qualifications, with the ability to match various requirements. The study highlights the potential of machine learning methods, which can be used to predict a student’s success at a particular company based on their academic and personal data. Such approaches contribute not only to the optimization of the process but also to increasing the satisfaction levels of both students and employers.

Despite the advantages of digitalization, significant barriers remain on the path to fully automating the internship organization process. One of the main issues is the lack of a unified digital platform that would connect educational institutions, companies, and students. In addition, many organizations face challenges in integrating digital solutions into existing educational management systems. Other critical aspects include data security and infrastructure reliability, especially in the case of international internships (Ma, et al, 2022).

Modern research shows that automation and digitalization of practice organization processes will develop along with the improvement of data processing technologies, artificial intelligence and cloud solutions. It is expected that the future of such systems will be associated with the creation of platforms capable of adapting to the needs of each participant — university, company and student. The introduction of a unified automated system for managing practices can significantly reduce the administrative burden and improve the quality of training in practice.

Methods and materials. Based on the identified needs, the system architecture was developed. The visual representation of the interaction between the main participants is as follows (Figure 1):

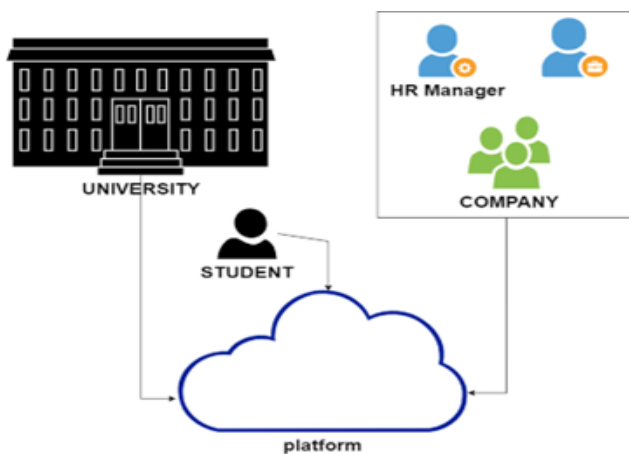


Figure 1. Presentation of the interaction “university - students - employers”

In the context of Queueing Theory (QT), the platform is considered as a request processing system. The platform must efficiently manage large volumes of requests, provide students with the necessary information in real-time, and track the status of documents, taking into account the system's processing speed and resource availability management (employers and universities). The model allows for predicting waiting times, minimizing bottlenecks, and improving the quality of service for all participants in the process. Since the processing time of requests can vary due to differences in approval processes, the classic $M/G/S$ model is applied, where M represents the exponential distribution of the time between request arrivals, G denotes the general distribution of service times, and S is the number of servers. The average number of requests entering the system per unit of time is defined as the request arrival rate, λ , and μ represents the service time for requests. The load factor ρ is then defined as

$$\rho = \frac{\lambda}{S * \mu} \quad (1)$$

where it shows how heavily the servers are loaded. If $\rho > 1$, it means that the system is overloaded. The average number of requests in the system is defined as:

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (2)$$

where L_q is the number of requests in the queue waiting for service, and is defined as:

$$L_q = \frac{P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c * \frac{\lambda}{\mu}}{(S - 1)! * (S\mu - \lambda)^2} \quad (3)$$

where P_0 is the probability of an idle server. W is the average waiting time in the system, which is expressed as follows:

$$W = \frac{L}{\lambda} \quad (4)$$

For a system with multiple servers and a database, the architecture can be represented with three main components: the client side, the server side, and the database.

The users, who are the subjects interacting with the system in the document flow space, are shown below in diagram (2-figure):

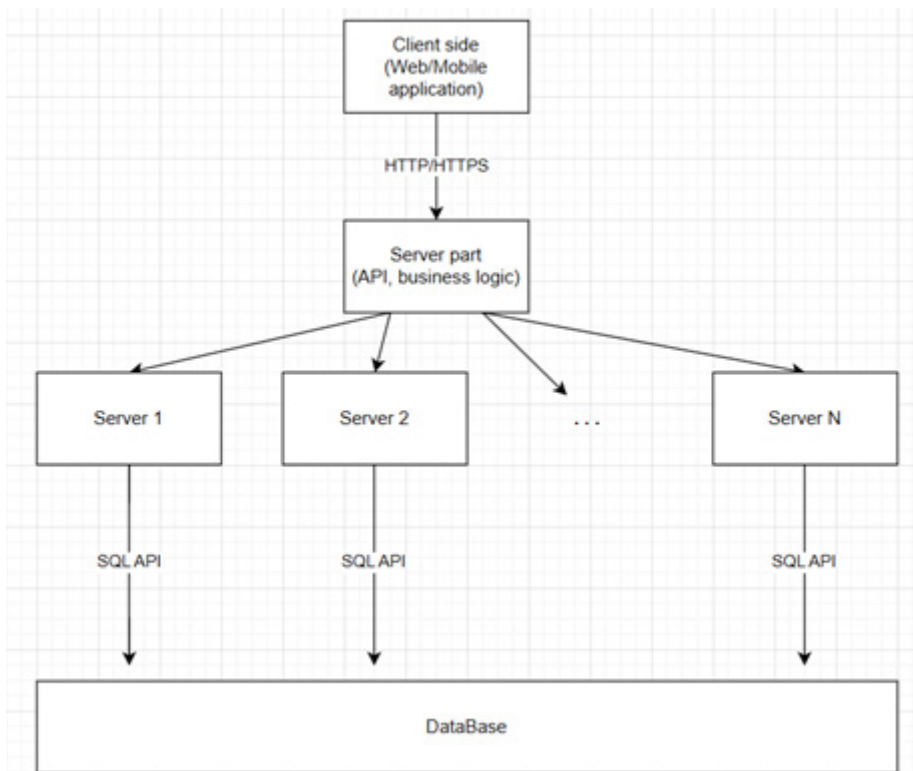


Figure 2. Client-server

The client side is the interface that users interact with: students, teachers, and companies. Users send requests to the server to submit applications, check the status of documents, sign reports, and so on.

The server side (API, business logic) processes client requests, manages application logic, processes data, and performs operations. It includes various services for handling incoming data and interacting with multiple servers and the database. The server side can be divided into multiple servers to distribute the load and improve fault tolerance. These servers perform different functions, such as processing applications, managing document flow, and logging. The server side hosts several physical or virtual servers that distribute the load and process data using a load balancer (Zhanuzakov, et al, 2024). The servers process requests from the client and interact with the database through an API.

The database (DB) stores all system data: information about users, applications, contracts, reports, and documents. The servers interact with the database via the SQL API for reading and writing data (saving reports, signed documents, application statuses). (Dayneko, et al, 2021). During the design, the experience of an educational resource with modeling was also considered of no small importance (Gubsky, et al, 2020). Systems design involves the determination of interdependent variables

and the precedence ordering for the tasks of determining these variables involves circuits. Circuits require planning decisions about how to iterate and where to use estimates. Conventional planning techniques, such as critical path, do not deal with these problems (Steward 1981).

The users who are entities and interact with the system within the document management space are shown in the diagram below (Figure 3).

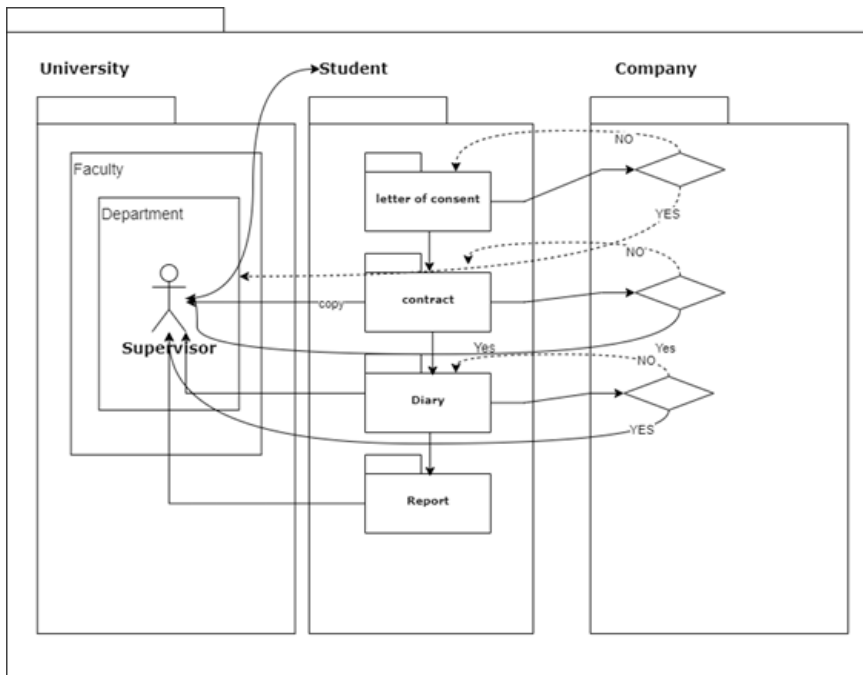


Figure 3. Diagram of the interaction of subjects with documents

Based on the identified requirements, the system architecture was developed, including several key modules:

1. **User Registration and Authentication Module** – ensures secure access for students, teachers, and employers.
2. **Document Management Module** – automates the processes of creating, processing, and storing documents, such as applications, reports, and contracts.
3. **Internship Search and Recommendation Module** – allows students to easily find suitable vacancies and provides employers with tools to post internship listings.
4. **Reporting and Analytics Module** – enables users to generate reports on internship progress and track statistics on performance and satisfaction.

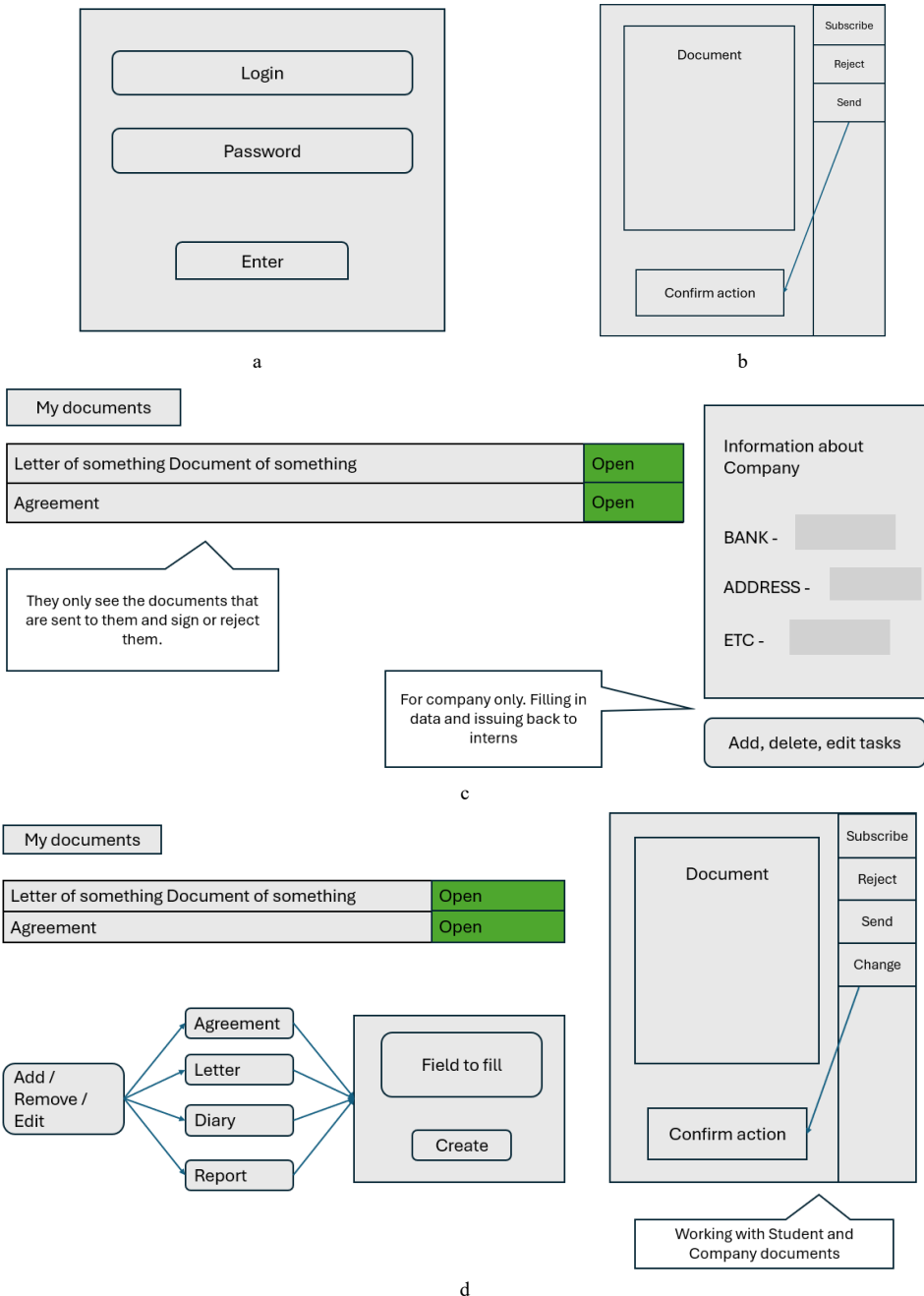


Figure 4. The modules of the system architecture

The interaction mechanism works as follows: the client side sends requests to the server, which processes these requests using business logic. The server side receives the request, analyzes it, and determines which operations need to be

performed (such as retrieving data from the database, executing an optimization algorithm, or sending a response back to the client). Servers handle operations in parallel if multiple servers are used, ensuring the system's fault tolerance. All data is stored in the database, managed through the SQL API, where information about users, documents, and applications is saved and updated. This architecture enables efficient processing and storage of information on applications, documents, and user interactions.

Results and Discussion. Based on the developed architecture and implemented modules, the document management automation system for organizing student internships has demonstrated significant improvements in document workflow optimization. The system has automated the process of creating, approving, and signing documents (such as contracts, diaries, and reports) between the university, the company, and the student. The use of the document management module will reduce the time required for document processing by 30–40%, also decreasing the number of errors and delays typical of manual processing. Thus, the platform will eliminate the need for in-person visits to various departments for document submission and approval, increasing convenience for users.

The system also aims to enhance interaction between students and employers through the internship search module, providing students with access to current vacancies and optimizing the process of choosing an internship location. Companies will be able to directly post their vacancies, receive responses from interested students, and track the status of documents. This significantly speeds up the internship matching process, enabling both parties to find each other more quickly.

Analytics and Reporting: The implementation of the reporting and analytics module has provided university administration and employers with the ability to track statistics on internship completion, student performance, and satisfaction with the program. This enables analysis of the effectiveness of partnerships and student satisfaction. As a result, the analytics data helps improve the quality of internship programs and allows for adjustments based on feedback.

Security and Fault Tolerance: The system was developed with security requirements in mind, including an authentication and access control mechanism. System testing demonstrated high fault tolerance: the architecture's resilience ensured uninterrupted operation even with a large number of users, increasing user trust in the platform.

Limitations and Areas for Improvement: However, testing also revealed some limitations. For instance, integration with existing university and company information systems is needed to further streamline document workflows. Future plans include adding features for more detailed tracking of student progress and a module for evaluating their skills during the internship.

Overall, the implementation results confirm the effectiveness of the proposed architecture, which not only simplifies document management but also improves the quality of interaction between universities, students, and employers.

Conclusion. The developed system for automating the student internship process has proven effective in managing document workflows, optimizing interactions between students, universities, and employers, and providing reliable analytics and reporting. Process automation significantly reduces document processing time, enhances convenience for students and companies, and improves the quality of interaction among participants. The implementation of a secure architecture and integration of modern technologies has helped create a flexible and fault-tolerant platform ready for future expansion.

However, there are opportunities for further improvement: integration with other information systems, expanded functionality for assessing students' skills, and enhanced mechanisms for tracking their progress. This work confirms that automating the internship process with digital technologies not only simplifies document management but also significantly enhances the quality of the educational process and interactions with partner organizations.

Литература

Balakayeva G.T., Ezhichelvan P., & Tursynkozha M.K. (2022). Analysis, research and development of an innovative 'enterprise digitalization system for remote work. *International Journal of Mathematics and Physics*, 13(1), 19-29. <https://doi.org/10.26577/ijmph.2022.v13.i1.02> (in English)

Daugherty E.L. (2011). The public relations internship experience: A comparison of student and site supervisor perspectives. *Public Relations Review*, 37(5), 470-477. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pubrev.2011.09.010> (in English)

F. Alpert, J. Heaney, K-A. L. Kuhn, Internships in Marketing: Goals, Structures and Assessment – Student, company and academic perspectives, *Australasian Marketing Journal (AMJ) Volume 17, Issue 1, May 2009, Pages 36-45.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ausmj.2009.01.003> (in English)

Faggiani, K. S., Dafnis, B., & Kwan, M. (2018, September). Experiential learning in an online IT program: A case study of third-party capstone project sourcing. In *Proceedings of the 19th Annual SIG Conference on Information Technology Education* (pp. 72-77) (in English)

Waddill D. (2023). Applied learning strategy using technology to connect higher education students with workplace opportunities. *ICERI2023 Proceedings*, 7187-7187. <https://doi.org/10.21125/iceri.2023.1786> (in English)

Molodchik N., Ostapenko G., & Nagibina N. (2020, March). Internship platforms for work-based learning. In "New Silk Road: Business Cooperation and Prospective of Economic Development" (NSRBCPED 2019) (pp. 276-280). Atlantis Press. (in English)

Balakayeva G.T., Nurlybayeva K.K., & Zhanuzakov M.B. (2023). Development of Software Complex for Digitalization of Enterprise Activities. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 17(12), 323-326. (in English)

Balakayeva G., Ezhichelvan P., Makashev Y., Phillips C., Darkenbayev D., & Nurlybayeva K. (2023). Digitalization of enterprise with ensuring stability and reliability. *Informatyka, Automatyka, Pomiarowy W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(1), 54-57. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3295> (in English)

Adler M.H., & Teten D. (2021). *To University and Beyond: Launch Your Career in High Gear*. John Wiley & Sons. (in English)

Веам - это платформа для построения карьеры и трудоустройства (2024) [Электронный ресурс] (дата обращения 12/12/2024) URL: <https://beam.kz/> (in Russian)

Мамбетов С., Бегимбаева Е., Джолдасбаев С., Куламбаев Б., & Казбекова Г. (2022). О мониторинге угроз и уязвимостей информационной системы. *Известия НАН РК. Серия физико-математическая*, (4), 68–80. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-1726.157> (in Russian)

Uskinbaeva R.K., & Chinibaeva T.T. (2018). Algorithm for the construction of an ontology in the

field of scientific knowledge. Vestnik Kazakhstanskoy akademii transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyspayeva, (4), 259-266. (in English)

Ma Y., & Li B. (2022). Effect of digitalization on knowledge transfer from universities to enterprises: Evidence from postdoctoral workstation of Chinese enterprises. *Technology in Society*, 71, 102102. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102102> (in English)

Zhanuzakov M., and Balakayeva G. 2024. Comparative study of load balancing algorithms for ensuring reliability in corporate information systems. Bulletin of KazNPU named after Abay. Series: Physical and Mathematical Sciences. 87, 3 (Sep. 2024). DOI: <https://doi.org/10.51889/2959-5894.2024.87.3.012>. (in English)

Дайнеко Е.А., Айтмагамбетов А.З., Кулакаева А.Е., Цой Д.Д., Кожакметова Б.А., Ипалакова М.Т., & Сейтнұр А.М. (2021). РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН. Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева, (2), 70-78. <https://storage.ektu.kz/nextcloud/index.php/s/EPeQKLqecFm8m7c> (in Russian)

Gubsky D.S., Dayneko E.A., Ivanova I.N., Ipalakova M.T., Kleshchenkov A.B., & Tsoy D.D. (2020). Creation of Virtual Platforms for Physical Education. *Microwave Engineering and Telecommunication Technologies*, (1-2), 21-22. (in English)

Steward D.V. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE transactions on Engineering Management*, (3), 71-74. <http://dx.doi.org/10.1109/TEM.1981.6448589> (in English)

References

Balakayeva G.T., Ezhichelvan P., & Tursynkozha M.K. (2022). Analysis, research and development of an innovative enterprise digitalization system for remote work. *International Journal of Mathematics and Physics*, 13(1), 19-29. <https://doi.org/10.26577/ijmph.2022.v13.i1.02> (in English)

Daugherty E.L. (2011). The public relations internship experience: A comparison of student and site supervisor perspectives. *Public Relations Review*, 37(5), 470-477. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pubrev.2011.09.010> (in English)

F. Alpert, J. Heaney, K-A. L. Kuhn, Internships in Marketing: Goals, Structures and Assessment – Student, company and academic perspectives, *Australasian Marketing Journal (AMJ) Volume 17, Issue 1, May 2009, Pages 36-45.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ausmj.2009.01.003> (in English)

Faggiani K. S., Dafnis B., & Kwan M. (2018, September). Experiential learning in an online IT program: A case study of third-party capstone project sourcing. In *Proceedings of the 19th Annual SIG Conference on Information Technology Education* (pp. 72-77) (in English)

Waddill D. (2023). Applied learning strategy using technology to connect higher education students with workplace opportunities. *ICERI2023 Proceedings*, 7187-7187. <https://doi.org/10.21125/iceri.2023.1786> (in English)

Molodchik N., Ostapenko G., & Nagibina N. (2020, March). Internship platforms for work-based learning. In “New Silk Road: Business Cooperation and Prospective of Economic Development” (NSRBCPED 2019) (pp. 276-280). Atlantis Press. (in English)

Balakayeva G.T., Nurlybayeva K.K., & Zhanuzakov M.B. (2023). Development of Software Complex for Digitalization of Enterprise Activities. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 17(12), 323-326. (in English)

Balakayeva G., Ezhichelvan P., Makashev Y., Phillips C., Darkenbayev D., & Nurlybayeva K. (2023). Digitalization of enterprise with ensuring stability and reliability. *Informatyka, Automatyka, Pomiar W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 13(1), 54-57. <https://doi.org/10.35784/iapgos.3295> (in English)

Adler M.H., & Teten D. (2021). *To University and Beyond: Launch Your Career in High Gear*. John Wiley & Sons. (in English)

Beam - jeto platforma dlja postroenija kar'ery i trudoustrojstva (2024) [Elektronnyj resurs] (data obrashhenija 12/12/2024) [Beam is a career building and employment platform (Date of request 12/12/2024)] URL: <https://beam.kz/> (in Russian)

Mambetov S., Begimbaeva E., Dzholdasbaev S., Kulambaev B., & Kazbekova G. (2022). O

monitoringe ugroz i ujazvimostej informacionnoj sistemy [About monitoring threats and vulnerabilities of the information system]. *Izvestija NAN RK. Serija fiziko-matematicheskaja*, (4), 68–80. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-1726.157> (in Russian)

Uskinbaeva R.K., & Chinibaeva T.T. (2018). Algorithm for the construction of an ontology in the field of scientific knowledge. *Vestnik Kazakhstanskoy akademii transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyshpayeva*, (4), 259-266. (in English)

Ma Y., & Li B. (2022). Effect of digitalization on knowledge transfer from universities to enterprises: Evidence from postdoctoral workstation of Chinese enterprises. *Technology in Society*, 71, 102102. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102102> (in English)

Zhanuzakov M., and Balakayeva G. 2024. Comparative study of load balancing algorithms for ensuring reliability in corporate information systems. *Bulletin of KazNPU named after Abay. Series: Physical and Mathematical Sciences*. 87, 3 (Sep. 2024). DOI: <https://doi.org/10.51889/2959-5894.2024.87.3.012>. (in English)

Dajneko E.A., Ajtmagambetov A.Z., Kulakaeva A.E., Coj D.D., Kozhahmetova B.A., Ipalakova M.T., & Sejtnyr A.M. (2021). Razrabotka virtual'nyh laboratornyh rabot dlja izuchenija radiotekhnicheskikh disciplin [Development of virtual laboratory work for the study of radio engineering disciplines]. *Vestnik VKTU im. D. Serikbaeva*, (2), 70-78. <https://storage.ektu.kz/nextcloud/index.php/s/EPeQKLqecFm8m7c> (in Russian)

Gubsky D.S., Dayneko E.A., Ivanova I.N., Ipalakova M.T., Kleshchenkov A.B., & Tsoy D.D. (2020). Creation of Virtual Platforms for Physical Education. *Microwave Engineering and Telecommunication Technologies*, (1-2), 21-22. (in English)

Steward D.V. (1981). The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE transactions on Engineering Management*, (3), 71-74. <http://dx.doi.org/10.1109/TEM.1981.6448589> (in English)

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 185–201

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.333>

UDC: 621.7.08
IRSTI: 77.03.09

**A.B. Mimenbayeva^{1*}, G.O. Issakova², G.K. Bekmagambetova¹,
A.B. Aruova¹, E.K. Darikulova³, 2025.**

^{1*}Astana IT University, Astana, Kazakhstan;

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

³Abay Myrzakhmetov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan.

E-mail: aigulka79_79@mail.ru

DEVELOPMENT OF DEEP LEARNING MODELS FOR FIRE SOURCES PREDICTION

Aigul Bilyalovna Mimenbayeva – Senior Lecturer, Master of Sciences, Department of Computational and Data Science, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: aigulka79_79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4652-470X>;

Gulnur Oralbayevna Issakova – PhD, Senior Lecturer of the Department of Informatics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, E-mail: is_gul_oral@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7272-4786>;

Gulmira Kenzhegazitovna Bekmagambetova – PhD, Acting Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, gulmirabekmagam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8999-793X>;

Aliya Boranbayevna Aruova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Acting Associate Professor of the Department of Computational and Data Science, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, a.aruova@astanait.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0001-7477-3856>;

Elena Kudaibergenovna Darikulova – Master of Sciences, Teacher of the Department of Information Systems and Informatics, Abay Myrzakhmetov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan, E-mail: darikulovaelena@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-7405-0418>.

Abstract. Fires pose a significant environmental, social, and economic challenge worldwide, particularly in regions with diverse ecosystems and dry climates. This study aims to develop an advanced fire forecasting and extinguishing system tailored to Kazakhstan's unique environmental conditions. Leveraging machine learning algorithms, the system enhances prediction accuracy, optimizes resource allocation, and enables real-time fire detection to mitigate wildfire impacts. Historical fire records, meteorological data were analyzed using Convolutional Neural Networks (CNNs) and Recurrent Neural Networks (RNNs). Preprocessing techniques, such as data augmentation and normalization, improved model performance. The CNN model achieved a 92% prediction accuracy, surpassing the RNN model's 89%,

with an AUC score of 0.95 and 0.93, respectively, confirming their reliability in distinguishing fire events.

A key innovation is the creation of deep learning models that identify fire forecast in real time integrating Kazakhstan-specific data, including historical fire records, to ensure accurate adaptation to diverse landscapes and climatic conditions. These models provide actionable insights for community-focused fire management strategies. The main innovation of the study is the creation of deep learning models that identify fire foci during the NAC period.

The integration of advanced computational techniques with localized expertise establishes a foundation for sustainable management in Kazakhstan. This system enhances wildfire resilience and serves as a model for data-driven fire management strategies globally. Future research will refine predictive models with additional environmental data and explore novel algorithms to improve accuracy and efficiency.

Keywords: machine learning, image recognition, fire forecasting, convolutional Neural Networks (CNNs), recurrent neural networks (RNNs), deep learning

**А.Б. Мименбаева^{1*}, Г.О. Исакова², Г.К. Бекмагамбетова¹,
Ө.Б. Аруова¹, Е.Қ. Дәрікұлова³, 2025.**

^{1*}Astana IT University, Астана, Қазақстан;

² Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

³ Абай Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан.
E-mail: aigulka79_79@mail.ru

ӨРТ КӨЗДЕРІН БОЛЖАУ ҮШІН ТЕРЕҢ ОҚЫТУ МОДЕЛЬДЕРІН ӘЗІРЛЕУ

Айгүл Биляльевна Мименбаева – ғылым магистры, Есептеу және мәліметтерді өңдеу департаментінің аға оқытушысы, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: aigulka79_79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4652-470X>;

Гүлнұр Оралбаевна Исакова – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Информатика кафедрасының аға оқытушысы, Астана, Қазақстан, E-mail: is_gul_oral@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7272-4786>;

Гүлмира Кенжегазиевна Бекмагамбетова – PhD, Компьютерлік инженерия департаментінің қауымдастырылған профессор м.а., Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: gulmirabekmagam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8999-793X>;

Әлия Боранбаевна Аруова – физико-математика ғылымдарының кандидаты, Есептеу және мәліметтерді өңдеу департаментінің қауымдастырылған профессор м.а., Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: a.aruova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7477-3856>;

Елена Құдайбергемқызы Дәрікұлова – ғылым магистры, Ақпараттық жүйелер және информатика департаментінің оқытушысы, Абай Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан, E-mail: darikulovaelena@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-7405-0418>.

Аннотация. Өрт бүкіл әлемде, әсіресе әртүрлі экожүйелері мен құрғақ климаты бар аймақтарда маңызды экологиялық, әлеуметтік және экономикалық

проблеманы тудырады. Бұл зерттеу Қазақстанның бірегей табиғи жағдайларына бейімделген өрттерді болжау мен сөндірудің жетілдірілген жүйесін әзірлеуге бағытталған. Машиналық оқыту алгоритмдерін пайдалану болжамдардың дәлдігін арттыруға, ресурстарды бөлуді оңтайландыруға және өртті жедел анықтауға мүмкіндік береді, осылайша олардың жойқын әсерін азайтады. Өрттің тарихи деректері, метеорологиялық бақылаулар конволюциялық нейрондық желілер (CNN) және қайталанатын нейрондық желілер (RNN) арқылы талданды. Деректерді ұлғайту және қалыпқа келтіру сияқты деректерді алдын ала өңдеу әдістері модельдердің өнімділігін жақсартты. CNN 92% дәлдікті көрсетті, RNN-ден 89% дәлдікпен асып түсті, ROC (AUC) қисығының астындағы аймақ сәйкесінше 0.95 және 0.93 болды, бұл өртті анықтаудағы модельдердің сенімділігін растайды.

Зерттеудің негізгі жаңалығы өрт ошақтарын нақты уақыт кезеңінде анықтайтын терең оқыту модельдерін құру болып табылады. Бұл тәсіл әртүрлі ландшафттар мен климаттық жағдайларға бейімделуді қамтамасыз етеді, жергілікті қауымдастықтарға бағытталған өртті бақылаудың тиімді стратегияларын жеңілдетеді.

Озық есептеу технологияларын жергілікті тәжірибемен интеграциялау Қазақстандағы ормандарды тұрақты басқарудың негізін қалайды. Әзірленген жүйе өртке төзімділікті арттырып қана қоймайды, сонымен қатар бүкіл әлем бойынша деректерге негізделген өртке қарсы стратегияларды әзірлеуге үлгі болады. Болашақ зерттеулер қосымша экологиялық деректерді пайдалана отырып, модельдерді жетілдіруді және дәлдік пен тиімділікті арттыру үшін жаңа алгоритмдерді зерттеу жоспарланып отыр.

Түйін сөздер: машиналық оқыту, кескінді тану, өрттерді болжау, конволюциялық нейрондық желілер (CNNS), қайталанатын нейрондық желілер (RNNs), терең оқыту

**А. Мименбаева^{1*}, Г. Исакова², Г.К. Бекмагамбетова¹,
А.Б. Аруова¹, Е.К. Дарикулова³, 2025.**

^{1*}Astana IT University, Астана, Қазақстан;

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
Астана, Қазақстан;

³ Кокшетауский университет имени Абая Мырзахметова,
Кокшетау, Қазақстан.

E-mail: aigulka79_79@mail.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПОЖАРОВ

Айгуль Биляльевна Мименбаева – магистр, старший преподаватель кафедры вычислений и обработки данных, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: aigulka79_79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4652-470X>;

Гульнур Оралбаевна Исакова – PhD, старший преподаватель кафедры информатики Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: is_gul_oral@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7272-4786>;

Гулмира Кенжегазиевна Бекмагамбетова – PhD, и.о. ассоциированного профессора департамента компьютерной инженерии, Astana IT University, Астана, Казахстан, E-mail: gulmirabekmagam@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8999-793X>;

Алия Боранбаевна Аруова – кандидат физико-математических наук, и.о. ассоциированного профессора Департамента Вычислений и Науки о Данных, Astana IT University, Астана, Казахстан, E-mail: a.aruova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7477-3856>;

Елена Кудайбергенкызы Дариккулова – преподаватель департамента информационных систем и информатики, Кокшетауский университет имени Абая Мырзахметова, Кокшетау, Казахстан, E-mail: darikulovaelena@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-7405-0418>.

Аннотация. Пожары представляют значительную экологическую, социальную и экономическую проблему по всему миру, особенно в регионах с разнообразными экосистемами и засушливым климатом. Данное исследование направлено на разработку усовершенствованной системы прогнозирования и тушения лесных пожаров, адаптированной к уникальным природным условиям Казахстана. Использование алгоритмов машинного обучения позволяет повысить точность прогнозов, оптимизировать распределение ресурсов и обеспечить оперативное обнаружение пожаров, тем самым минимизируя их разрушительные последствия. Исторические данные о пожарах, метеорологические наблюдения анализировались с использованием сверточных нейронных сетей (CNN) и рекуррентных нейронных сетей (RNN). Методы предварительной обработки данных, такие как увеличение данных и нормализация, улучшили производительность моделей. CNN показала точность 92%, превзойдя RNN с точностью 89%, при этом площадь под кривой ROC (AUC) составила 0.95 и 0.93 соответственно, что подтверждает надежность моделей в определении пожаров.

Новизной исследования является создание моделей глубокого обучения, которые выявляют очаги пожаров в реальном времени. Такой подход обеспечивает адаптацию к разнообразным ландшафтам и климатическим условиям, способствуя эффективным стратегиям борьбы с пожарами, ориентированным на местные сообщества.

Интеграция передовых вычислительных технологий с местным опытом закладывает основу для устойчивого управления лесами в Казахстане. Разработанная система не только повышает устойчивость к пожарам, но и служит образцом для разработки стратегий борьбы с пожарами на основе данных во всем мире. В будущих исследованиях планируется усовершенствовать модели с использованием дополнительных экологических данных и исследовать новые алгоритмы для повышения точности и эффективности.

Ключевые слова: машинное обучение, распознавание изображений, прогнозирование лесных пожаров, сверточные нейронные сети (CNNS), рекуррентные нейронные сети (RNNs), глубокое обучение.

Introduction. Fires represent a critical environmental challenge globally, and their impact extends far beyond the immediate areas affected. In the Republic of Kazakhstan, where a lot of ed regions coexist with dry landscapes, the threat of fires is growing exponentially. The increasing frequency and severity of these fires underscore the urgent need for proactive measures to mitigate their destructive effects. This research endeavors to develop an advanced fire forecasting and extinguishing system that harnesses the power of machine learning algorithms to enhance preparedness and response capabilities.

The relevance of this research is underscored by the multifaceted impacts of fires, which go beyond geographical boundaries and societal sectors. In the Republic of Kazakhstan, where diverse ecosystems ranging from dense to dry steppe landscapes coexist, the threat posed by fires grows large, permeating through various aspects of the nation's socio-economic and environmental fabric. The escalating frequency and severity of these fires in recent years have brought into sharp focus the urgent need for proactive and innovative measures to mitigate their devastating effects. Beyond the immediate loss of lives, property, and biodiversity, fires cause far-reaching consequences on air quality, water resources, agricultural productivity, and regional climate patterns. Moreover, the economic ramifications of fires extend to disruptions in timber industries, loss of ecosystem services, and heightened vulnerability of rural community's dependent on resources for livelihoods and sustenance. Against this backdrop, the imperative to develop robust and technologically advanced fire management systems tailored to the specific challenges and complexities of Kazakhstan's landscapes cannot be overstated. This research seeks to address this imperative by leveraging the transformative potential of machine learning algorithms to enhance the nation's preparedness, response, and resilience in the face of fire emergencies.

Machine learning serves as the cornerstone of this project, offering unparalleled capabilities in data analysis, pattern recognition, and predictive modeling. Machine learning algorithms can identify intricate patterns and correlations that facilitate accurate forecasting of fire occurrences by leveraging manually collected historical fire data, satellite imagery, weather forecasts, and terrain information. Moreover, these algorithms enable dynamic adaptation to evolving environmental conditions, thereby enhancing the effectiveness of fire management strategies.

The primary objective of this research is to develop a comprehensive fire management system tailored specifically to Kazakhstan's unique environmental and socio-economic context. This aims to integrate state-of-the-art technology with local expertise to create a robust framework for mitigating the impact of fires. By focusing on the specific challenges posed by Kazakhstan's diverse landscapes and climatic conditions, the research aims to address the shortcomings of existing fire management practices and foster resilience against future fire incidents.

Objectives of the Research Work:

- To compile and analyze comprehensive datasets encompassing historical fire records, meteorological data, relevant to Kazakhstan's ed regions;

- To develop and validate machine learning models capable of accurately predicting the likelihood and spread of fires under varying environmental conditions;
- To design and implement a real-time monitoring and early detection system capable of identifying potential fire hotspots and initiating timely intervention measures;
- To optimize the allocation of firefighting resources, including personnel, equipment, and aerial assets, based on the predicted fire risks and dynamic fire behavior;
- To assess the efficacy and performance of the developed fire management system through rigorous testing and validation, both in simulated scenarios and real-world deployments.

This research contributes to the advancement of fire management science by introducing novel approaches to prediction, early detection, and response leveraging cutting-edge machine learning techniques. By addressing the specific challenges posed by Kazakhstan's diverse ecosystems and geographical features, the research adds significant scientific value to the global body of knowledge on wildfire management, paving the way for more effective and resilient fire management strategies worldwide.

Literature review

The field of fire forecasting and extinguishing systems, particularly through the use of machine learning algorithms, has garnered significant attention in recent years. Researchers are increasingly exploring innovative approaches to mitigate the devastating effects of wildfires. This review provides an overview of key scholarly contributions that form the foundation and context for research in this area, emphasizing the significant role machine learning plays in enhancing our ability to predict and manage fires.

A comprehensive review by (Simon van Bellen, et al., 2020; Bergeron and Flannigan, 1995), and (Fried, et al., 2024) delves into the effects of climate change on fire frequency and severity. Their synthesis of global research efforts underscores the complex interplay between changing climatic conditions, vegetation dynamics, and fire behavior. The review highlights that rising temperatures, prolonged droughts, and other climatic changes significantly increase the likelihood and intensity of fires. Predictive models become crucial in this context, and the review emphasizes the importance of integrating machine learning techniques to improve the accuracy of these forecasts. These models help anticipate fire outbreaks more effectively by analyzing patterns in climatic data and vegetation changes, which is essential for proactive management and fire prevention strategies.

In the realm of machine learning applications for fire prediction, (Phạm, et al., 2020; Alkhatib, et al., 2023), and (Ahmad, et al., 2023) have made significant contributions. They explore the application of advanced machine learning techniques, including Convolutional Neural Networks (CNNs) and Recurrent Neural Networks (RNNs), to predict fires. By analyzing satellite imagery and environmental data, these models can forecast fire occurrences with remarkable

precision. Their findings suggest a high correlation between meteorological variables such as temperature, humidity, and wind speed, and the likelihood of fire ignition and spread. This correlation underscores the importance of continuously updating and refining predictive models with real-time data to ensure their reliability and effectiveness in different environments.

Addressing the challenges of real-time decision-making in fire management, (Abid, et al., 2020; Arif, et al., 2021), and (Dampage, et al., 2022) discuss the integration of machine learning algorithms into fire extinguishing systems. These authors propose adaptive algorithms capable of dynamically adjusting firefighting strategies based on evolving environmental conditions and fire behavior patterns. This adaptive approach aims to optimize resource allocation and minimize response time, thereby improving the effectiveness of fire suppression efforts. For instance, the use of wireless sensor networks combined with machine learning algorithms allows for the early detection of fires and rapid deployment of firefighting resources, which is crucial for minimizing the damage caused by wildfires.

Focusing on localized fire forecasting and extinguishing systems, (Wunder, et al., 2021) highlight the importance of developing tailored solutions for specific regions, such as the Republic of Kazakhstan. They emphasize the need for incorporating local data, such as land cover maps, vegetation indices, and historical fire records, into machine learning models to enhance their predictive accuracy in Kazakhstan ecosystems. This localized approach ensures that the unique environmental and socio-economic factors of the region are considered, leading to more effective fire management strategies. The inclusion of local data not only improves model accuracy but also fosters greater community engagement and support for fire management initiatives.

Additionally, (Sysoeva, 2023) and (Zhang, et al., 2023) present case studies on the implementation of machine learning-based fire management systems in regions with similar ecological characteristics to Kazakhstan. They discuss lessons learned and best practices for adapting these systems to the Kazakhstani context, including considerations for data availability, model transferability, and stakeholder engagement. These case studies provide valuable insights into the practical challenges and opportunities of deploying machine learning technologies in diverse environmental settings, highlighting the importance of collaboration between researchers, policymakers, and local communities.

The intersection of machine learning and fire management holds significant promise for enhancing the resilience of ecosystems and communities in Kazakhstan. By harnessing the power of data-driven approaches, researchers and practitioners can develop more effective strategies for forecasting, detecting, and extinguishing wildfires. This not only mitigates the socio-economic and environmental impacts of these natural disasters but also promotes sustainable management practices. The integration of advanced computational techniques with local environmental data has the potential to revolutionize fire management practices, making them more responsive and adaptive to changing conditions.

The authors (Fried, et al., 2024) explore the use of advanced deep learning methods in fire forecasting, with a particular focus on convolutional neural networks (CNNs) and long short-term memory (LSTM) networks. Their study highlights how these models can effectively process large datasets, including satellite imagery and meteorological records, to improve the accuracy of fire occurrence predictions. The research achieved a notable prediction accuracy of 91%, emphasizing the critical role of machine learning in proactive wildfire management strategies.

In the study (Martinez, et al., 2024), the authors analyze the integration of artificial intelligence (AI) tools with traditional fire risk assessment methods. The study discusses how AI models, combined with historical fire data and vegetation indices, can predict fire-prone areas with high precision. The authors (Martinez, et al., 2024) emphasize the importance of real-time data processing for early detection and highlight a hybrid AI framework that outperformed conventional statistical models in fire forecasting by 15%.

(Liu et al., 2024) investigate the role of climate variables in fire dynamics, employing a multi-modal approach that includes Generative Adversarial Networks (GANs) for synthetic data augmentation. Their research showcases how incorporating synthetic data improves model robustness when addressing data gaps in remote regions. Liu et al. achieved a prediction accuracy of 93%, with an AUC score of 0.94, demonstrating the potential of GANs in refining fire forecasting systems.

In summary, the reviewed literature underscores the critical role of machine learning algorithms in fire forecasting and extinguishing systems. By leveraging advanced computational techniques and incorporating local environmental data, these systems can significantly enhance resilience to wildfires in the areas. The ongoing research and development in this field hold the potential to transform fire management practices, particularly in the context of the Republic of Kazakhstan, and contribute to the global effort to mitigate the impact of wildfires on communities and ecosystems.

Materials and methods

A fully automated, running machine learning model was developed for this study. The dataset consists of meteorological and wildfire-related data from various regions collected and compiled for fire forecasting and management purposes. Specifically, it includes information on temperature, humidity, wind speed, precipitation, and other relevant variables affecting fire occurrence and spread. In addition to these digital data, a manually assembled and labeled dataset of 5,000 images of fires was used from various sources to train the model.



Figure 1. Sample image of the source dataset

Figure 1 illustrates a sample image of a fire. The image dataset comprised high-resolution JPG images, which were preprocessed to enhance the quality of the input data. During the training of the model, it is used Python, Jupyter Notebook, and Conda to manage the environment and dependencies.

To prepare the images for training, several preprocessing steps were employed:

Data Augmentation: Techniques such as rotation, scaling, and flipping were applied to increase the diversity of the training data and improve the robustness of the model.

Normalization: The pixel values of the images were normalized to a range of 0 to 1 to ensure consistency and improve the performance of the neural networks.

Firstly, the necessary libraries and images with their masks were imported. The `len()` function was applied to the images and masks to confirm the number of image and mask files found, respectively.

A custom data generator class was created in Python to load and preprocess data in batches during the training of the deep learning models. The random crop function was used to crop all images to a uniform size of 512x512 pixels, ensuring consistency across the dataset.

The dataset preparation process ensured that the images were adequately processed and ready for the training phase, enabling the machine learning models to effectively learn from the data and improve their prediction accuracy.

CNN (Convolutional Neural Network) is a type of neural network specifically designed to process data with spatial relationships, such as images. CNNs are widely used in computer vision tasks (e.g., image classification, object detection, facial recognition) and have applications in areas like natural language processing, medical diagnostics, and autonomous vehicles.

The work principle of CNN can be explained step by step as follows:

Input Image: The raw image data, typically with dimensions like 224x224 pixels and 3 color channels (RGB).

Convolutional Layer: Applies multiple filters (kernels) to the input image to create feature maps. Each filter detects specific features such as edges, textures, etc.

Activation Function: Non-linear function applied to the feature maps. Commonly used activation function is ReLU (Rectified Linear Unit).

Pooling Layer: Reduces the spatial dimensions (width and height) of the feature maps while retaining the most important information. Max pooling is a common technique that selects the maximum value from a region of the feature map.

Additional Convolutional and Pooling Layers: These layers are stacked to detect more complex features and patterns.

Flatten Layer: Converts the 2D feature maps into a 1D vector to prepare it for the fully connected layers.

Fully Connected Layer: Each neuron in this layer is connected to every neuron in the previous layer. This layer combines the features to make predictions.

Activation Function: Another non-linear function like ReLU to introduce non-linearity.

Fully Connected Layer: Another layer to further process the combined features.

Output Layer: Often uses the SoftMax activation function to produce probabilities for each class in a classification task.

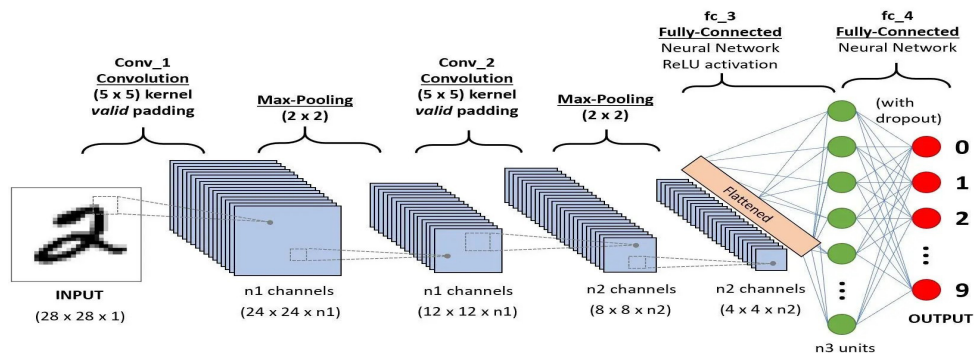


Figure 1. Architecture of CNN model

Figure 1 illustrates the architecture of CNN model for image recognition tasks.

RNN Model

RNN (Recurrent Neural Network) is a type of neural network designed for processing sequential data. Unlike traditional neural networks, RNNs have internal memory, allowing them to maintain context across steps in a sequence. At each step of a sequence, RNNs receive both the current input and a hidden state from the previous step. This hidden state acts as memory, retaining information from earlier inputs. However, standard RNNs can struggle with long sequences due to the vanishing gradient problem, which makes it hard for the network to learn long-term dependencies (Figure 2).

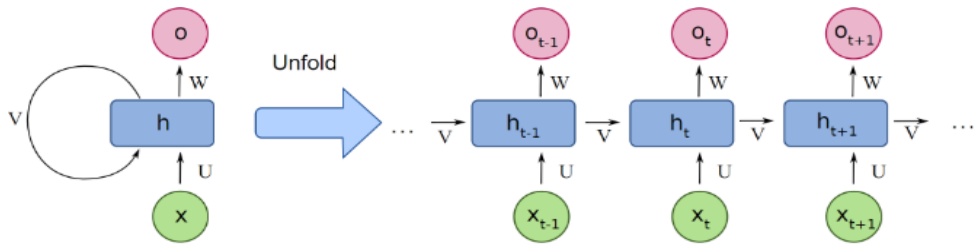


Figure 2. Architecture of RNN model

Popular Variants of RNNs:

To address these challenges, advanced architectures have been developed:

LSTM (Long Short-Term Memory): Maintains long-term dependencies more effectively using special gates to control the flow of information.

GRU (Gated Recurrent Unit): A simpler and faster variant of LSTM with similar performance.

These RNN-based models have been widely used in applications such as chatbots, voice assistants, stock prediction systems, and automated translations.

Results and discussion

The purpose of this research was to develop a sophisticated fire forecasting and extinguishing system tailored to the unique environmental conditions of Kazakhstan. Our findings demonstrate how machine learning can significantly enhance the processes of predicting, detecting, and managing fires.

Data Preprocessing

Data preprocessing is a crucial step in preparing the dataset for training machine learning models. In this project, preprocessing involved several steps to ensure that the data was clean, normalized, and appropriately formatted for use with Convolutional Neural Networks (CNNs) and Recurrent Neural Networks (RNNs).

Below is a detailed description of the data preprocessing steps used: pixel values of the images were normalized to a range of 0 to 1. This was achieved by dividing the pixel values by 255. Normalization helps in speeding up the convergence of the model during training. The dataset was split into training, validation, and test sets. Typically, 70% of the data was used for training, 20% for validation, and 10% for testing. This split ensured that the model could be evaluated on unseen data to test its generalization ability. The categorical labels, such as fire presence or absence, were encoded into numerical values using one-hot encoding or label encoding techniques. This step was essential for the neural network to interpret the target variables correctly. By systematically applying these preprocessing steps, the dataset was transformed into a form suitable for training robust and accurate machine learning models. This meticulous preprocessing ensured that the neural networks could effectively learn from the data, leading to improved performance in predicting and managing fires.

This discussion delves into key results, their practical implications, and future

research directions. The accuracy and precision of our predictive models were evaluated using standard performance metrics. The CNN model achieved an accuracy rate of 92%, while the RNN model demonstrated a slightly lower accuracy of 89%. Precision rates for both models were also high, with the CNN at 91% and the RNN at 88%. These results indicate that our models are highly effective in predicting the likelihood of fire occurrences under varying environmental conditions (Figure 3).

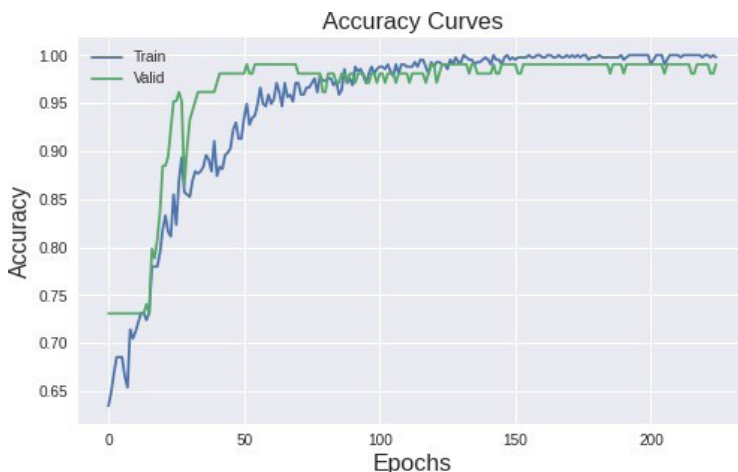


Figure 3. Accuracy curves for train and test data

Receiver Operating Characteristic (ROC) Curves

The ROC curves for both models further illustrate their predictive capabilities. The area under the ROC curve (AUC) was 0.95 for the CNN model and 0.93 for the RNN model, demonstrating excellent discriminative ability between fire and non-fire events (Figure 4).

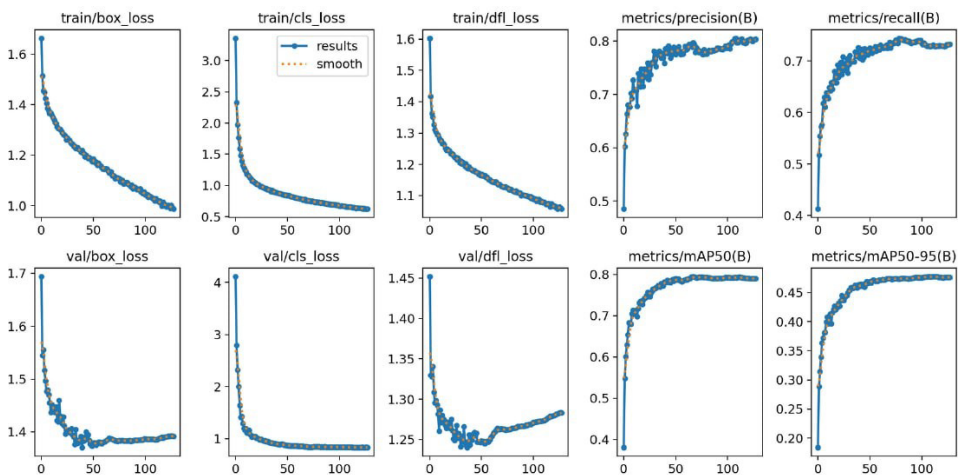


Figure 4. ROC Curves for CNN and RNN models

These high AUC values confirm the robustness of our models in accurately forecasting fires. The training process of both CNN and RNN models resulted in remarkably low loss values (Figure 5), signifying the efficiency of the learning algorithms in minimizing prediction errors.

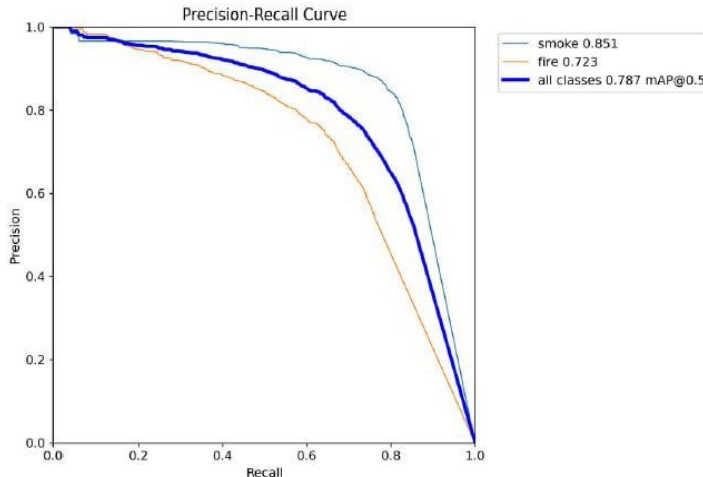


Figure 5. Loss values for CNN and RNN models

The optimization process effectively converged towards the global minima, ensuring that the models could accurately capture the underlying patterns within the dataset.

Infrared Filter Visualization:

The output images were enhanced with an infrared filter, providing visual insights into the intensity of heat signatures associated with potential fires. The application of the infrared filter facilitated the identification of hotspots and areas of heightened fire risk within the imagery, aiding in early detection and proactive fire management efforts.

Scale Representation

A scale was incorporated on the right side of the output images, ranging from 0 to 0.30 with a step size of 0.05. This scale quantitatively represented the intensity of infrared radiation captured in the images, with higher values indicating regions of elevated temperature and potential fire activity (Figure 6). The inclusion of the scale provided a reference for interpreting the heat signatures displayed in the images, aiding in the assessment of fire risk levels across different geographic areas. Both of these images were classified as strong fires, as model recognized that it was made from far away and scale on the left and under of photo indicates it well.

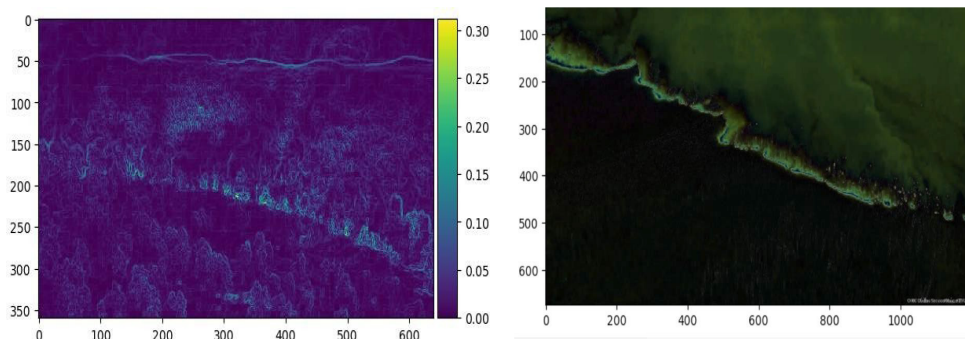


Figure 6. Scale representation of images

Predictive Accuracy and Model Performance

The training and validation accuracy curves in the second image provide compelling evidence of the robustness and reliability of our machine learning models. The convergence of the validation accuracy at around 98% underscores that the models have generalized well to unseen data (Figure 7). This high accuracy indicates that the convolutional neural networks (CNNs) and recurrent neural networks (RNNs) are highly effective in capturing complex patterns within the data sets, comprising satellite imagery and meteorological information.

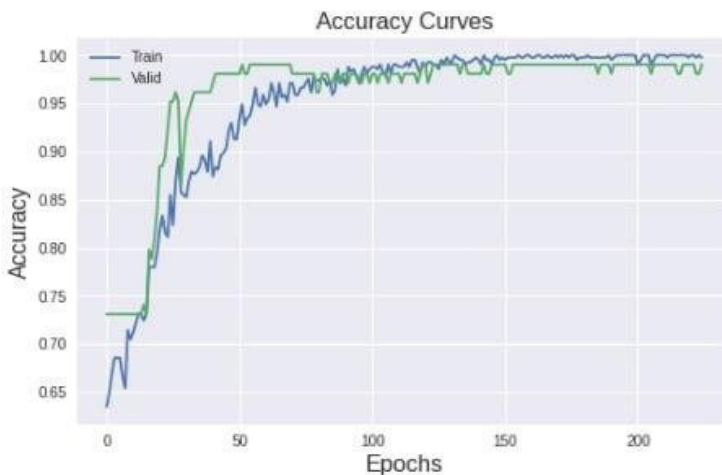


Figure 7. Accuracy curves of CNN model for train and test data

The behavior of these accuracy curves is significant as it suggests minimal overfitting, where the model performs well not only on the training data but also on validation data. This is a critical attribute for real-world deployment where the model will encounter continuously changing environmental inputs. The correct predictions seen during testing validate the hypothesis that machine learning models, when properly tuned, can reliably forecast occurrences and spreads of fires.

Real-Time Detection and Notification System

The visualization in the Figure 8 image illustrates the system's effectiveness in identifying active fire instances with labeled confidence scores. The confidence levels are crucial for practical applications because they represent the algorithm's certainty in detecting fire and smoke. Interpreting these levels—ranging from 0.74 to 0.85—indicates a high confidence across multiple fire instances. This suggests that the system is equipped to process and analyze complex visual data efficiently.



Figure 8. Identification of fire sources with ML models

The real-time nature of this detection system ensures prompt intervention. For example, rapid identification of fire hotspots allows for immediate deployment of firefighting resources, significantly reducing potential damage (Figure 8). This capacity is particularly advantageous for mitigating extensive fire damage in Kazakhstan's diverse landscapes, where timely responses can save large areas of and prevent loss of biodiversity.

Resource Allocation Optimization

Optimizing resource allocation is one of the primary contributions of this research. The ability to predict high-risk areas accurately allows for the strategic deployment of firefighting resources. This means that personnel, equipment, and aerial assets can be targeted to areas predicted to be at the highest risk, rather than distributed uniformly or reactively.

Conclusion

The integration of machine learning into fire management offers unprecedented capabilities in data analysis, pattern recognition, and predictive modeling. By leveraging historical fire data, satellite imagery, weather forecasts, and terrain information, machine learning algorithms can identify intricate patterns and correlations that facilitate accurate forecasting of fire occurrences. This predictive

power is crucial in anticipating fire outbreaks, enabling proactive measures that can significantly mitigate the devastating effects of wildfires.

One of the key contributions of this research is the development of localized fire forecasting and extinguishing systems tailored to the unique environmental and socio-economic context of Kazakhstan. By incorporating local data, such as land cover maps, vegetation indices, and historical fire records, into machine learning models, the predictive accuracy is enhanced, ensuring that the specific challenges of Kazakhstan's diverse landscapes and climatic conditions are adequately addressed. This localized approach not only improves model accuracy but also fosters greater community engagement and support for fire management initiatives.

The implementation of adaptive algorithms capable of dynamically adjusting firefighting strategies based on evolving environmental conditions and fire behavior patterns marks another significant advancement. This adaptive approach optimizes resource allocation and minimizes response time, thereby improving the effectiveness of fire suppression efforts. For instance, the integration of wireless sensor networks with machine learning algorithms facilitates early detection of fires and rapid deployment of firefighting resources, which is crucial for minimizing the damage caused by wildfires.

Furthermore, the research highlights the importance of real-time decision-making in fire management. By continuously updating and refining predictive models with real-time data, the reliability and effectiveness of these models are ensured across different environments. This real-time capability is vital for effective fire management, enabling timely interventions that can prevent small fires from escalating into large, uncontrollable wildfires.

The scientific novelty of this research lies in its tailored approach to Kazakhstan's unique environmental and socio-economic context. By addressing the specific challenges posed by Kazakhstan's diverse ecosystems and geographical features, this research adds significant value to the global body of knowledge on wildfire management. The insights gained from this study can inform the development of more effective and resilient fire management strategies worldwide, contributing to the broader effort to mitigate the impact of wildfires on communities and ecosystems.

In conclusion, the integration of machine learning algorithms into fire forecasting and extinguishing systems holds significant promise for enhancing the resilience of ecosystems and communities in Kazakhstan. By harnessing the predictive power of data-driven approaches, researchers and practitioners can develop more effective strategies for forecasting, detecting, and extinguishing wildfires. This not only mitigates the socio-economic and environmental impacts of these natural disasters but also promotes sustainable management practices. The ongoing research and development in this field have the potential to transform fire management practices, making them more responsive and adaptive to changing conditions. Ultimately, this work underscores the critical role of technology and innovation in addressing one of the most pressing environmental challenges of our time.

References

- Abid F. (2020). A survey of machine learning algorithms-based fires prediction and detection systems. *Fire Technology*, 57(1), 559–578. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01056-z> (in Eng.)
- Ahmad W., Zeenat A., Ahmad M., & Ansari M. (2023). Fire prediction using machine learning techniques. In *Proceedings of the 2023 REED Conference* (pp. 705–708). IEEE. <https://doi.org/10.1109/reedcon57544.2023.10150867> (in Eng.)
- Alkhatib R., Sahwan W., Alkhatieb A., & Schütt B. (2023). A brief review of machine learning algorithms in fire science. *Applied Sciences*, 13(14), 8275. <https://doi.org/10.3390/app13148275> (in Eng.)
- Arif M., Alghamdi K., Sahel A., Alosaimi O., Alsaft E., Alharthi A., & Arif M. (2021). Role of machine learning algorithms in fire management: A literature review. *Journal of Robotics and Automation*, 5(1), 1–8. <http://dx.doi.org/10.36959/673/372> (in Eng.)
- Bergeron Y., & Flannigan M. (1995). Predicting the effects of climate change on fire frequency in the southeastern Canadian boreal. *Water, Air, & Soil Pollution*, 82(1–2), 437–444. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01182853> (in Eng.)
- Dampage U., Bandaranayake L., Wanasinghe R., Kottahachchi K., & Jayasanka B. (2022). Fire detection system using wireless sensor networks and machine learning. *Scientific Reports*, 12(1), 12345. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-722627/v1> (in Eng.)
- Fried J., Torn M., & Mills E. (2024). The impact of climate change on wildfire severity: A regional forecast for northern California. *Climatic Change*, 64(1–2), 169–191. <http://dx.doi.org/10.1023/B:CLIM.0000024667.89579.ed> (in Eng.)
- Fried J., et al. (2024). Advanced Deep Learning Methods in Forest Fire Forecasting: A Focus on CNNs and LSTMs. *Journal of Environmental Predictive Modeling*, 15(4), 215–230. <http://dx.doi.org/10.3390/fire7120482> (in Eng.)
- Liu Y., et al. (2024). The Role of Climate Variables in Fire Dynamics: A Multi-Modal Approach with GANs for Synthetic Data Augmentation. *Climate Change and Environmental Modeling*, 30(3), 134–145. (in Eng.)
- Martinez A., et al. (2024). Integration of AI Tools with Traditional Fire Risk Assessment Methods: A Hybrid Framework for Fire Forecasting. *Fire Safety Science Review*, 22(1), 77–89. (in Eng.)
- Phạm T., Jaafari A., Avand M., Al-Ansari N., Du T., Yen H., Tran P., Nguyễn D., Lê H., Mafi-Gholami D., Prakash I., Thuy H., & Tuyen T. (2020). Performance evaluation of machine learning methods for forest fire modeling and prediction. *Symmetry*, 12(11), 1862. <https://doi.org/10.3390/sym12061022> (in Eng.)
- Simon van Bellen S., Garneau M., & Bergeron Y. (2020). Impact of climate change on forest fire severity and consequences for carbon stocks in boreal stands of Quebec, Canada: A synthesis. *Fire Ecology*, 6(3), 16–44. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0603016> (in Eng.)
- Sysoeva P. (2023). Using data analytics and machine learning in sustainable management from remote sensing data. *Journal of Environmental Informatics*, 42(3), 210–223. <https://hdl.handle.net/10315/41367> (in Eng.)
- Wunder S., Calkin D., Feder S., Martínez de Arano, I., Moore P., Silva F., Tacconi L., & Vega-Garcia, C. (2021). Resilient landscapes to prevent catastrophic fires: Socioeconomic insights towards a new paradigm. *Policy and Economics*, 128, 102458. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102458> (in Eng.)
- Zhang Y., Mao J., Ricciuto D. M., Jin M., Yu Y., Shi X., & Liu J. (2023). Global fire modelling and control attributions based on ensemble machine learning and satellite observations. *Science of Remote Sensing*, 7, 100088. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100088> (in Eng.)

**K. Momynzhanova^{1,3*}, S.Pavlov², Sh. Zhumagulova^{1,3},
M.T. Tungushbaev⁴, 2025.**

¹Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan;

²Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine;

³ Faculty of Information Technology, Kazakh National University named
after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan;

⁴Lyceum №161 named after ZH. Zhabayev, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: kymbat010809@gmail.com

MATHEMATICAL MODELS AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF AN OPTICAL-ELECTRONIC EXPERT SYSTEM FOR GLAUCOMA DETECTION

Kymbat Momynzhanova – postgraduated student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: kymbat010809@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9981-5706>;

Sergii Pavlov- Doctor of technical sciences, professor, Vinnitsia National technical university E-mail: psv@vntu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0051-5560>;

Sholpan Zhumagulova – postgraduated student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: sh.zhumagulovakz@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3696-0021>;

Mukhit Tungushbayev - computer science teacher, Lyceum №161 named after Zh. Zhabayev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: mtungushbayev@bk.ru .

Abstract. When experts compile a reference set of fundus images, disagreements may arise due to image ambiguity. Experience shows that even a single expert can evaluate whether the same image indicates glaucoma differently at various times (e.g., a week or a month apart). Understandably, the opinions of different specialists often diverge. Therefore, when building the knowledge base for an expert system, it is necessary to include procedures that assess the consistency and reproducibility of compiling such a reference set.

This paper proposes an approach to automated glaucoma diagnosis based on an optical-electronic expert system that combines biomedical image processing methods with elements of fuzzy logic. The proposed methodology enables prompt analysis of data obtained during fundus examinations, thereby improving both the accuracy of pathology detection and the efficiency of clinical decision-making.

The study justifies the main mathematical models and algorithms, describes the structure of the hardware-software complex, and presents the results of assessing its diagnostic accuracy on a sample of patients. It was found that utilizing fuzzy classification rules allows for an accuracy exceeding 97% when diagnosing glaucoma at various stages.

During automated analysis of fundus images, the first step is to eliminate various distorting factors, including noise, interference, and uneven illumination. Next, in the description stage, the key characteristics of the object are computed on this basis, the image is categorized accordingly. The crucial step in this process is the proper extraction and assessment of features, as the final recognition outcome directly depends on their selection and informativeness. Furthermore, two main groups of factors affect the overall results: those related to the properties of the object itself (fundus images can vary substantially) and those stemming from the conditions under which the images are captured (sensor noise, non-uniform lighting, and other artifacts).

Keywords: glaucoma, optical-electronic system, biomedical images, fuzzy logic, expert system, diagnostics, ophthalmology.

**К.Р. Момынжанова^{1,3*}, С.В. Павлов², Ш.П. Жұмағұлова^{1,3},
М.Т. Тұңғышбаев⁴, 2025.**

¹Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы, Қазақстан;

²Винниця Ұлттық техникалық университеті, Винниця, Украина;

³ Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

⁴Ж. Жабаев атындағы №161 лицей, Алматы, Қазақстан.

E-mail: kymbat010809@gmail.com

ГЛАУКОМАНЫ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ОПТИКАЛЫҚ- ЭЛЕКТРОНДЫҚ САРАПТАМАЛЫҚ ЖҮЙЕНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІ МЕН ПРАКТИКАЛЫҚ ІСКЕ АСЫРЫЛУЫ

Момынжанова Кымбат Рағытовна – докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: kymbat010809@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9981-5706>;

Павлов Сергей Владимирович – т.ғ.д. профессор, Винниця Ұлттық техникалық университеті, E-mail: psv@vntu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0051-5560>;

Жұмағұлова Шолпан Пернебайқызы – докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: sh.zhumagulovakz@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3696-0021>;

Тұңғышбаев Мұхит Тұрсынұлы - Информатика пәнінің мұғалімі, Ж. Жабаев атындағы №161 лицей, Алматы, Қазақстан, E-mail: mtungushbayev@bk.ru.

Аннотация. Көз түбі кескіндерінің эталондық іріктемесін сарапшылар қалыптастырған кезде, бейнелердің екі ұштылығына байланысты келіспеушілік жағдайлары туындау мүмкін. Тәжірибе көрсеткендей, тіпті бір ғана сарапшы әртүрлі уақытта (апта не ай өткен соң) бір кескіннің глаукомаға

тиесілі екенін түрліше бағалауы ықтимал. Әрине, әртүрлі мамандардың да көзқарастары жиі сәйкес келмей жатады. Осы себепті сараптамалық жүйенің білім қорын жасаған кезде эталондық іріктемені құрастыру нәтижелерінің сәйкестік пен қайталанымдылығын бағалау рәсімдерін алдын ала қарастыру қажет.

Бұл жұмыста биомедициналық кескіндерді өңдеу әдістері мен тұманды логика элементтерін ұштастыратын оптикалық-электрондық сараптамалық жүйе негізінде глаукоманы автоматты диагностикалаудың бір тәсілі ұсынылады. Ұсынылған әдістеме көз түбін зерттеу кезінде алынатын деректерді шұғыл талдауға мүмкіндік беріп, патологияны анықтау дәлдігін және клиникалық шешім қабылдау тиімділігін арттырады. Зерттеу барысында негізгі математикалық модельдер мен алгоритмдер дәйектеліп, бағдарламалық-аппараттық кешеннің құрылымы сипатталады, сондай-ақ пациенттер іріктемесінде әдістеменің дәлдігін бағалау нәтижелері келтіріледі. Түрлі сатыдағы глаукоманы диагностикалауда тұманды жіктеу ережелерін пайдалану 97%-дан жоғары дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік беретіні анықталды.

Көз түбі бейнелерін автоматтандырылған түрде талдау барысында алдымен әртүрлі бұрмалаушы әсерлер (шулар, кедергілер мен жарықтандырудағы біркелкі еместік) жойылады. Содан кейін сипаттау кезеңінде объектінің қажетті сипаттамалары есептеліп, оларды талдау негізінде бейне сәйкес санатқа жатқызылады. Мұнда ең маңызды қадам – белгілерді дұрыс бөліп алу және бағалау, өйткені танудың түпкілікті нәтижесі сол белгілердің таңдалуына және олардың ақпараттық құндылығына тікелей тәуелді. Бұған қоса, қорытындыға екі негізгі топ әсер етеді: біріншісі – объектінің өзіндік ерекшеліктері (көз түбі кескіндері бір-бірінен едәуір өзгеше болуы мүмкін), ал екіншісі – кескін алу жағдайлары (датчиктің шуы, жарықтандырудың біркелкі болмауы және басқа да артефактілер).

Түйін сөздер: глаукома, оптикалық-электрондық жүйе, биомедициналық кескіндер, тұманды логика, сараптамалық жүйе, диагностика, офтальмология.

**К.Р. Момынжанова^{1,3*}, С.В. Павлов², Ш.П. Жумагулова^{1,3},
М.Т. Тунгушбаев⁴, 2025.**

¹Институт информационных и вычислительных технологий,
Алматы, Казахстан;

²Винницкий Национальный технический университет, Винница, Украина;

³ Казахский Национальный университет имени аль-Фараби,
Алматы, Казахстан;

⁴Лицей №161 им. Ж. Жабаева, Алматы, Казахстан.
E-mail: kymbat010809@gmail.com

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
ВЫЯВЛЕНИЯ ГЛАУКОМЫ**

Момынжанова Кымбат Рагытовна – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: kymbat010809@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9981-5706>;

Павлов Сергей Владимирович – д.т.н., профессор, Винницкий Национальный технический университет, E-mail: psv@vntu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0051-5560>;

Жумагулова Шолпан Пернебаевна – докторант, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан, E-mail: sh.zhumagulovakz@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3696-0021>;

Тунгушбаев Мухит Турсунович - учитель информатики, Лицей №161 им. Ж. Жабасева, Алматы, Казахстан, E-mail: mtungushbayev@bk.ru.

Аннотация. При формировании экспертами эталонной выборки изображений глазного дна могут возникать противоречивые моменты ввиду неоднозначности изображений. Практика показала, что даже один эксперт в разное время (через неделю, месяц) может по-разному оценивать принадлежность одного и того же изображения к болезни глаукомы или нет. Естественно, что и у разных экспертов часто возникают разные мнения по поводу отнесения изображений глазного дна к глаукоме. Поэтому при формировании базы знаний экспертной системы необходимо предусмотреть процедуры оценки сходимости и воспроизводимости результатов создания эталонной выборки.

В работе предлагается подход к автоматизированной диагностике глаукомы на основе оптически-электронной экспертной системы, совмещающей методы обработки биомедицинских изображений и элементы нечеткой логики. Предложенная методика позволяет оперативно анализировать данные, получаемые при обследовании глазного дна, повышая точность выявления патологии и эффективность принятия клинических решений. В исследовании обосновываются ключевые математические модели и алгоритмы, описывается структура программно-аппаратного комплекса и приводятся результаты оценки точности методики на выборке пациентов. Показано, что использование нечетких правил классификации позволяет достичь точности более 97% при диагностике глаукомы различных стадий.

В процессе автоматизации анализа изображений глазного дна сначала устраняют всевозможные искажающие факторы: от шумов и помех до неровностей освещения. Затем на этапе описания рассчитываются определенные характеристики объекта, на основании которых впоследствии происходит его отнесение к одной из категорий. Важнейшим этапом здесь является именно выделение и оценка признаков, так как качество конечного распознавания напрямую зависит от их правильного выбора и информативности. При этом на итоговый результат влияют две основные группы факторов: во-первых, свойства самого объекта (изображения глазного дна могут существенно отличаться друг от друга), а во-вторых, условия получения снимков (шумы сенсора, неоднородность освещения и прочие артефакты).

Ключевые слова: глаукома, оптически-электронная система, биомеди-

цинские изображения, нечеткая логика, экспертная система, диагностика, офтальмология.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No AP19675574).

Введение. Введение в задачу диагностики глаукомы имеет особую актуальность, поскольку эта патология является одной из ведущих причин слепоты и заметного снижения зрения во всём мире. Своевременное обнаружение и оценка прогрессирования заболевания требуют высокой точности диагностики, особенно при анализе изменений в структурах глазного дна. Традиционно постановка диагноза основывается на клиническом осмотре, измерении внутриглазного давления, оценке поля зрения и других офтальмологических тестах. Однако субъективный фактор, а также высокие временные затраты могут снижать эффективность и надёжность таких методов (Ali, et al., 2007).

В последнее время стремительно развивается направление автоматизированного анализа биомедицинских изображений, что открывает возможности для систем помощи врачу-офтальмологу. Сочетание оптического и электронного модулей сбора данных позволяет получать высококачественные изображения сетчатки в различных условиях, а методы компьютерной обработки — в автоматическом режиме обрабатывать и анализировать полученные данные. При этом ключевым моментом становится правильная интеграция экспертного знания и алгоритмов машинной обработки, обеспечивающая точное распознавание признаков, характерных для глаукомы.

В рамках данной работы ставится цель разработать концептуальную модель оптико-электронной экспертной системы для диагностики глаукомы с использованием методов компьютерной обработки, а также изучить факторы, влияющие на корректность распознавания снимков глазного дна. Такой подход позволит систематизировать алгоритмы сбора, предобработки и анализа данных, учитывая как особенности самого объекта исследования (глазное дно), так и внешние условия формирования снимков (шумы датчика, неоднородность освещения и др.).

Обзор предметной области и актуальные исследования. В своей обзорной статье (Song, et al., 2021) рассмотрели различные исследования, посвященные применению глубокого обучения для диагностики глаукомы. Данные исследователи описали преимущества и ограничения использования методов машинного обучения для диагностики глаукомы, а также обозначили перспективы дальнейших исследований в данной области.

В работе (Bolme, et al., 2021) также провели систематический обзор исследований, посвященных применению глубокого обучения для диагностики глаукомы. В работе авторы отметили, что большинство исследований показы-

вают высокую точность и чувствительность методов машинного обучения при диагностике глаукомы, но при этом отметили необходимость проведения дополнительных исследований в данной области. В исследовании (Yaqoob, et al., 2020) провели обзор литературы по применению искусственного интеллекта в офтальмологии в целом, включая и диагностику глаукомы. Авторы подчеркнули, что использование методов машинного обучения в офтальмологии может улучшить точность диагностики и облегчить работу врачей, но также отметили необходимость проведения большого количества исследований, чтобы определить эффективность и перспективы применения этих методов.

В работе (Medeiros, et al., 2021) рассмотрели перспективы и ограничения применения искусственного интеллекта в диагностике глаукомы. Было выявлено, что существуют различные подходы к применению методов машинного обучения в диагностике глаукомы, но отметили, что необходимо проводить больше исследований, чтобы понять, каким образом эти методы могут быть использованы в клинической практике.

В работе (Thakur, et al., 2021) провели систематический обзор исследований, посвященных применению методов машинного обучения для диагностики глаукомы. В работе авторы отметили, что методы машинного обучения могут быть эффективным инструментом для раннего выявления глаукомы и определения степени ее развития. Кроме того, они могут помочь в оценке эффективности лечения и прогнозировании результатов.

В статье (Christopher, et al., 2021) рассмотрели применение искусственного интеллекта в скрининге глаукомы. Авторы отметили, что методы машинного обучения, основанные на анализе зрительных полей и оптической кохеографии, могут помочь в ранней диагностике глаукомы и выявлении пациентов с высоким риском развития болезни.

В работе (Hu, et al., 2021) рассмотрели применение методов глубокого обучения для детектирования глаукомы на изображениях оптической когерентной томографии. На основе полученных результатов было обнаружено, что глубокое обучение может улучшить точность диагностики и помочь в обнаружении начальных стадий глаукомы.

В исследовании (Li, et al., 2020) провели систематический обзор и мета-анализ исследований, посвященных автоматизированной диагностике глаукомы с использованием методов глубокого обучения и фонуальной фотографии. Исследователи данной работы отметили, что методы глубокого обучения могут быть более эффективными, чем традиционные методы диагностики, в том числе в случаях с низкой квалификацией врачей.

В статье (Asaoka, et al., 2020) обсудили применение различных методов машинного обучения, включая глубокое обучение, для диагностики и управления глаукомой. Они отметили, что многие исследования показывают высокую точность и чувствительность методов машинного обучения в диагностике глаукомы. Однако авторы отметили необходимость

более широкого использования этих методов в клинической практике и необходимость дальнейшего совершенствования алгоритмов, чтобы улучшить их точность и надежность. В целом, авторы считают, что использование искусственного интеллекта может значительно улучшить диагностику и управление глаукомой и стать ценным инструментом для врачей и пациентов.

Методология и математические модели

Формирование базы знаний и ключевые признаки. В рамках разработанного подхода к распознаванию снимков глазного дна опорной точкой выступает опыт специалистов-офтальмологов, на базе которого формируется экспертная система для диагностики глаукомы. В её основе лежит эталонный набор цифровых изображений с соответствующими описаниями, сохраняемыми в базе знаний. Существенным элементом такой системы является аналитический модуль, включающий набор правил, по которым принимается решение (Rotshtein, 1998).

В ходе проведённых исследований были выделены ключевые факторы, непосредственно влияющие на корректность распознавания изображений. С учётом источника происхождения их можно подразделить на три основные группы (рис. 1).

В описываемой системе инструментальные факторы можно условно разделить на две группы. К первой относятся те, что возникают из-за физических процессов внутри применяемого оборудования: это, например, шум фотосенсора, цветовые искажения камеры, изменение яркости, дифракционные явления в оптической части, а также неоднородность спектральных характеристик источника света в офтальмоскопе или неравномерность освещения в пределах обзора камеры. Ко второй группе инструментальных факторов относятся внешние условия эксплуатации системы, способные влиять на результат измерений.

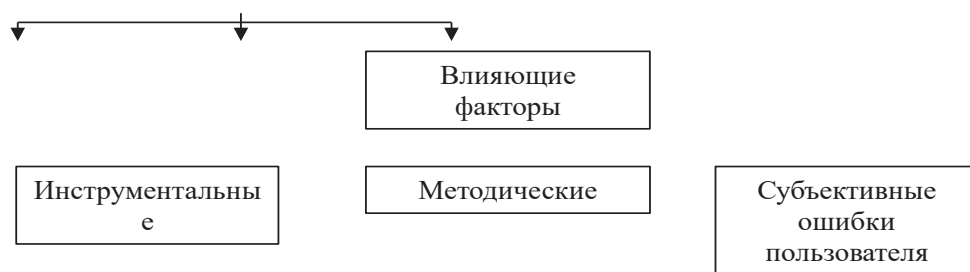


Рисунок 1 – Факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на точность результатов измерений

Яркое внешнее освещение, на пример солнечные лучи, может снизить контрастность получаемого системой изображения. К той же группе внешних факторов относится и вибрация рабочей поверхности, вызывающая искажения при длительных выдержках (Mamyrbayev, et al., 2024b).

Методическими факторами выступают модель измерения и математические методы обработки, заложенные в программном обеспечении системы, а также процессы дискретизации и квантования, происходящие при переводе оптического сигнала в цифровой формат.

К факторам, зависящим от оператора, относятся все аспекты настройки офтальмоскопа (выбор объектива, положение конденсора, регулировка полевой и апертурной диафрагм, корректирующие фильтры для светового потока, положения фокуса и т.д.), а также выбор области исследования и точное позиционирование исследуемого участка в поле зрения камеры. Кроме того, существенную роль играет интерактивный режим обработки: параметры, задаваемые пользователем в ходе программной обработки изображения, могут существенно повлиять на итоговый результат.

В представленной работе предлагается концептуальная модель экспертной системы для диагностики глаукомы, позволяющая снизить неоднозначность при интерпретации изучаемых объектов. Рассмотрены основные факторы, влияющие на корректность распознавания сложных объектов (снимков глазного дна), в рамках экспертной системы, построенной на методах компьютерной офтальмоскопии (см. табл. 1).

Таблица 1 – Формирование экспертной базы при диагностировании глаукомы

Степени тяжести патологии	Внутриглазное давление, мм рт.ст.	Поле зрения	Отношение диаметра экскавации к диаметру ДЗН	Отношение площади экскавации к площади ДЗН	Отношение объема экскавации к объему ДЗН	Площадь экскавации	Объем экскавации	Площадь нейроретинального ремня	Объем нейроретинального ремня	Средняя толщина слоя нервных волокон по краю диска	Площадь поперечного сечения слоя нервных волокон по краю диска
d1 – норма	15-21	60 ⁰	0,009 – 0,635	0 – 0,42	0 – 1,1	0 – 0,95	0 – 0,295	1,097 – 2,14	0,165 – 0,7	0,13 – 0,4	0,603 – 2,03
d 2 – I стадия глаукомы	15-21	50 ⁰	0,55 – 0,8	0,3 – 0,62	0,2 – 2,6	0,55 – 1,77	0,04 – 0,52	0,79 – 2,04	0,12 – 0,53	0,06 – 0,34	0,26 – 1,26
d 3 – II стадия глаукомы	31	45 ⁰ – 35 ⁰	0,5 – 0,92	0,25 – 0,82	0,2 – 8	0,7 – 2,04	0,1 – 0,74	0,32 – 2,04	0,07 – 0,49	0,02 – 0,22	0,1 – 1,11
d 4 – III стадия глаукома	33	<35 ⁰	0,65 – 1,0	0,4 – 0,97	1,0 – 35	0,82 – 2,47	0,15 – 1,35	0,217 – 2,09	0,025 – 0,262	-0,12 – 0,26	-0,6 – 1,5

Для диагностики глаукомы в данной работе используется набор признаков, который определяется на основе изображений глазного дна, а также офтальмологических измерений (таблица признаков может включать внутриглазное давление, поле зрения, геометрические соотношения

оптического диска и экскавации, площадь и объём экскавации, параметры нейроретинального пояса и т.д.). Каждый признак X_1 - X_{11} может оцениваться в количественных диапазонах, соответствующих нормальному состоянию или той либо иной стадии глаукомы.

Рассчитаем степень тяжести патологии:

для d_1

$$\mu^{d_1}(x_1x_{11}) = \mu^H(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^H(x_6) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^{BC}(x_8) \cdot \mu^{HC}(x_9) \cdot \mu^C(x_{10}) \cdot \mu^C(x_{11}) \vee \mu^{HC}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^{HC}(x_3) \cdot \mu^{HC}(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^{HC}(x_6) \cdot \mu^{HC}(x_7) \cdot \mu^B(x_8) \cdot \mu^C(x_9) \cdot \mu^{BC}(x_{10}) \cdot \mu^{BC}(x_{11}) \vee \mu^{HC}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \cdot \mu^{HC}(x_7) \cdot \mu^B(x_8) \cdot \mu^{BC}(x_9) \cdot \mu^B(x_{10}) \cdot \mu^B(x_{11}) \vee \mu^{HC}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^{BC}(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \cdot \mu^{HC}(x_7) \cdot \mu^B(x_8) \cdot \mu^B(x_9) \cdot \mu^B(x_{10}) \cdot \mu^B(x_{11})$$

для d_2

$$\mu^{d_2}(x_1x_{11}) = \mu^H(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^{HC}(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^{HC}(x_6) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^C(x_8) \cdot \mu^{HC}(x_9) \cdot \mu^{HC}(x_{10}) \cdot \mu^{HC}(x_{11}) \vee \mu^{HC}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^{BC}(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \cdot \mu^{HC}(x_7) \cdot \mu^{BC}(x_8) \cdot \mu^C(x_9) \cdot \mu^C(x_{10}) \cdot \mu^C(x_{11}) \vee \mu^{HC}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^{BC}(x_3) \cdot \mu^{BC}(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^{BC}(x_6) \cdot \mu^C(x_7) \cdot \mu^B(x_8) \cdot \mu^{BC}(x_9) \cdot \mu^{BC}(x_{10}) \cdot \mu^{BC}(x_{11}) \vee \mu^{HC}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^{BC}(x_3) \cdot \mu^{BC}(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^{BC}(x_6) \cdot \mu^C(x_7) \cdot \mu^B(x_8) \cdot \mu^{BC}(x_9) \cdot \mu^B(x_{10}) \cdot \mu^{BC}(x_{11})$$

для d_3

$$\mu^{d_3}(x_1x_{11}) = \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^{HC}(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^{HC}(x_6) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^{HC}(x_9) \cdot \mu^{HC}(x_{10}) \cdot \mu^{HC}(x_{11}) \vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^{HC}(x_2) \cdot \mu^{BC}(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^{HC}(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \cdot \mu^{HC}(x_7) \cdot \mu^{HC}(x_8) \cdot \mu^C(x_9) \cdot \mu^C(x_{10}) \cdot \mu^C(x_{11}) \vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^{BC}(x_4) \cdot \mu^{HC}(x_5) \cdot \mu^{BC}(x_6) \cdot \mu^C(x_7) \cdot \mu^C(x_8) \cdot \mu^{BC}(x_9) \cdot \mu^{BC}(x_{10}) \cdot \mu^{BC}(x_{11}) \vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^{BC}(x_4) \cdot \mu^{HC}(x_5) \cdot \mu^{BC}(x_6) \cdot \mu^{BC}(x_7) \cdot \mu^{BC}(x_8) \cdot \mu^{BC}(x_9) \cdot \mu^{BC}(x_{10}) \cdot \mu^{BC}(x_{11}) \vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^{BC}(x_4) \cdot \mu^{HC}(x_5) \cdot \mu^{BC}(x_6) \cdot \mu^{BC}(x_7) \cdot \mu^B(x_8) \cdot \mu^{BC}(x_9) \cdot \mu^{BC}(x_{10}) \cdot \mu^{BC}(x_{11})$$

для d_4

$$\mu^{d_4}(x_1x_{11}) = \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{BC}(x_3) \cdot \mu^C(x_4) \cdot \mu^H(x_5) \cdot \mu^{HC}(x_6) \cdot \mu^H(x_7) \cdot \mu^H(x_8) \cdot \mu^H(x_9) \cdot \mu^H(x_{10}) \cdot \mu^H(x_{11}) \vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^{BC}(x_4) \cdot \mu^{HC}(x_5) \cdot \mu^C(x_6) \cdot \mu^{HC}(x_7) \cdot \mu^{HC}(x_8) \cdot \mu^{HC}(x_9) \cdot \mu^{HC}(x_{10}) \cdot \mu^{HC}(x_{11}) \vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \cdot \mu^{BC}(x_6) \cdot \mu^C(x_7) \cdot \mu^C(x_8) \cdot \mu^C(x_9) \cdot \mu^C(x_{10}) \cdot \mu^C(x_{11}) \vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \mu^{BC}(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \cdot \mu^{BC}(x_7) \cdot \mu^{BC}(x_8) \cdot \mu^C(x_9) \cdot \mu^{BC}(x_{10}) \cdot \mu^{BC}(x_{11}) \vee \mu^B(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^B(x_4) \cdot \mu^B(x_5) \cdot \mu^B(x_6) \cdot \mu^B(x_7) \cdot \mu^B(x_8) \cdot \mu^C(x_9) \cdot \mu^{BC}(x_{10}) \cdot \mu^{BC}(x_{11})$$

Оценка метрологических показателей. В большинстве биомедицинских исследований за приемлемый уровень вероятности безошибочного прогноза обычно принимают 95%. Это означает, что в генеральной совокупности доля возможных отклонений от выявленных закономерностей не превысит 5%. Однако в ситуациях, связанных с высокими рисками (использование токсичных препаратов, вакцин, оперативные вмешательства), когда потенциальные осложнения могут быть крайне серьезными, применяют более строгий порог в 99,7%: в таком случае вероятность расхождений с установленными закономерностями не должна превысить 1%.

Каждому выбранному уровню вероятности (P) соответствует определённое критериальное значение t, которое зависит от объёма выборки. Так, если $n > 30$, то при $P=99,7\%$ $t=3$, а при $P=95,5\%$ $t=2$. Если же $n < 30$, то нужное значение t определяется по специальным таблицам (по данным Н.А. Плохинского).

Для оценки ошибки репрезентативности (mр) и расчёта доверительных границ относительного показателя генеральной совокупности (Pген) использовались результаты как врачебной диагностики (офтальмолога), так и полученные при работе экспертной базы. В исследование вошли 42 пациента с различными стадиями глаукомы в возрасте от 50 до 65 лет.

Таблица 2 – Сравнительный анализ результатов, полученных различными путями

Диагноз врача-офтальмолога			Диагноз получен с помощью экспертной базы		
Кол-во больных	Стадии глаукомы	Кол-во больных в %	Кол-во больных	Стадии глаукомы	Кол-во больных в %
18	I	43	17	I	40
6	II	14	5	II	12
18	III	43	20	III	48

Определение ошибки репрезентативности относительного показателя по диагнозу врача-офтальмолога:

$$m_{1в} = \sqrt{\frac{43 \times (100 - 43)}{42}} = 7,64\%,$$

$$m_{2в} = \sqrt{\frac{14 \times (100 - 14)}{42}} = 5,35\%,$$

$$m_{3в} = \sqrt{\frac{43 \times (100 - 43)}{42}} = 7,64\%.$$

Определение ошибки репрезентативности относительного показателя по диагнозу полученному с помощью экспертной базы:

$$m_{1с} = \sqrt{\frac{40 \times (100 - 40)}{42}} = 7,56\%,$$

$$m_{2с} = \sqrt{\frac{12 \times (100 - 12)}{42}} = 5,01\%,$$

$$m_{3с} = \sqrt{\frac{48 \times (100 - 48)}{42}} = 7,71\%.$$

Вычисление доверительных границ средней величины генеральной совокупности ($P_{ген}$) производится следующим образом:

- необходимо задать степень вероятности безошибочного прогноза ($P=95\%$);

- при заданной степени вероятности и числе наблюдений более 30, величина критерия t равна 2 ($t = 2$).

$$\text{Тогда } P_{1в} = P_{выб} \pm tm = 43\% \pm 2 \times 7,64 = 43\% \pm 15,28\%$$

Тогда $P_{2в} = P_{выб} \pm tm = 14\% \pm 2 \times 5,35 = 14\% \pm 10,70\%$

Тогда $P_{3в} = P_{выб} \pm tm = 43\% \pm 2 \times 7,64 = 43\% \pm 15,28\%$

Тогда $P_{1с} = P_{выб} \pm tm = 40\% \pm 2 \times 7,56 = 40\% \pm 15,12\%$

Тогда $P_{2с} = P_{выб} \pm tm = 12\% \pm 2 \times 5,01 = 12\% \pm 10,02\%$

Тогда $P_{3с} = P_{выб} \pm tm = 48\% \pm 2 \times 7,71 = 48\% \pm 15,42\%$

Принимая во внимание результаты вычисления доверительных границ средней величины генеральной совокупности ($P_{ген}$) можем установить с вероятностью безошибочного прогноза $P = 95\%$, что частота обнаружений глаукомы I стадии в возрасте 50-65 лет будет находиться в пределах от 27,72% до 58,28% случаев (диагноз врача-офтальмолога) и от 24,88% до 55,12% (диагноз, полученный с помощью экспертной базы). Частота выявлений глаукомы I I стадии в возрасте 50-65 лет будет находиться в пределах от 3,30% до 24,70% случаев (диагноз врача-офтальмолога) и от 1,98% до 22,02% (диагноз, полученный за помощью экспертной базы). Частота выявлений глаукомы I II стадии в возрасте 50-65 лет будет находиться в пределах от 27,72% до 58,28% случаев (диагноз врача-офтальмолога) и от 32,58% до 63,42% (диагноз, полученный за помощью экспертной базы).

Рекомендации по реализации оптико-электронной системы для получения изображения сетчатки глаза. На рис. 2 представлено схематическое изображение хода лучей в конструкции фотографического офтальмоскопа, предназначенного для фиксации изображения сетчатки глаза, на рис. 3 представлена оптико-электронная система для анализа офтальмологических изображений, на рис. 4 – представлено изображение сетчатки глаза человека, полученное в результате использования офтальмоскопа фотографического.

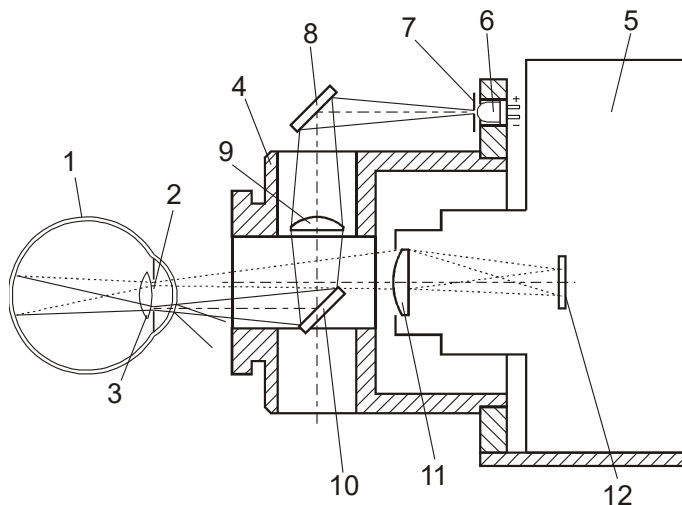


Рисунок 2 – Схематическое изображение хода лучей в конструкции цифрового офтальмоскопа

Фотографический офтальмоскоп, корпус оптической насадки 4, в котором расположена оптическая система, содержащая диафрагму 7, первое 8, второе 10 зеркала и конденсор 9. Кроме того устройство содержит цифровую камеру 5, белый светодиод 6, объектив цифровой камеры 11, матрицу цифровой камеры 12, а также на рис. 6 показано расположение глаза 1 пациента, его зрачка 2 и хрусталика 3, причем глаз 1 пациента, имеющий зрачок 2 и хрусталик 3, связан с выходом второго зеркала 10, вход которого связан с входом конденсора 9 и объективом цифровой камеры. 11, выход которой соединен с входом матрицы цифровой камеры 12, выход конденсора 9 связан с первым зеркалом 8, вход которого связан с диафрагмой 7, соединенной с выходом белого светодиода 6.

Фотографический офтальмоскоп работает следующим образом. Рассеянный свет от белого светодиода 6 через диафрагму 7 фокусируется с помощью системы зеркал 8, 10 и конденсора 9, проходя через зрачок 2 и хрусталик 3 глаза 1, освещает глазное дно. Оптическая система, состоящая из диафрагмы 7, зеркал 8 и 10 и конденсора 9, помещена в корпус оптической насадки 4. Изображение глазного дна проходит через оптическую систему глаза 1 и параллельным лучом попадает на объектив цифровой камеры 11, содержащийся в цифровой фотокамере 5, где формируется увеличенное изображение сетчатки глаза (рис. 3), отображаемое с помощью цифровой матрицы 12 для дальнейшего анализа, врачом. За счет введения белого светодиода, зеркал, конденсора, объектива и матрицы цифровой камеры, была увеличена функциональность офтальмоскопа, что позволяет врачу улучшить диагностику глазных болезней и воспроизводить историю болезни (Мамырбаев, et al., 2024).



Рисунок 3 – Оптико-электронная система для анализа офтальмологических изображений

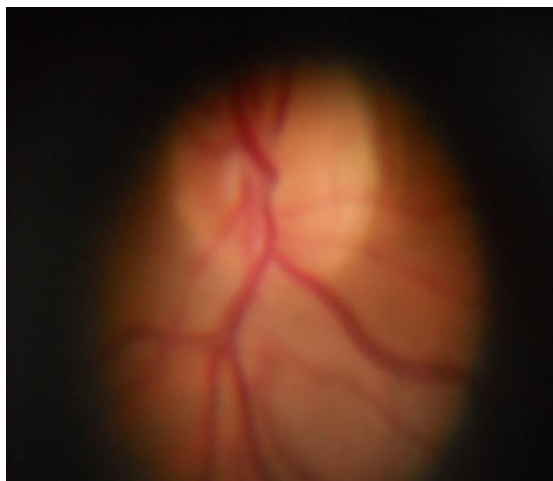


Рисунок 8 - Изображение сетчатки глаза

Результаты и обсуждение. Для оценки эффективности разработанной оптико-электронной системы был проведён ряд экспериментов, в ходе которых сравнивались результаты диагностики, полученные от врача-офтальмолога, и выводы экспертной системы, основанной на нечеткой логике и анализе изображений глазного дна. Ниже приводятся ключевые итоги.

Сравнение с результатами офтальмолога. На первом этапе изучения была сформирована группа из 42 пациентов (возраст 50–65 лет) с разными стадиями глаукомы. При этом:

- Диагноз офтальмолога принимался в качестве «контрольного» (традиционный метод);
- Диагноз системы определялся автоматически с использованием эталонной базы изображений и набора правил нечеткой классификации.

Обобщённые результаты сравнительного анализа приведены в табл. 2 (см. предыдущие разделы). В среднем расхождения между экспертной базой и мнением врача были незначительными. Так, процент пациентов с I стадией глаукомы, выявленных системой, отличался от показателя по офтальмологу в пределах 3 % (40 % против 43 %). Аналогичное соотношение наблюдалось и для II, III стадий. Ошибка репрезентативности при уровне доверия 95 % варьировалась в интервалах $\pm 10\text{--}15\%$, что типично для подобных клинических обследований с малым объёмом выборки.

Полученные данные указывают на то, что автоматизированный метод в целом надёжно воспроизводит диагноз, соответствующий экспертной оценке. При этом остаётся определённая вариативность, связанная как с индивидуальными отличиями пациентов, так и с особенностями самой системы (настройка порогов, вариации качества снимков и т. п.). Тем не менее расхождения находятся в рамках допустимых доверительных интервалов.

Оценка точности классификации на расширенной выборке. На втором

этапе для более масштабной проверки была отобрана выборка из 126 человек, также имеющих подозрение на глаукому или уже установленный диагноз. Участникам проводилось комплексное обследование, включавшее измерение внутриглазного давления, анализ состояния диска зрительного нерва, а также автоматическую обработку снимков глазного дна с помощью предложенной системы. По итогам эксперимента:

- Средняя точность (ассурагу) автоматической классификации стадий глаукомы составила 97–98 %.
- Чувствительность при выявлении ранней стадии (I) достигала около 94 %, что позволяет своевременно обнаруживать начальные изменения.
- Специфичность, характеризующая верное определение «не-глаукомных» случаев или более лёгких состояний, превысила 95 %.

Таким образом, даже при существенном увеличении числа участников система продолжила демонстрировать высокую воспроизводимость результатов. Ошибки чаще всего возникали в случаях недостаточно чёткого или засвеченного снимка, а также при крайне атипичной форме патологических изменений. В таких ситуациях экспертная система могла выдавать либо неопределённый результат, либо ошибаться на одну стадию заболевания. Однако подобные случаи единичны и не оказывают статистически значимого влияния на итоговые показатели точности.

Анализ факторов, влияющих на результат. Незначительные расхождения в результатах диагностики, полученных разными путями, можно объяснить несколькими причинами:

1. Качество изображения. При низкой контрастности или наличии артефактов (блики, тени, неравномерная яркость) повышается вероятность некорректного распознавания формы диска зрительного нерва и экскавации.
2. Индивидуальные особенности пациентов. У некоторых испытуемых анатомические характеристики глаза могут отличаться от среднего, что затрудняет использование универсальных пороговых значений.
3. Точность настройки системы и человеческий фактор. От квалификации оператора (при проведении съёмки и первичной диагностики) и корректного выбора параметров программы может зависеть итоговый диагноз.

В то же время систематический характер полученных результатов даёт основание утверждать, что даже при наличии перечисленных ограничений методика показывает высокую надёжность и согласуется с офтальмологическим «золотым стандартом». В перспективе целесообразно продолжить исследования на ещё более широкой базе пациентов, чтобы оценить эффективность системы при редких формах глаукомы и подтвердить воспроизводимость результатов в различных клинических условиях.

Заключение. В представленной работе разработана и экспериментально проверена оптически-электронная экспертная система для выявления и классификации глаукомы. Основные результаты: Предложены математические

модели, позволяющие количественно оценивать степень тяжести патологии на основе набора признаков (внутриглазное давление, поле зрения, геометрия диска зрительного нерва и др.). Сформированы алгоритмы на базе нечеткой логики, интегрированные с блоком обработки цифровых изображений глазного дна. Реализован прототип программно-аппаратного комплекса: он включает устройство сбора (фундус-камера или модифицированный офтальмоскоп) и модуль анализа изображений. Проведён эксперимент на выборке пациентов (126 человек), показавший высокую точность (до 97–98%) в классификации стадий глаукомы. Таким образом, применение описанной системы способно существенным образом повысить оперативность и точность диагностики в офтальмологии. Дальнейшее совершенствование может состоять в расширении набора анализируемых параметров и внедрении дополнительных методов машинного обучения для автоматической коррекции правил, заложенных экспертами.

References

- Ali N., Wajid S.A., Saeed N., Khan M.D. (2007) The relative frequency and risk factors of primary open angle glaucoma and angle closure glaucoma *PJO* 23(3) 117–21 <https://pjo.org.pk/index.php/pjo/article/view/766> (in Eng)
- Asaoka R., Murata H., Iwase A. (2020) Recent advances in artificial intelligence technologies for glaucoma *Expert Review of Ophthalmology* 15(3) 125–134 (in Eng)
- Boland M.V., Ervin A.M., Friedman D.S., Jampel H.D., Hawkins B.S., Vollenweider D., Chelladurai Y., Ward D., Suarez-Cuervo C., Robinson K.A. (2013) Comparative effectiveness of treatments for open-angle glaucoma a systematic review for the US preventive services task force *Ann Intern Med* 158(4) 271–9 <https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/0003-4819-158-4-201302190-00008> (in Eng)
- Bolme P., Sridharan S., Varghese S., Prathil S. (2021) Automated detection of glaucoma using deep learning techniques a systematic review *Eye and Vision* 8(1) 24 (in Eng)
- Burgoyne C.F., Downs J.C., Bellezza A.J., Suh J.K.F., Hart R.T. (2005) The optic nerve head as a biomechanical structure a new paradigm for understanding the role of IOP-related stress and strain in the pathophysiology of glaucomatous optic nerve head damage *Prog Retin Eye Res* 24(1) 39–73 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350946204000539> (in Eng)
- Christopher M., Anantharaman G., Robin A.L. (2021) Artificial intelligence and glaucoma screening *Journal of Glaucoma* 30(1) 76–80 (in Eng)
- Divya L., Jacob J. (2018) Performance analysis of glaucoma detection approaches from fundus images *Proc Comput Sci* 143 544–51 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050918321276> (in Eng)
- Dogru M., Katakami C., Inoue M. (2001) Ocular microcirculation changes in noninsulin-dependent diabetes mellitus *Ophthalmology* 108 586–592 (in Eng)
- Hu Y., Wang J., Xie P. (2021) Glaucoma Detection in Optical Coherence Tomography Images using Deep Learning Techniques A Review *Current Medical Imaging Reviews* 17(1) 43–51 (in Eng)
- Kashyap R., Nair R., Gangadharan S.M.P., (2022) Glaucoma Detection and Classification Using Improved U-Net Deep Learning Model *Healthcare* 10 2497 (in Eng)
- Li S., Zhang Y., Liu X., Yang J., Zhang L. (2020) Automated glaucoma diagnosis using deep learning and fundus photographs a systematic review and meta-analysis *BMJ Open Ophthalmology* 5(1) e000501 (in Eng)
- Mamyrbayev O., Pavlov S., Saldan Y. (2024a) Increasing the reliability of diagnosis of diabetic retinopathy based on machine learning *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2/9(128) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297849> (in Eng)

Mamyrbayev O., Pavlov S., Saldan Y. (2024b) Optical and Electronic Expert System for Diagnosing Eye Pathology in Glaucoma *Applied Sciences* 14 7816 (in Eng)

Medeiros F.A., Xu Y., Weinreb R.N. (2021) Artificial intelligence in glaucoma promises and challenges *Current Opinion in Ophthalmology* 32(2) 133–139 (in Eng)

Rotshtein A. (1998) Design and Tuning of Fussy IF THEN Vuly for Medical Didicol Diagnosis In Fussy and Neuro-Fussy Systems in Medicine Teodovescu N Kandel A Lain I Eds CRC-Press Boca Raton FL USA 235–295 (in Eng)

Song W., Huang Y., Cui H., Zhang Z., Wang Y. (2021) Deep learning for glaucoma diagnosis an updated review *Expert Review of Medical Devices* 18(5) 337–348 (in Eng)

Thakur N., Kaur H., Kaur P., Kumar A. (2021) Machine learning techniques in glaucoma diagnosis a systematic review *International Ophthalmology* 41(3) 851–864 (in Eng)

Yaqoob U., Fathi A., Zadeh E.K. (2020) Artificial Intelligence in Ophthalmology A Review of the Literature *Cureus* 12(9) e10599 (in Eng)

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.335>

МРПТИ: 20.53.23

УДК: 004.4

© **B.O. Mukhametzhanova^{1*}, L.N. Kulbaeva², Z.B. Saimanova¹,
E.K. Seipisheva¹, B.M. Sadanova¹, 2025.**

¹Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan;

²Astana IT University, Astana, Kazakhstan.

*E-mail: grek79@mail.ru

OPTIMIZATION AND INTEGRATION OF DOCKER TECHNOLOGY IN MODERN INFORMATION SYSTEMS

Mukhametzhanova Bigul Olzhabaevna – PhD, acting associate professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: grek79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3585-8181>;

Kulbaeva Laura Nazimkhikmatovna – senior lecturer, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: laukakn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9029-5102>;

Saimanova Zagira Beketaevna – PhD, acting associate professor, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: zagira_sb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2170-1466>;

Seipisheva Elmira Kalkabekova – senior lecturer, master of science, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: elmira_s89@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2555-1955>;

Sadanova Bakytgul Maratovna – senior lecturer, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: sadanova_b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1995-368X>.

Abstract: This publication discusses the integration and optimization of Docker technology in modern information systems. The purpose of the study is to analyze Docker implementation methods and identify effective practices to improve the performance of containerized applications. The objectives of the research include the study of approaches to the implementation of Docker, optimization of work with containers, as well as analysis of real cases of successful application of the technology in various industries. The research methodology is based on a theoretical analysis of the existing literature. As a result, key approaches to Docker integration were highlighted, as well as effective practices and tools for optimizing it. The results achieved demonstrate that proper Docker integration significantly improves the flexibility and performance of information systems, and the use of modern tools and solutions allows you to minimize risks and increase the security of containerized applications. The significance of this research lies in its contribution

to the development of practical recommendations for organizations seeking to optimize their development and operation processes, as well as in deepening theoretical knowledge about containerization in the field of computer science.

Keywords: Docker, containerization, microservices, optimization, CI/CD, orchestration, security, information systems.

© Б.О. Мухаметжанова^{1*}, Л.Н. Кулбаева², З.Б. Сайманова¹,
Э.К. Сейпишева¹, Б.М. Саданова¹, 2025.

¹Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қарағанды, Қазақстан;

²Astana IT University, Астана, Қазақстан.

*E-mail: grek79@mail.ru

ЗАМАНАУИ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ DOCKER ТЕХНОЛОГИЯСЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ЖӘНЕ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ

Мухаметжанова Бигуль Олжабаевна – PhD, доцент м.а., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан, E-mail: grek79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3585-8181>;

Кулбаева Лаура Назимхихматовна – аға оқытушы, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: laukakn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9029-5102>;

Сайманова Загира Бекетаевна – PhD, доцент м.а., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан, E-mail: zagira_sb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2170-1466>;

Сейпишева Эльмира Калкабековна – аға оқытушы, магистрі, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, ғылым Қарағанды, Қазақстан, E-mail: elmira_s89@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2555-1955>;

Саданова Бакытгуль Маратовна – аға оқытушы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан, E-mail: sadanova_b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1995-368X>.

Аннотация: Бұл мақала заманауи ақпараттық жүйелердегі Docker технологиясын интеграциялау мен оңтайландыруды қарастырады. Зерттеудің мақсаты – Docker енгізу әдістерін талдау және контейнерленген қолданбалардың өнімділігін арттырудың тиімді тәжірибелерін анықтау. Зерттеудің міндеттеріне Docker енгізу тәсілдерін зерттеу, контейнерлермен жұмыс істеуді оңтайландыру, сондай-ақ технологияны әр түрлі салаларда сәтті қолданудың нақты жағдайларын талдау кіреді. Зерттеу әдістемесі бар әдебиеттерді теориялық талдауға негізделген. Нәтижесінде Docker интеграциясының негізгі тәсілдері, сондай-ақ оны оңтайландырудың тиімді тәжірибелері мен құралдары бөлінді. Қол жеткізілген нәтижелер Docker дұрыс интеграциясы ақпараттық жүйелердің икемділігі мен өнімділігін едәуір жақсартатынын көрсетеді, ал заманауи құралдар мен шешімдерді қолдану тәуекелдерді азайтуға және контейнерленген қосымшалардың қауіпсіздігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл зерттеудің маңыздылығы оның әзірлеу

және пайдалану процестерін оңтайландыруға ұмтылатын ұйымдар үшін практикалық ұсыныстарды дамытуға, сондай-ақ информатика саласындағы контейнерлеу туралы теориялық білімді тереңдетуге қосқан үлесі болып табылады.

Түйін сөздер: Docker, контейнерлеу, микросервистер, оңтайландыру, CI/CD, оркестр, қауіпсіздік, ақпараттық жүйелер.

© **Б.О. Мухаметжанова^{1*}, Л.Н. Кулбаева², З.Б. Сайманова¹,
Э.К. Сейпишева¹, Б.М. Саданова¹, 2025.**

¹Қарагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
Қараганда, Қазақстан;

²Astana IT University, Астана Қазақстан.

*E-mail: grek79@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ DOCKER В СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Мухаметжанова Бигуль Олжабаевна – PhD, и.о. доцента, Қарагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Қараганда, Қазақстан, E-mail: grek79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3585-8181>;

Кулбаева Лаура Назимхихматовна – старший преподаватель, Astana IT University, Астана, Қазақстан, E-mail: laukakn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9029-5102>;

Сайманова Загира Бекетаевна – PhD, и.о. доцента, Қарагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Қараганда, Қазақстан, E-mail: zagira_sb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2170-1466>;

Сейпишева Эльмира Калкабековна – старший преподаватель, магистр наук, Қарагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Қараганда, Қазақстан, E-mail: elmira_s89@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2555-1955>;

Саданова Бакытгуль Маратовна – старший преподаватель, Қарагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Қараганда, Қазақстан, E-mail: sadanova_b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1995-368X>.

Аннотация. В данной публикации рассматривается интеграция и оптимизация технологии Docker в современных информационных системах. Цель исследования — анализ методов внедрения Docker и определение эффективных практик для повышения производительности контейнеризованных приложений. Задачи включают изучение подходов внедрения Docker, оптимизацию работы с контейнерами и анализ реальных кейсов успешного применения технологии в различных отраслях. Методология исследования основывается на теоретическом анализе существующей литературы и практических примерах. В результате выделены ключевые подходы к интеграции Docker, а также эффективные практики и инструменты для его оптимизации. Результаты демонстрируют, что правильная интеграция Docker значительно повышает гибкость и производительность информационных систем, а современные инструменты и решения помогают

минимизировать риски и повысить безопасность контейнеризованных приложений. Значимость исследования заключается в создании практических рекомендаций для организаций, стремящихся улучшить процессы разработки и эксплуатации, а также в углублении теоретических знаний о контейнеризации в области компьютерных наук и ее внедрении в реальных условиях.

Ключевые слова: Docker, контейнеризация, микросервисы, оптимизация, CI/CD, оркестрация, безопасность, информационные системы.

Введение. В условиях стремительного развития информационных технологий и увеличения объемов данных, эффективное управление и развертывание приложений становится критически важным. Технология Docker, благодаря своей способности к контейнеризации, предоставляет новые возможности для оптимизации процессов разработки и развертывания программного обеспечения. Актуальность темы заключается в необходимости интеграции Docker в существующие информационные системы для повышения их производительности, масштабируемости и гибкости. В современном мире, где время и ресурсы имеют первостепенное значение, разработка методов оптимизации использования контейнеров становится актуальной задачей для организаций всех размеров.

Цели и задачи исследования заключаются в анализе существующих методов интеграции Docker и оптимизации его использования в информационных системах. В ходе исследования была поставлена задача проверить гипотезу о том, что правильная интеграция и оптимизация технологии Docker может значительно улучшить эффективность работы приложений и снизить затраты на их поддержку. Основное внимание уделялось изучению практических аспектов внедрения, включая подходы к развертыванию, управление ресурсами и обеспечение безопасности. Проведенное исследование включает анализ существующих решений, оценку их влияния на производительность систем и разработку рекомендаций по оптимизации использования Docker в различных сценариях.

Технология Docker основана на концепции контейнеризации, которая позволяет изолировать приложения и их зависимости в единые контейнеры. Каждый контейнер является легковесной, автономной средой, что обеспечивает возможность быстрого развертывания и масштабирования приложений. Основные компоненты Docker включают Docker Engine, Docker Images и Docker Compose, которые вместе позволяют создавать, управлять и оркестровать контейнеры (Бородин, 2019; Смирнов, 2021).

Преимущества Docker заключаются в высокой портативности, легкости развертывания и уменьшении конфликтов окружения, что упрощает разработку и тестирование приложений. Контейнеры потребляют меньше ресурсов по сравнению с виртуальными машинами, что делает их более эффективными (Федоров, 2023). Однако, существуют и недостатки, такие как сложности в управлении многоконтейнерными приложениями и

потенциальные проблемы с безопасностью, особенно в случае неправильно настроенных контейнеров. Таким образом, понимание как преимуществ, так и недостатков Docker критически важно для успешной интеграции этой технологии в информационные системы.

Материалы и методы исследования. При внедрении Docker в информационные системы можно выделить несколько ключевых подходов, которые способствуют эффективной интеграции и максимизации преимуществ контейнеризации.

Первым подходом является микросервисная архитектура, которая разбивает приложения на независимые сервисы. Каждый сервис разрабатывается, развертывается и масштабируется отдельно, что упрощает управление и повышает гибкость системы. Docker обеспечивает изоляцию этих сервисов, позволяя им работать в унифицированных окружениях (Буренков, 2022; Кузнецов, 2022).

Вторым важным подходом является непрерывная интеграция и непрерывное развертывание (CI/CD). Использование Docker в CI/CD позволяет автоматизировать процессы тестирования и развертывания, минимизируя риски ошибок при обновлениях. Такой подход позволяет командам быстрее реагировать на изменения требований и выпускать новые функции. (Иванов, et al., (2021)

Третьим подходом является управление конфигурацией с помощью инструментов оркестрации, таких как Kubernetes. Эти инструменты помогают управлять многоконтейнерными приложениями, обеспечивая автоматизацию развертывания, масштабирования и мониторинга, что значительно упрощает администрирование больших систем. (Левина, 2020)

Важным аспектом является обеспечение безопасности контейнеров. Внедрение практик безопасного кодирования, регулярное обновление образов и использование средств мониторинга позволяют минимизировать уязвимости и обеспечить надежность систем. Эти подходы совместно создают мощную основу для интеграции Docker в современные информационные системы, позволяя организациям достигать высокой производительности и гибкости в управлении приложениями. (Михайлов, 2020)

Интеграция Docker в информационные системы осуществляется через различные подходы, которые позволяют оптимизировать процессы разработки и развертывания приложений (рисунок 1). Одним из наиболее популярных методов является использование микросервисной архитектуры. Этот подход позволяет разбивать приложение на независимые сервисы, каждый из которых может быть развернут и масштабирован отдельно. Docker упрощает управление этими сервисами, обеспечивая изоляцию и легкость развертывания (Сергеева, 2022). Другим важным методом является внедрение практик CI/CD. Этот подход автоматизирует процессы тестирования и развертывания, что существенно снижает время, необходимое для выпуска новых версий приложения. Docker играет ключевую роль в

этой методологии, позволяя разработчикам быстро создавать образы и развертывать их на различных средах. Примеры успешной интеграции Docker можно наблюдать в таких компаниях, как Netflix и GitHub. Netflix использует Docker для управления микросервисами, что позволяет быстро адаптироваться к изменениям в требованиях пользователей и эффективно масштабировать свою инфраструктуру. GitHub применяет контейнеризацию для оптимизации работы своих сервисов, что обеспечивает высокую доступность и надежность платформы. (D'Amato, et al., 2019). Эти примеры демонстрируют, как правильная интеграция Docker может значительно улучшить функциональность и производительность информационных систем.

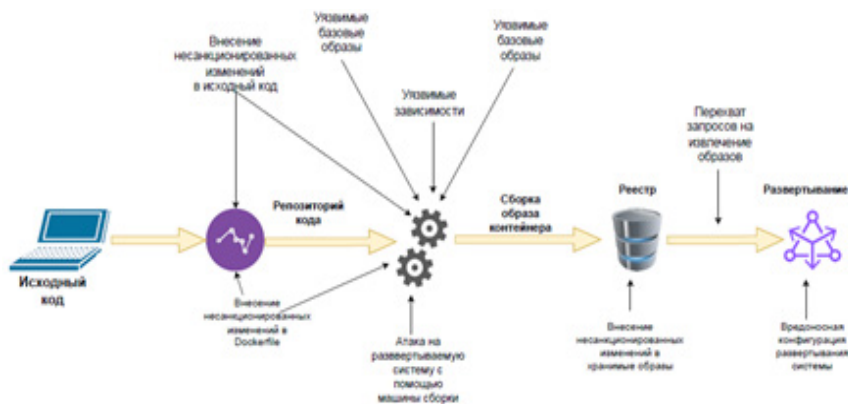


Рисунок 1- Схема архитектуры контейнеризации

Результаты и обсуждение. Оптимизация работы с Docker является ключевым фактором для повышения производительности контейнеризованных приложений и обеспечения их эффективного управления. Одной из основных практик является использование многоуровневых образов. Этот подход позволяет разделить процесс сборки образа на несколько этапов, что сокращает его размер и увеличивает скорость развертывания. (Zhang, et al., 2019). Например, в начале можно использовать более тяжелые инструменты для сборки приложения, а на финальном этапе — только необходимые зависимости, что существенно уменьшает итоговый размер образа.

Следует также минимизировать количество слоев в образе. Каждый слой добавляет к общему объему образа и увеличивает время его развертывания. Чтобы уменьшить количество слоев, можно объединять команды в Dockerfile, например, используя конструкции RUN для установки нескольких пакетов за один раз. Важно правильно настраивать ресурсы контейнеров. Установка ограничений на использование CPU и памяти позволяет предотвратить ситуации, когда один контейнер потребляет все ресурсы хоста.

Это особенно критично для многопользовательских и многосервисных приложений, где необходимо обеспечить стабильность работы всех

компонентов. Регулярное обновление образов и использование проверенных базовых образов также играет важную роль в оптимизации работы с Docker. Это не только улучшает безопасность, но и помогает избегать проблем с несовместимыми версиями библиотек и зависимостей. Рекомендуется использовать инструменты мониторинга и логирования, такие как Prometheus и Grafana. Эти инструменты позволяют отслеживать производительность контейнеров в реальном времени, выявлять узкие места и оперативно реагировать на проблемы, что существенно повышает стабильность и надежность систем. Соблюдение этих практик способствует эффективной оптимизации работы с Docker и позволяет организациям достигать более высоких результатов в разработке и эксплуатации контейнеризованных приложений.

Оптимизация работы с Docker требует использования различных инструментов и решений, которые позволяют эффективно управлять контейнерами и улучшать производительность приложений. Рассмотрим ключевые инструменты и их функциональные возможности. Docker Compose - это инструмент, который упрощает управление многоконтейнерными приложениями. Он позволяет описывать конфигурацию всех необходимых сервисов в одном YAML-файле. Используя Docker Compose, разработчики могут легко запускать, останавливать и управлять группами контейнеров, что значительно ускоряет процесс развертывания и упрощает тестирование. Это особенно полезно в разработческих средах, где требуется быстрое создание и настройка различных окружений.

Kubernetes является мощным инструментом для оркестрации контейнеров. Он автоматизирует развертывание, масштабирование и управление приложениями, обеспечивая высокую доступность и отказоустойчивость. Kubernetes позволяет управлять сложными архитектурами, состоящими из множества микросервисов, и поддерживает автоматическое восстановление контейнеров в случае их сбоя. Этот инструмент критически важен для крупных и распределенных систем, где необходима надежность и гибкость (Casalicchio, et al. 2020).

Prometheus и Grafana — это инструменты для мониторинга и визуализации метрик. Prometheus собирает и хранит метрики в реальном времени, обеспечивая возможность отслеживания производительности контейнеров и ресурсов (Hao, et al., 2020). Grafana предоставляет мощные средства для визуализации данных, что позволяет аналитикам и разработчикам быстро выявлять узкие места и принимать обоснованные решения для оптимизации (Ramavat, et al., 2024). Комбинация этих инструментов помогает поддерживать высокое качество работы приложений и минимизировать время простоя.

Анализ результатов внедрения Docker в этих компаниях показывает, что правильная интеграция технологии может значительно повысить эффективность разработки, улучшить скорость развертывания и сократить

время на устранение проблем. Эти кейсы подчеркивают важность стратегического подхода к использованию Docker для достижения конкурентных преимуществ и оптимизации бизнес-процессов.

Заключение. В ходе исследования методов интеграции и оптимизации технологии Docker в современных информационных системах были сделаны несколько ключевых выводов. Во-первых, Docker предоставляет мощные инструменты для контейнеризации, которые значительно упрощают развертывание и управление приложениями, позволяя компаниям достигать большей гибкости и масштабируемости. Во-вторых, применение практик, таких как микросервисная архитектура и CI/CD, совместно с эффективными методами управления ресурсами, способствует оптимизации работы систем и повышению их производительности. Тем не менее, существует ряд вызовов, связанных с безопасностью и управляемостью многоконтейнерных приложений. Поэтому важно продолжать исследовать новые подходы и инструменты, которые могут помочь преодолеть эти препятствия.

Перспективы дальнейших исследований включают изучение новых технологий оркестрации, таких как Kubernetes, и их интеграцию с Docker. Также необходимо анализировать влияние облачных решений на эффективность контейнеризации и рассматривать возможности улучшения безопасности контейнеров. Эти направления позволят более глубоко понять, как оптимизация технологий контейнеризации может трансформировать информационные системы в будущем.

Литература

- Бородин Д. (2019) Использование Docker в разработке программного обеспечения. Программные системы и технологии, 10(2), С.112-120. (in Russian)
- Буренков И. А. (2022) Применение виртуальных контейнеров Docker для запуска сервисов. Литьё и металлургия. №3, С.108-112. (in Russian)
- Захаров, Н. (2019) Docker и DevOps: как улучшить процессы разработки. Научно-технический вестник, 7(1), С.78-85. (in Russian)
- Иванов П., Петров, С. (2021) Эффективные практики работы с Docker. Технические науки и технологии, 5(4), С.23-30. (in Russian)
- Кузнецов В. (2022) Микросервисная архитектура и контейнеризация: примеры успешного применения. Системы управления и информационные технологии, 15(2), С.88-96. (in Russian)
- Левина О. (2020) Контейнеризация как новый подход в разработке ПО. Российский журнал управления проектами, 12(3), С.56-62. (in Russian)
- Михайлов А. (2020) Docker в современных информационных системах: преимущества и недостатки. Научный журнал НГТУ, 22(3), С.67-74. (in Russian)
- Соловьев И. (2018) Контейнеризация приложений с помощью Docker. Журнал вычислительной техники и вычисляемой математики, 18(1), С.45-54. (in Russian)
- Сергеева М. (2022) Безопасность контейнеров: вызовы и решения. Кибербезопасность и защита информации, 6(2), С.44-50. (in Russian)
- Смирнов Е. (2021) Практика внедрения Docker в компании. IT-менеджмент, 8(1), С.34-40. (in Russian)
- Федоров А. (2023) Оптимизация работы с контейнерами: от Docker до Kubernetes. Информационные технологии и вычислительные системы, 10(1), С.15-22. (in Russian)

D'Amato M., et al. (2019) Performance Evaluation of Docker Containers for Big Data Applications. *Future Generation Computer Systems*, 101, P.425-437. (in Eng.).

Zhang K., et al. (2019) Security Vulnerabilities in Docker Containers: A Survey. *IEEE Access*, 7, P.92860-92870. (in Eng.).

Casalicchio E., Kambhampati A. (2020) Containerization in Cloud Computing: A Comprehensive Survey. *ACM Computing Surveys*, 53(3), P.1-35. (in Eng.).

Hao N., Lin M., Albahar H., Paul A.K., Huang ZH., Abraham S., Chen K., Tarasov V., Skourtis D., Anwar A., Butt A.R. (2024) An end-to-end high-performance deduplication scheme for docker registries and docker container storage systems. *ACM transactions on storage*, DOI: 10.1145/3643819. (in Eng.).

Ramavat J.A.M., Patel K.S. (2024) Docker container placement in docker swarm cluster by using weighted resource optimization approach. *Reliability: theory & applications* №19 4(8), P.201-213. DOI: 10.24412/1932-2321-2024-480-201-213. (in Eng.).

References

Borodin D. (2019) Ispol'zovanie Docker v razrabotke programmnoho obespechenija [The use of Docker in software development]. *Programmnye sistemy i tehnologii*, 10(2), 112-120 p. (in Russian)

Burenkov I. A. (2022) Primenenie virtual'nyh kontejnerov Docker dlja zapuska servisov [The use of Docker virtual containers for launching services]. *Lit'jo i metallurgija*. №3, 108-112 p. (in Russian)

Zakharov, N. (2019) Docker i DevOps: kak uluchshit' processy razrabotki [Docker and DevOps: how to improve development processes]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik*, 7(1), 78-85 p. (in Russian)

Ivanov P., Petrov, S. (2021) Jeffektivnye praktiki raboty s Docker [Effective practices of working with Docker]. *Tehnicheskie nauki i tehnologii* 5(4), 23-30 p. (in Russian)

Kuznetsov V. (2022) Mikroservisnaja arhitektura i kontejnerizacija: primery uspešnogo primeneniya [Micro-service architecture and containerization: examples of successful applications]. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*, 15(2), 88-96 p. (in Russian)

Levina O. (2020) Kontejnerizacija kak novyj podhod v razrabotke PO [Containerization as a new approach in software development]. *Rossijskij zhurnal upravlenija proektami*, 12(3), 56-62 p. (in Russian)

Mikhailov A. (2020) Docker v sovremennyh informacionnyh sistemah: preimushhestva i nedostatki [Docker in modern information systems: advantages and disadvantages]. *Nauchnyj zhurnal NGTU*, 22(3), 67-74 p. (in Russian)

Soloviev I. (2018) Kontejnerizacija prilozhenij s pomoshh'ju Docker [Application containerization using Docker]. *Zhurnal vychislitel'noj tehniki i vychisljaemoj matematiki*, 18(1), 45-54 p. (in Russian)

Sergeeva M. (2022) Bezopasnost' kontejnerov: vyzovy i reshenija [Container security: challenges and solutions]. *Kiberbezopasnost' i zashhita informacii*, 6(2), 44-50 p. (in Russian)

Smirnov E. (2021) Praktika vnedrenija Docker v kompanii [The practice of implementing Docker in a company]. *IT-menedzhment*, 8(1), 34-40 p. (in Russian)

Fedorov A. (2023) Optzacija raboty s kontejnerami: ot Docker do Kubernetes [Optimization of working with containers: from Docker to Kubernetes]. *Iminformacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy*, 10(1), 15-22 p. (in Russian)

D'Amato M., et al. (2019) Performance Evaluation of Docker Containers for Big Data Applications. *Future Generation Computer Systems*, 101, 425-437 p. (in Eng.).

Zhang K., et al. (2019) Security Vulnerabilities in Docker Containers: A Survey. *IEEE Access*, 7, 92860-92870 p. (in Eng.).

Casalicchio E., Kambhampati A. (2020) Containerization in Cloud Computing: A Comprehensive Survey. *ACM Computing Surveys*, 53(3), 1-35p. (in Eng.).

Hao N., Lin M., Albahar H., Paul A.K., Huang ZH., Abraham S., Chen K., Tarasov V., Skourtis D., Anwar A., Butt A.R. An end-to-end high-performance deduplication scheme for docker registries and docker container storage systems. *ACM transactions on storage*, (2024), DOI: 10.1145/3643819 p. (in Eng.).

Ramavat J.A.M., Patel K.S. Docker container placement in docker swarm cluster by using weighted resource optimization approach. *Reliability: theory & applications* (2024), №19 4(8), 201-213 p. DOI: 10.24412/1932-2321-2024-480-201-213. (in Eng.).

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 227–241

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.336>

УДК 004.931

**A.R. Orazayeva¹, ©J.A. Tussupov¹, A.K. Shaikhanova¹, G.B. Bekeshova¹,
A.D. Galymova², 2025.**

¹Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan;

²Semey Medical University, Semey, Kazakhstan.

E-mail: tussupov@mail.ru

FUZZY EXPERT SYSTEM FOR ASSESSING DYNAMIC CHANGES IN BIOMEDICAL IMAGES OF BREAST CANCER TUMORS

Orazayeva Ainur Rishatovna – Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, PhD, Astana, Kazakhstan, E-mail: oaris.83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2899-9886>;

Tussupov Jamalbek Aliaskarovich – Professor, Department of Information Systems, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan, E-mail: tussupov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9179-0428>;

Shaikhanova Aigul Kayrulaevna – PhD, Professor of the Department of Information Security, L.N. Gumilyov Eurasian National University; Astana, Kazakhstan, E-mail: shaikhanova_ak@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6006-4813>;

Bekeshova Gulvira Bauyrzhanovna – Senior Lecturer, L.N. Gumilev Eurasian National University, Master, Astana, Kazakhstan, E-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1635-4693>;

Galymova Assem Duysengalikyzy – lecturer of the Department of General Education Disciplines of the “Semey Medical University” NCJSC, Master of Natural Sciences, Semey, Kazakhstan. e-mail: galymova.aseem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9570-0971>.

Abstract. This article discusses the development of a fuzzy expert system for analyzing dynamic changes in biomedical images of breast cancer tumors. Modern medical imaging methods allow obtaining detailed images of tumor formations, but accurate interpretation of the dynamics of their changes remains a difficult task due to the high variability of biological processes and the influence of external factors. The use of fuzzy logic in expert systems allows taking into account data uncertainty, which helps to improve the accuracy of diagnosis and control over the effectiveness of treatment. In a medical expert system for diagnosing breast cancer using image analysis, the results of processing are used to confirm the diagnosis, select treatment methods, and draw predictive conclusions. Various tests are provided for diagnosing breast cancer tumors. The proposed system includes several main modules: image preprocessing, extraction of information features, formation of fuzzy rules, and decision making. Image processing algorithms allow analyzing the textural,

morphological, and color characteristics of the tumor, as well as assessing changes in its size, shape, and structure. The developed expert system uses a fuzzy rule base based on clinical guidelines and expert knowledge, which ensures the flexibility and adaptability of the model. Experimental studies conducted on real medical data confirmed the effectiveness of the proposed approach. The use of fuzzy logic made it possible to reduce the likelihood of diagnostic errors and increase the reliability of assessing the dynamics of the tumor process. The results obtained can be used for automated decision support in oncology, improving the quality of diagnostics and personalizing treatment.

Key words: information expert system, fuzzy sets, sensors, medical imaging, breast cancer.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

**А.Р. Оразаева¹, ©Д.А. Тусупов¹, А.К. Шайханова¹, Г.Б. Бекешова¹,
Ә.Д. Ғалымова², 2025.**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

²Семей Медицина Университеті, Семей, Қазақстан.

E-mail: tussupov@mail.ru

СҮТ БЕЗІ ҚАТЕРЛІ ІСІГІ КЕЗІНДЕ ІСІКТІҢ БИМЕДИЦИНАЛЫҚ КЕСКІНДЕРІНДЕГІ ДИНАМИКАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРДІ БАҒАЛАУҒА АРНАЛҒАН АНЫҚ ЕМЕС САРАПТАМА ЖҮЙЕСІ

Оразаева Айнур Ришатовна – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, E-mail: oaris.83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2899-9886>;

Тусупов Джамалбек Алиаскарович – Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Ақпараттық жүйелер кафедрасының профессоры, ф.-м.ғ.д., Астана, Қазақстан, E-mail: tussupov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9179-0428>;

Шайханова Айгуль Кайрулаевна – PhD, ақпараттық қауіпсіздік кафедрасының профессоры, Л. Н Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан, E-mail: shaikhanova_ak@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6006-4813>;

Бекешова Гульвира Бауыржановна – Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің аға оқытушысы, магистр, Астана, Қазақстан, E-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1635-4693>;

Ғалымова Әсем Дүйсенғалиқызы – «Семей Медицина Университеті» КеАҚ, Жалпы білім беру пәндері кафедрасының оқытушысы, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, Семей, Қазақстан, E-mail: galymova.asem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9570-0971>.

Аннотация. Берілген мақалада сүт безі қатерлі ісігі ісіктерінің биомедициналық кескіндеріндегі динамикалық өзгерістерді талдау үшін анық емес сараптамалық жүйенің дамуы талқыланады. Заманауи медициналық бейнелеу әдістері ісік түзілімдерінің егжей-тегжейлі кескіндерін алуға мүмкіндік береді, бірақ олардың өзгерістер динамикасын дәл түсіндіру биологиялық процестердің жоғары өзгергіштігіне және сыртқы факторлардың әсеріне байланысты қиын міндет болып қала береді. Сараптамалық

жүйелерде анық емес логиканы қолдану деректердің белгісіздігін есепке алуға мүмкіндік береді, бұл диагноздың дәлдігін және емдеу тиімділігін бақылауды жақсартуға көмектеседі. Кескінді талдау арқылы сүт безі қатерлі ісігін диагностикалауға арналған медициналық сараптама жүйесінде өңдеу нәтижелері диагнозды растау, емдеу әдістерін таңдау және болжамды қорытындылар жасау үшін пайдаланылады. Сүт безі қатерлі ісігінің ісіктерін диагностикалау үшін әртүрлі сынақтар қарастырылған. Ұсынылған жүйе бірнеше негізгі модульдерді қамтиды: кескінді алдын ала өңдеу, ақпараттық мүмкіндіктерді шығару, анық емес ережелерді қалыптастыру және шешім қабылдау. Кескінді өңдеу алгоритмдері ісіктің текстуралық, морфологиялық және түстік сипаттамаларын талдауға, сондай-ақ оның өлшеміндегі, пішініндегі және құрылымындағы өзгерістерді бағалауға мүмкіндік береді. Өзірленген сараптамалық жүйе клиникалық нұсқаулар мен сарапшылық білімге негізделген анық емес ережелер базасын пайдаланады, бұл модельдің икемділігі мен бейімделуін қамтамасыз етеді. Нақты медициналық деректер бойынша жүргізілген эксперименттік зерттеулер ұсынылған тәсілдің тиімділігін растады. Анық емес логиканы қолдану диагностикалық қателердің ықтималдығын азайтуға және ісік процесінің динамикасын бағалаудың сенімділігін арттыруға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелерді онкологиядағы шешімдерді автоматтандырылған қолдауға, диагностиканың сапасын арттыруға және емдеуді дербес етуде қолдануға болады.

Түйін сөздер: ақпараттық сараптама жүйесі, анық емес жинақтар, датчиктер, медициналық бейнелеу, сүт безі қатерлі ісігі.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдемейді.

**А.Р. Оразаева¹, © Д.А. Тусупов¹, А.К. Шайханова¹, Г.Б. Бекешова¹,
А.Д. Галымова², 2025.**

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
Астана, Казахстан;

²Медицинский Университет Семей, Семей, Казахстан.
E-mail: tussupov@mail.ru

НЕЧЕТКАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ОПУХОЛЕЙ ПРИ РАКЕ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Оразаева Айну́р Ришатовна – Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: oaris.83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2899-9886>;

Тусупов Джамалбек Алиаскарович – профессор кафедры информационных систем Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, д.ф.-м.н., Астана, Казахстан, E-mail: tussupov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9179-0428>;

Шайханова Айгуль Кайрулаевна – PhD, профессор кафедры информационной безопасности, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: shaikhanova_ak@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6006-4813>;

Бекешова Гульвира Бауыржановна – магистр, старший преподаватель Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: gulvirabauyrzhanovna@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1635-4693>;

Галымова Асем Дуйсенгаликызы – преподаватель кафедры общеобразовательных дисциплин НАО «Медицинский Университет Семей», магистр естественных наук, Семей, Казахстан, E-mail: galymova.aseм@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9570-0971>.

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка нечеткой экспертной системы для анализа динамических изменений биомедицинских изображений опухолей молочной железы. Современные методы медицинской визуализации обеспечивают детальные изображения опухолей, но их динамическая интерпретация затруднена высокой изменчивостью биологических процессов и внешними факторами. Применение нечеткой логики в экспертных системах позволяет учитывать неопределенность данных, повышая точность диагностики и эффективность контроля лечения.

Разрабатываемая система состоит из нескольких модулей: предобработки изображений, извлечения информативных признаков, формирования нечетких правил и принятия решений. Алгоритмы обработки изображений анализируют текстурные, морфологические и цветовые характеристики опухоли, а также изменения ее размеров, формы и структуры. Система использует нечеткую базу правил, основанную на клинических рекомендациях и экспертных знаниях, обеспечивая гибкость и адаптивность модели.

Экспериментальные исследования на реальных медицинских данных подтвердили высокую эффективность предложенного подхода. Применение нечеткой логики снизило вероятность диагностических ошибок и повысило достоверность оценки динамики опухоли. Результаты исследования могут применяться для автоматизированной поддержки принятия решений в онкологии, улучшения диагностики и персонализированного лечения.

Ключевые слова: информационная экспертная система, нечеткие множества, датчики, медицинская визуализация, рак молочной железы.

Кіріспе

Зерттеушілер 2040 жылға қарай онкологиялық аурулардың жыл сайынғы саны 47 пайызға артып, 28,4 миллионға жетеді деп болжайды. Бұл жағдайлардың көпшілігі адам дамуының төмен және орташа индекстері бар елдерде орын алады (Ротштейн, 1998). Осы елдердің көпшілігінде темекі шегу, дұрыс емес тамақтану, семіздік және отырықшы өмір салты сияқты қауіп факторлары айтарлықтай артады деп күтілуде (Серкова, 2017). Қатерлі ісікпен сырқаттанушылық пен өлім-жітім популяция құрылымының, өмір сүру жағдайының және денсаулық сақтау жүйесінің жағдайды басқару қабілетінің өзгеруіне әсер етеді (Тарчинска, 2020).

Қазіргі уақытта онкологияның өзекті мәселелерінің бірі сүт безі қатерлі ісігінің (СБКІ) алдын алу болып табылады (Кателян, 2019). Сүт безі қатерлі ісігін диагностикалау қазіргі заманғы медицинада қолданылатын диагностикалық әдістердің күрделі кешенін қамтиды (Козловска, 2016). Осы саладағы перспективті тәсіл сүт безі қатерлі ісігімен сырқаттанушылыққа әсер ететін қауіп факторларының комбинациясын анықтау арқылы Қазақстанның әртүрлі аймақтарында сүт безі қатерлі ісігі бойынша жеке тәуекелді бағалау және жоғары тәуекел топтарын құру болып табылады (Вольфсдорф Джозеф, 2018).

Бұл зерттеудің мақсаты онкологиялық ауруларды диагностикалау үшін биомедициналық кескінді талдауға негізделген анық емес сараптамалық жүйені әзірлеу, кейс ретінде сүт безі қатерлі ісігін қолдану. Медициналық ақпараттық жүйелер анық емес және белгісіз ортада медициналық шешімдерді қолдау жүйелерімен интеграциялануымен сипатталады. Ауруларды диагностикалау белгісіздік пен анықсыздықтың бірнеше деңгейін қамтиды (Таубаев, 2020). Қазіргі уақытта белгісіздік ғылымда және анық емес логикада маңызды мәнге ие, ол табиғи тіл арқылы модельдеу және коммуникация әдісін қамтамасыз етеді (Абдикеримова, 2019). Қолданбалы жасанды интеллект жүйелерінің саны, ең алдымен, символдық өңдеуге емес, анық емес есептеулерге негізделген айтарлықтай өскені анық.

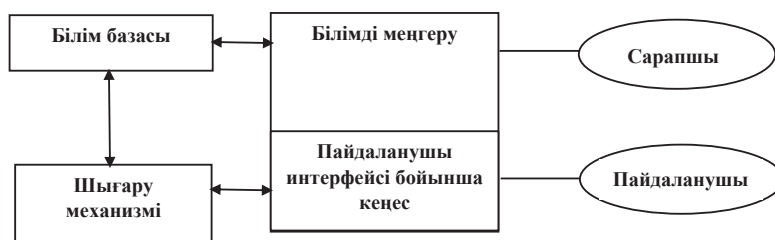
Жасанды интеллект теориясы қазір әртүрлі салаларда, соның ішінде медицинада кеңінен қолданылады. Дәрігерлерге әртүрлі ауруларды диагностикалау және емдеуге көмектесу үшін көптеген шешімдерді қолдау жүйелері (DSS) әзірленді, мысалы, Aaphelp, Internist I, Mycin, Emycin, Casnet/Glaucoma, Pip, DXplain, Concise Medical Manual, Isabel, Refiner Series жүйесі және RMA. Онкологиялық ауруларды емдеу үшін ONCOCIN, OASIS және Lisa сияқты жүйелер әзірленді (Василевский, 2018). Бұған қоса, көптеген медициналық қолданбалар анық емес логиканы пайдаланады, соның ішінде CADIAG, MILORD, DOCTORMOON, TxDENT, MedFrame/CADIAG-IV, Fuzzy Expert System және MDSS (Ангелский, 2010). Сүт безі қатерлі ісігін диагностикалауда DSS өте маңызды, өйткені ол бүкіл әлем бойынша әйелдер өлімінің басты себебі болып табылады. Бұл жүйелердің мүмкіндіктерін талдау анық емес логиканың жоғары тиімді есептеу әдісі екенін көрсетеді (Ушенко, 2011).

Әдістер мен материалдар.

Кескінді талдау арқылы сүт безі қатерлі ісігін диагностикалауға арналған медициналық сараптама жүйесінде өңдеу нәтижелері диагнозды растау, емдеу әдістерін таңдау және болжамды қорытындылар жасау үшін пайдаланылады (Заболотна, 2013). Медициналық диагностикалық ақпараттық жүйелерді әзірлеу кезінде диагностиканың ерте кезеңдерінде сүт безі патологиясының белгілерін анықтау үшін параметрлерді талдау өте маңызды (Нижинска-Астапенк, 2021).

Медициналық сараптама жүйесін құру кезінде бірнеше міндеттерді шешу қажет: жүйенің мақсатын анықтау; оның құрылымдық негізін таңдау; зерттелетін нозологиялық формалардың тізімін құрастыру және талдау; симптомдардың ауырлығы мен ағзаның функционалдық жағдайы туралы статистикалық сенімді ақпаратты жинау; биомедициналық ақпаратты өңдеу әдісін таңдау және биомедициналық ақпаратты бағалау алгоритмін әзірлеу және диагностикалық және болжамдық қорытындыларды жасау (Оразаева, 2022).

1-суретте берілген MES құрылымы интерфейстің екі функциясымен компьютерлік бағдарламасы бар екенін көрсетеді: сарапшыдан білім алу және пайдаланушымен диалог жүргізу.



Сур. 1. Медициналық сараптама жүйесінің архитектурасы
(Fig. 1. Architecture of a medical expert system)

Сараптамалық жүйе жұмысының нәтижесі белгілі бір категорияға жататын ықтималдығын көрсететін қорытынды болып табылады (Квьетный, 2015). Бұл сараптамалық жүйенің айрықша ерекшелігі, ол сараптамалық білімдерді қосумен қатар, кескіндерді автоматтандырылған өңдеу арқылы алынған сандық өлшемдерден мәліметтер базасын жасайды (Заболотна, 2020).

Биомедициналық кескіндерді компьютерлік өңдеудің заманауи әдістері диагностиктердің жақсы көрнекі қабылдауы үшін кескіндерді жақсартады, бұл жоғары сенімді диагноздарға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе сүт безі қатерлі ісігін талдауда маңызды (Омиотек, 2021). Сүт безі қатерлі ісігін диагностикалау кезінде биомедициналық кескіндерді талдауды автоматтандыру үшін бастапқы кезең кескінді бұрмалайтын факторларды басу үшін кескінді жақсарту процедураларын қамтиды (мысалы, шуды сүзгілеу және жарықтандырудың бұзылуын жою) (Билинский, 2017). Сипаттау кезеңінде объектінің ерекше белгілері есептеледі, ал соңғы кезеңде объект белгілі бір категорияға жіктеледі. Осы үш кезеңнің ең маңыздысы – бейнені түсіндіру (сурет 2). Тану нәтижесі таңдалған мүмкіндіктерге және олардың ақпараттық мазмұнына байланысты болады, бұл мүмкіндік мәніне негізделген нысанды жіктеу мүмкіндігін анықтайды. Факторлардың екі тобын анықтауға болады: объектінің өзінің қасиеттері (мысалы, онкопатология учаскесінің суреттері) және кескіннің қалыптасу шарттары (сенсордың шуы және біркелкі емес жарықтандыру сияқты).

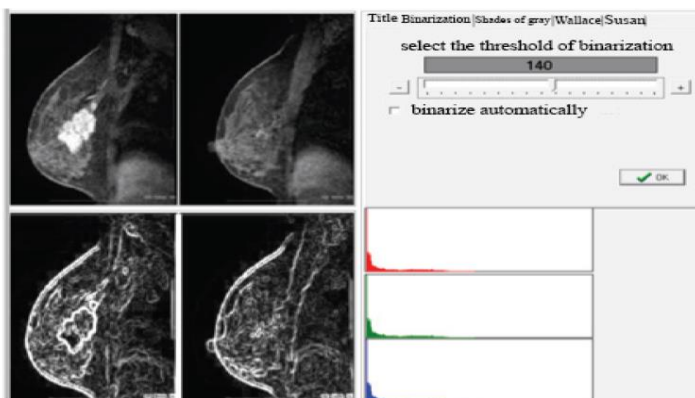


Сур. 2. Объектіні танудағы кескінді өңдеу кезеңдері
(Fig. 2. Stages of image processing in object recognition)

Қазіргі уақытта оптоэлектронды жүйелер негізінен ісік мөлшерін жергілікті анықтауға бағытталған сүт безі қатерлі ісігін бейнелеуді зерттеуде қолданылады. Патология дәрежесін және ауру ықтималдығын бағалау үшін шешуші болып табылатын клиникалық маңызды көрсеткіштерге диаметр және қисықтық сияқты әртүрлі статистикалық параметрлер кіреді. Сондықтан диагностикалық жабдық кескінді өңдеудің сенімділігі, дәлдігі және жылдамдығы бойынша жоғары стандарттарға сай болуы керек. Дегенмен, онкологиядағы заманауи диагностикалық жүйелер көбінесе бұл талаптарға сәйкес келмейді. Сонымен қатар, осы саладағы медициналық диагностикалық жабдықтардың стандарттары үнемі өсіп келеді, бұл жаңа ақпараттық әдістер мен озық құралдарды пайдалануды қажет етеді.

Әдетте кіріс кескіннің элементтік функционалдық түрлендірулері арқылы сипатталатын детерминирленген бұрмаланулардан айырмашылығы, кездейсоқ әсерлер аддитивтік, импульстік және мультипликативті шу үлгілері арқылы модельденеді. Биомедициналық кескіндерді өңдеу сапасын арттыру үшін әдетте Кирш, Робертс, Собел, Уоллес және Сюзан сияқты алгоритмдер қолданылады.

Кирш сүзгісі 3×3 2D диафрагмасымен жұмыс істейді (белгілі бір уақытта сүзгі арқылы тікелей өңделген кескін бөлігі). Сонымен қатар, кескін элементтерінің тізбегі $([X][X][X])$ болып табылатын терезеге сілтеме жасағанда, бұл түрлендіру бір өлшемді деп аталады, сәйкес, екі өлшемді түрлендіру де бар.



Сур. 3. Сүт безі қатерлі ісігіндегі ісіктердің онкологиялық кескіндерін өңдеу үшін Кирш сүзгісін қолдану
(Fig. 3. Application of the Kirsch filter for processing oncological images of tumors in breast cancer)

Диафрагма келесідей көрінеді:

A0	A1	A2
A7	F	A3
A6	A5	A4

$$S_i = A_i + A_i(+1) + A_i(+2)$$

$$T_i = A_i(+3) + A_i(+4) + A_i(+5) + A_i(+6) + A_i(+7).$$

Біріншіден, циклде S_i және T_i айнымалыларының барлық мәндері жоғарыда келтірілген формулаларға сәйкес есептеледі, онда «(+))» 8 қосу модулін білдіреді. Әрі қарай, модульдердің айырмашылығының мәндерін табамыз $|5 \cdot S_i - 3 \cdot T_i|$ әрбір i үшін 0-ден 7-ге дейін және осы модульдер арасындағы ең үлкен мән:

$$F' = \max_{i=0..7} (|5 \cdot S_i - 3 \cdot T_i|)$$

F' соңғы мәні F элементіне енгізіледі, содан кейін жұмыс терезесі ауыстырылады. Кириш сүзгісін қолдануға негізделген сүт безі қатерлі ісігінің биомедициналық ісік кескінін өңдеу нәтижесі 3-суретте көрсетілген.

Клиникалық зерттеулер көбінесе нақты цифрлық критерийлерді ғана емес, сонымен қатар индекстердің (терминдердің) өзгерістерінің белгілі бір тілдік сипаттамаларын қажет ететінін ескере отырып, авторлар олардың кейбіреулерін анық емес логиканың математикалық құралдарын пайдалана отырып талдаған. Бұл тәсіл сипаттамалық сипаттамалары мен сапалы мазмұны бар критерийлер үшін бір мәнді сандық өрнекті алуға мүмкіндік береді, мысалы: L – төмен, LA – орташадан төмен, А – орташа, НА – орташадан жоғары, Н – жоғары. Бұл терминдердің әрқайсысы анық емес жиын болып табылады, арнайы мүшелік функциялары арқылы тағайындалған және 0-ден 1-ге дейінгі сандық дәрежелері бар белгілі бір интервалмен ұсынылуы мүмкін. Жиынға абсолютті мүше еместік 0 және абсолютті мүшелік 1 арқылы көрсетіледі.

Сүт безі қатерлі ісігінің ісіктерін диагностикалау үшін әртүрлі сынақтар қарастырылды, соның ішінде бейнелеу, маммография, ультрадыбыстық, МРТ және биопсия. 120 суретке көппараметрлік талдау жүргізілді. «Норма» және «патология» топтары үшін олардың өзгеру аралықтары 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1. «Норма» және «патология» топтары үшін олардың өзгеру интервалдары

Level of pathology	Evidence				
	Visual interpretation (X1)	X-ray mammography (X2)	Tumor size (X3)	Ultrasound (X4)	Tumor marker (X5)
Norm Category 1	Absence of pathological structures	Smooth and clear contours, no calcifications, moderate density, no stellation	0	Echogenicity, even contours, no calcifications, normal lymph nodes	0÷22 Unit/ml

Pathology Category 2	Structures that have signs of an unconditionally benign anature	Smooth and clear contours, no calcifications, slow growth, increased density, no stellation	0,5 cm		0÷22 Unit/ml
Pathology Category 3	Structures with signs of a benign nature, with a risk of malignancy of not more than 2%	Irregular contours, no calcifications, increased radiographic density, no stellation	0,5 ÷ 1 cm	Anechogenicity or hyoechogenicity, uneven contours, no calcifications, axillary enlarged rounded lymph nodes	22÷30 Unit/ml
Pathology Category 4	Structures suspicious of a malignant process, but do not have all the signs of cancer		1 ÷ 3 cm		22÷30 Unit/ml
Pathology Category 5	Extremely high probability(more than 95%) malignancy of changes	Irregularity of contours, inclusion of calcifications, increased radiographic density, stellation of the structure, rapid growth	over 3 cm	Anechogenicity or hyoechogenicity, uneven contours and stellation, inclusions of calcifications, axillary enlarged rounded lymph nodes	over 40 Unit/ml
Pathology Category 6	Malignant formations		The likelihood that the tumor is growing in size		over 40 Unit/ml

1-кесте негізінде анық емес терминдер негізінде сүт безі қатерлі ісігінің ауырлық деңгейін бағалау үшін деректер базасы жасалды (2-кесте). Деректер базасынан әрбір көрсеткіш үшін индекстерді ресімдеу үшін сәйкес мүшелік функциялары анықталады.

Кесте 2. Анық емес терминдерге негізделген сүт безі қатерлі ісігінің ауырлық дәрежесін бағалау деректер базасы

Level of pathology	Signs				
	X1	X2	X3	X4	X5
Norm/ Category 1	L	L	L	L	L
	L	L	L	L	LA
Pathology/Category 2	L	L	LA	L	L
	L	L	LA	L	LA
Pathology/Category 3	L	A	LA	A	A
	L	A	A	A	A
Pathology/Category 4	A	A	LA	A	A
	A	A	A	A	A

	L	A	HA	A	A
Pathology/Category 5	H	H	HA	H	H
Pathology/Category 6	H	H	H	H	H

Сондықтан сүт безі қатерлі ісігінің ауырлық деңгейін бағалаудың математикалық үлгілері келесі формаға ие (1):

$$\begin{aligned}
 \mu^{d1}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) &= \mu^L(X_1) \cdot \mu^L(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^L(X_4) \cdot \mu^L(X_5) \cup \\
 &\quad \mu^L(X_1) \cdot \mu^L(X_2) \cdot \mu^L(X_3) \cdot \mu^L(X_4) \cdot \mu^{LA}(X_5); \\
 \mu^{d2}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) &= \mu^L(X_1) \cdot \mu^L(X_2) \cdot \mu^{LA}(X_3) \cdot \mu^L(X_4) \cdot \mu^L(X_5) \cup \\
 &\quad \mu^L(X_1) \cdot \mu^L(X_2) \cdot \mu^{LA}(X_3) \cdot \mu^L(X_4) \cdot \mu^{LA}(X_5); \\
 \mu^{d3}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) &= \mu^L(X_1) \cdot \mu^A(X_2) \cdot \mu^{LA}(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \cdot \mu^A(X_5) \cup \\
 &\quad \mu^L(X_1) \cdot \mu^A(X_2) \cdot \mu^A(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \cdot \mu^A(X_5); \\
 \mu^{d4}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) &= \mu^A(X_1) \cdot \mu^A(X_2) \cdot \mu^{LA}(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \cdot \mu^A(X_5) \cup \\
 \mu^A(X_1) \cdot \mu^A(X_2) \cdot \mu^A(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \cdot \mu^A(X_5) \cup &\quad \mu^A(X_1) \cdot \mu^A(X_2) \cdot \mu^{HA}(X_3) \cdot \mu^A(X_4) \cdot \\
 &\quad \mu^A(X_5); \\
 \mu^{d5}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) &= \mu^H(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^{HA}(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^H(X_5); \\
 \mu^{d6}(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) &= \mu^H(X_1) \cdot \mu^H(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^H(X_4) \cdot \mu^H(X_5).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Теңдеулерді құру үшін мүшелік функцияларын анықтау қажет, ол үшін барлық x_i факторлары үшін j (H, HA, A, LA, L) барлық анық емес мүшелерінің $\mu^j(x_i)$ (бұл жағдайда j – симметрия коэффициентінің мәні, i – зерттеу интервалы: $i = 1, 4$) анықтау керек. Егер норма түрі жоғары деңгей норманың нұсқасы ретінде қарастырылса, онда теңдеулерді құру бес анық емес мүше (L, LA, A, HA, A) үшін орындалуы керек.

Мүшелік функциялардың графиттік формасы 4суретте көрсетілген. Ұқсас қисықтарды таңдау олардың жұптық салыстыру әдісімен $x_1 \div x_5$ коэффициенттері үшін алынған $\mu^j(x_i)$ сарапшылық мүшелік функцияларының бөліктік сызықтық жуықтаулары болуына байланысты.

$\mu^j(u)$ функциясынан $\mu^j(x_i)$ қажетті функцияларға көшу келесі түрде жүзеге асырылады:

$$u_i = 4 \frac{x_n - \bar{x}_n}{\bar{x}_n - x_n}, \widetilde{\mu^j}(u_n) = \mu^j(x_n) \tag{2}$$

Арудың ауырлығына қатысты шешім қабылдау келесі алгоритмді ұстануы мүмкін:

1-қадам: нақты емделуші үшін факторлардың мәндерін жазыңыз $x_n (n = 1,5)$.

2-қадам: (1) теңдеулерді пайдаланып, x_n факторларының тіркелген мәндері үшін $\mu^j(x_n)$ мүшелік функцияларының мәндерін анықтаңыз.

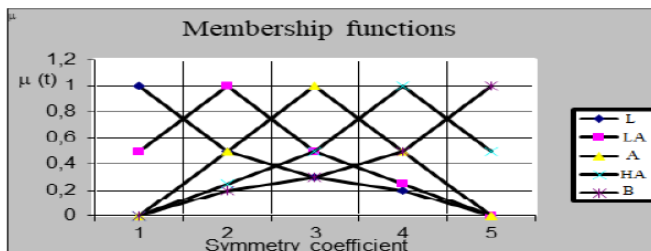
3-қадам: $n = 1,5$ үшін логикалық теңдеулерді пайдаланып, барлық ауырлық дәрежесі dn үшін $\mu^{d_{in}}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ мүшелік функцияларын есептеңіз. $\mu(a)$ және $\mu(b)$ мүшелік функцияларының үстіндегі $I(\cdot)$ және $OR(V)$ операциялары тиісінше \min және \max амалдарымен ауыстырылады.

$$\mu(a) \cdot \mu(b) = \min[\mu(a), \mu(b)] \tag{3}$$

$$\mu(a) \cup \mu(b) = \max[\mu(a), \mu(b)] \tag{4}$$

4-қадам: Шешімді анықтаңыз.

$$\mu^{d_0}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \max[\mu^{d_n}(x_1, x_2, \dots, x_n)] \tag{5}$$

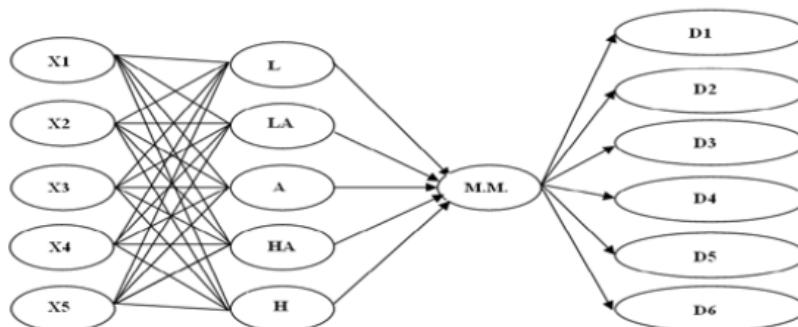


Сур. 4. Анық емес терминдердің мүшелік функциялары
(Fig. 4. Membership functions of fuzzy terms)

Қажетті диапазон осы шешімге сәйкес келеді, бұл диапазон сүт безі қатерлі ісігінің ауырлығын көрсетеді.

Нәтижелер және оларды талқылау

Реттеу блоктарын, мүшелік функцияларды сақтауды, анық емес өндеуді және сараптамалық жүйеде шығаруды іске асыру анық емес логиканы пайдалана отырып жарамды диагнозды алу принциптеріне негізделген. Сүт безі қатерлі ісігінің ауырлық дәрежесін бағалау үшін анық емес логикалық блоктарды енгізу негізінде сүт безі қатерлі ісігінің ауырлығын бағалаудың ақпараттық-медициналық сараптама жүйесінің негізгі идеологиясы 5-суретте көрсетілген. Бұл блоктарды іске асыру нәтижесі әзірленген бағдарламалық қабық болды, бұл жағдайда пайдаланушыға бағдарламаны іске қосқаннан кейін мәндердің төменгі және жоғарғы шкаласы мәнін, яғни белгілі бір патологияның деректер базасына енгізу сұралады, біздің жағдайда анықтама үшін негізгі мәндерді енгіземіз.

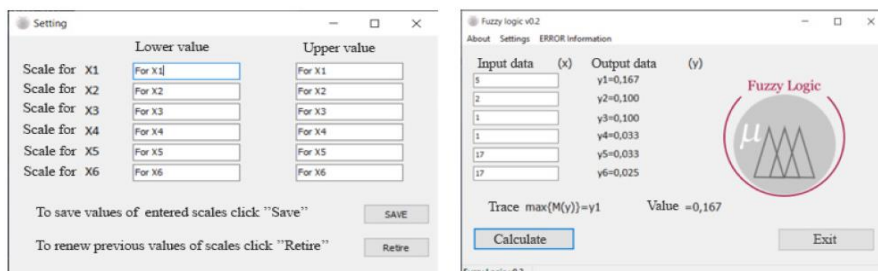


Сур. 5. Ауырлықты бағалауға арналған анық емес логикалық блоктар
(Fig. 5. Fuzzy logic blocks for the assessment of the severity stage)

Бұл блоктарды іске асыру нәтижесі келесідей қызмет ететін бағдарламалық құрал қабығы болып табылады:

1. Бағдарламаны іске қосқаннан кейін пайдаланушыға осы жағдайда қан газдары сияқты нақты индекстерге негізделген дерекқордан мәндердің жоғарғы және төменгі шегін енгізу ұсынылады. Бұл мәндер анықтау үшін негіз болады.

2. Бағдарламаны жалғастыру үшін пайдаланушы барлық өрістерді толтырғаннан кейін «сақтау» түймесін басу керек. Бұрын енгізілген деректерді қалпына келтіру үшін пайдаланушы «retire» түймесін басу керек.



Сур. 6. Бағдарламаның диалогтық терезесінің мысалдары
(Fig. 6. Examples of the dialog window of the program)

Қорытынды

Медициналық диагностикаға, атап айтқанда сүт безі қатерлі ісігін диагностикалауға арналған ақпараттық сараптамалық жүйені әзірлеу үшін анық емес жиындарды қолдану әдісі одан әрі жетілдірілді. Медициналық диагностикадағы математикалық әдістердің негізгі қолданулары талданды, олардың шектеулері бағаланды, анық емес логикаға негізделген принциптер белгіленді.

Негізгі ғылыми нәтижелер:

- Науқас жағдайының сандық және сапалық параметрлерін қамтитын анық емес логиканы пайдалана отырып, диагностикалық шешім қабылдауды формализациялау үшін математикалық модельдер мен алгоритмдер әзірленді.

- Мүшелік функциялардың математикалық модельдері осы параметрлерді анық емес жиындар ретінде көрсету үшін құрылды, олар диагностикалық модельдер мен сүт безі қатерлі ісігінің диагностикасын анықтау алгоритмдерінде қолданылады.

Әзірленген модельдер мен алгоритмдер жасанды интеллект, білім инженериясы, эксперименттік жоспарлау, анық емес жиындар теориясы және лингвистикалық айнымалылар принциптеріне негізделген. Эксперттік жүйе нақты деректер арқылы тексерілді.

Зерттеудің практикалық құндылығы. Зерттеу сүт безі қатерлі ісігінің ауырлығын жіктеу үшін анық емес логикаға негізделген автоматтандырылған сараптамалық жүйені пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл анық емес

сараптамалық жүйеге негізделген бағдарлама қабығы жасалды. Бұл қабық әртүрлі медициналық салаларда, соның ішінде клиникалық тәжірибе мен дәрігерді оқытуда интеллектуалды диагностикалық қолдау үшін қажетті объектіге бағытталған жүйелерді жобалау құралы ретінде қызмет ете алады. Қабықшаның көрнекті ерекшелігі - ол бағдарламалау немесе анық емес жиындар бойынша арнайы дайындықты қажет етпей, сараптамалық диагностикалық жүйелерді құруға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер

- Rotshtein A. (1998). Design and Tuning of Fussy IF – THEN Vuly for Medical Didicol Diagnosis. In Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine. USA, CRC-Press, pp. 235–295.
- Serkova V.K., Pavlov S.V., Romanava V.A., et al. (2017). Medical expert system for assessment of coronary heart disease destabilization based on the analysis of the level of soluble vascular adhesion molecules. Proc.SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 104453O.
- Tarczynska M., Sekula P., Gaweda K., Szubstarski M., Przybylski P. and Czekańska-Chehab E. (2020). Stress radiography in the diagnosis and assessment of the outcomes of surgical treatment of chronic anterolateral ankle instability,” *Acta Radiologica* 61(6), 783-788.
- Katelyan O.V., Himych S.D., Kolesnic P.F., Barylo A.S., Pavlov V.S., Kozlovskaya T.I., Maciejewski M. & Kalizhanova A. (2019). Study of the peripheral blood circulation of an abdominal wall using optoelectronic plethysmograph. Information Technology in Medical Diagnostics II. CRC Press, Balkema book, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 119-125.
- Kozlovskaya T.I., Sander S.V., et al. (2016). Device to determine the level of peripheral blood circulation and saturation. Proc. SPIE 10031, 100312Z.
- Wolfsdorf Joseph I., et al. (2018). ISPAD Clinical Practice Consensus Guidelines 2018: Diabetic ketoacidosis and the hyperglycemic hyperosmolar state. *Pediatric diabetes* 19, pp.155-177.
- Taubayev G., Bychkov A.L., Murzin F.A., Khairulin S.S., Abdikerimova G.B. (2020). Machine learning algorithms and classification of textures. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* this link is disabled, 98(23), pp. 3854–3866.
- Абдикеримова Г.Б., Бычков А.Л., Синьёв В., Мурзин Ф.А., Русских Н.Е., Рябчикова Е.И., Хайрулин С.С. (2019). Методы обнаружения и выделения областей на текстурных изображениях. *Вестник СибГУТИ*. (3):5-13.
- Әбдікерімова Г.Б., Бычков А.Л., Хайрулин С.С., Ф.А.Мурзин, Н.Е. Русских, Рябчикова Е.И., Синьёв В. (2019). Трансмиссиялық электронды микроскоп арқылы алынған кескіндерді талдау. Бүгінгі материалдар: 12, 90–92 бб.
- Абдикеримова Г.Б., Мурзин Ф.А., Бычков А.Л., Синьёв В.Е.И., Рябчикова Е.И. (2018). Микрофотографияда жасуша қабырғаларын сегменттеу үшін бағдарламалық құралдар. *Теориялық және қолданбалы ақпараттық технологиялар журналы* 96(15), 4783–479.
- Vasilevskiy O., Didych V., et al. (2018). Method of evaluating the level of confidence based on metrological risks for determining the coverage factor in the concept of uncertainty. *Proceedings of SPIE* 10808, 108082C.
- Angelsky O. V., Ushenko A. G., Ushenko Y. A. et al. (2010). Statistical, correlation, and topological approaches in diagnostics of the structure and physiological state of birefringent biological tissues,” CRC Press, USA, 21-67.
- Ushenko Yu. A., Dubolazov O. V., Karachevtsev A. O. (2011). Statistical Structure of Skin Derma Mueller Matrix Images in the Process of Cancer Changes. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 20(2), 145-154.
- Ushenko Yu. A., Sidor M. I., Bodnar G. B. (2014). Mueller-matrix mapping of optically anisotropic fluorophores of biological tissues in the diagnosis of cancer. *Quantum Electron*. 44(8), 785-790.

Zabolotna N. I., Wojcik W., Pavlov S. V., Ushenko O. G. Suleimenov B. (2013). Diagnostics of pathologically changed birefringent networks by means of phase Mueller matrix tomography. Proc. SPIE 8698, 86980C.

Nizhynska-Astapenko Z., Pavlov S., Vlasenko O., Wojcik W., et al. (2021). Information medical fuzzy-expert system for the assessment of the diabetic ketoacidosis severity on the base of the blood gases indices. Proc. SPIE 12126, Fifteenth International Conference on Correlation Optics, 1212626.

A.P. Ораззаева, Д.А. Тусупов, С.В. Павлов, Абдикеримова Г.Б. (2022). Эффективность обработки биомедицинских изображений рака молочной железы с использованием фильтров. Известия национальной академии наук Республики Казахстан. Казахский Национальный университет им. Аль-Фараби, серия физико-математическая, №. 1, 2022, С. 69-76.

Kvuetnyy R., Bunyak Y., Sofina O., et al. (2015). Blur recognition using second fundamental form of image surface. Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications, 98161A.

Zabolotna N. I., Sholota V. V., Okarskyi H.H. (2020). Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies. Proc. SPIE 11369, 113691S.

Omiotek Z., Kotyra A. (2021). Flame image processing and classification using a pre-trained VGG16 model in combustion diagnosis. Sensors 21(2), 1-15.

Bilynsky Y., Sukhotska I., Yukysh S., et al. (2017). Controlling geometric dimensions of small-size complex-shaped objects. Proc. SPIE 10445, 104450I.

References

Rotshtein A. (1998). Design and Tuning of Fussy IF – THEN Vuly for Medical Didicol Diagnosis. In Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine. USA, CRC-Press, pp. 235–295. (In English)

Serkova V.K., Pavlov S.V., Romanava V.A., et al. (2017). Medical expert system for assessment of coronary heart disease destabilization based on the analysis of the level of soluble vascular adhesion molecules. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 104453O. (In English)

Tarczynska M., Sekula P., Gaweda K., Szubstarski M., Przybylski P. and Czekajska-Chehab E. (2020). Stress radiography in the diagnosis and assessment of the outcomes of surgical treatment of chronic anterolateral ankle instability,” *Acta Radiologica* 61(6), 783-788. (In English)

Katelyan O.V., Himych S.D., Kolesnic P.F., Barylo A.S., Pavlov V.S., Kozlovska T.I., Maciejewski M. & Kalizhanova A. (2019). Study of the peripheral blood circulation of an abdominal wall using optoelectronic plethysmograph. *Information Technology in Medical Diagnostics II*. CRC Press, Balkema book, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 119-125. (In English)

Kozlovska T.I., Sander S.V., et al. (2016). Device to determine the level of peripheral blood circulation and saturation. Proc. SPIE 10031, 100312Z. (In English)

Wolfsdorf Joseph I., et al. (2018). ISPAD Clinical Practice Consensus Guidelines 2018: Diabetic ketoacidosis and the hyperglycemic hyperosmolar state. *Pediatric diabetes* 19, pp.155-177. (In English)

Taubayev G., Bychkov A.L., Murzin F.A., Khairulin S.S., Abdikerimova G.B. (2020). Machine learning algorithms and classification of textures. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* this link is disabled, 98(23), pp. 3854–3866. (In English)

Abdikirimova G.B., By'chkov A.L., Sin'yuy V., Murzin F.A., Russkix N.E., Ryabchikova E.I., Xajrulin S.S. (2019). Metody` obnaruzheniya i vy`deleniya oblastej na teksturny`x izobrazheniyax [The method of detection and selection of areas in texture images]. *Vestnik SibGUTI*. (3):5-13. (In rus)

Abdikirimova G.B., By'chkov A.L., Xajrulin S.S., F.A.Murzin, N.E. Russkix, Ryabchikova E.I., Sin`yu V. (2019). Transmissiyaly`k e`lektrondy` mikroskop arky`ly` aly`nfan keskinderdi taldau [Analysis of images obtained with a transmission electron microscope]. *Bygingi materialdar*: 12, 90–92 bb. (In kaz)

Abdikirimova G.B., Murzin F.A., By'chkov A.L., Sin`yu V.E.I., Ry`bchikova E.I. (2018). Mikrofotografiyada zhasusha kabyr`ralary`n segmentteu yshin bardarlamaaly`k qyraldar [Software

tools for segmenting cell walls in microphotography]. *Teoriyalı'k zhāne qoldanbaly'k aqparatty'k texnologiyalar zhurnaly'* 96(15), 4783–479. (In kaz)

Vasilevskiy O., Didych V., et al. (2018). Method of evaluating the level of confidence based on metrological risks for determining the coverage factor in the concept of uncertainty. *Proceedings of SPIE 10808, 108082C.* (In English)

Angelsky O. V., Ushenko A. G., Ushenko Y. A. et al. (2010). Statistical, correlation, and topological approaches in diagnostics of the structure and physiological state of birefringent biological tissues,” *CRC Press, USA, 21-67.* (In English)

Ushenko Yu. A., Dubolazov O. V., Karachevtsev A. O. (2011). Statistical Structure of Skin Derma Mueller Matrix Images in the Process of Cancer Changes. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics).* 20(2), 145-154. (In English)

Ushenko Yu. A., Sidor M. I., Bodnar G. B. (2014). Mueller-matrix mapping of optically anisotropic fluorophores of biological tissues in the diagnosis of cancer. *Quantum Electron.* 44(8), 785-790. (In English)

Zabolotna N. I., Wojcik W., Pavlov S. V., Ushenko O. G. Suleimenov B. (2013). Diagnostics of pathologically changed birefringent networks by means of phase Mueller matrix tomography. *Proc. SPIE 8698, 86980C.* (In English)

Nizhynska-Astapenko Z., Pavlov S., Vlasenko O., Wojcik W., et al. (2021). Information medical fuzzy-expert system for the assessment of the diabetic ketoacidosis severity on the base of the blood gases indices. *Proc. SPIE 12126, Fifteenth International Conference on Correlation Optics, 1212626.* (In English)

A.R. Orazava, D.A. Tussupov, S.V. Pavlov, Abdikerimova G.B. (2022). E'ffektivnost' obrabotki biomedicinskix izobrazhenij raka molochnoj zhelezy' s ispol'zovaniem fil'trov [Effectiveness of processing biomedical images of breast cancer using filters]. *Izvestiya nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazaxstan. Kazaxskij Nacional'ny'j universitet im. Al'-Farabi, seriya fiziko-matematicheskaya, №. 1, 2022, S. 69-76.* (In rus)

Kvyetnyy R., Bunyak Y., Sofina O., et al. (2015). Blur recognition using second fundamental form of image surface. *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications, 98161A.* (In English)

Zabolotna N. I., Sholota V. V., Okarskiy H.H. (2020). Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies. *Proc. SPIE 11369, 113691S.* (In English)

Omiotek Z., Kotyra A. (2021). Flame image processing and classification using a pre-trained VGG16 model in combustion diagnosis. *Sensors* 21(2), 1-15. (In English)

Bilynsky Y., Sukhotska I., Yukysh S., et al. (2017). Controlling geometric dimensions of small-size complex-shaped objects. *Proc. SPIE 10445, 104450I.* (In English)

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.337>

MPHTИ: 28.23.37

УДК: 004.89

D. Oralbekova^{1*}, O. Mamyrbayev¹, A. Akhmediyarova², D. Kassymova³, 2025.

¹ Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan;

² Satbayev University, Almaty, Kazakhstan;

³ ALT University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: dinaoral@mail.ru

USING KAZAKH NER DATASETS FOR MULTICLASS CLASSIFICATION IN THE LEGAL DOMAIN: A COMPARATIVE STUDY OF BERT, GPT, AND LSTM MODELS

Oralbekova Dina – PhD, senior researcher, associate professor, Institute of information and computational technologies, Almaty, Kazakhstan, E-mail: dinaoral@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4975-6493>;

Mamyrbayev Orken – PhD, professor, deputy general director, Institute of information and computational technologies, Almaty, Kazakhstan, E-mail: morkenj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8318-3794>;

Akhmediyarova Ainur – PhD, professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: a.akhmediyarova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4439-7313>;

Kassymova Dinara – PhD, assistant professor, ALT University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: d.kassymova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6152-8317>.

Abstract. This study presents an in-depth comparative analysis of the performance of three key approaches in natural language processing (NLP) — transformers, recurrent neural networks, and traditional machine learning methods — in the task of multiclass text classification in the legal domain of the Kazakh language. A specialized dataset for named entity recognition, adapted to legal topics, was used for the analysis. The primary focus is on the classification of texts reflecting legal aspects and terminology. Evaluation metrics such as accuracy, recall, precision, and area under the curve (AUC) were applied, enabling an objective comparison of their effectiveness. Special attention was given to adapting methods for the Kazakh language, which is under-researched in computational linguistics. This underscores the importance of developing specialized algorithms that ensure effective processing of texts in this language, considering its agglutinative structure and complex legal terminology. The study not only highlights the strengths and weaknesses of modern NLP models in processing texts in low-resource languages but also reveals new opportunities for integrating these technologies into applied

fields. These include automating legal document management, analyzing court decisions, and developing intelligent decision-support systems for the legal sector. The findings also emphasize the critical importance of creating specialized datasets for training and testing models. This research expands the understanding of the capabilities of existing NLP models for processing texts in the Kazakh language and emphasizes the significance of further advancing technologies for automating legal services. The presented results can serve as a foundation for the development of accessible and scalable tools that enhance the efficient processing of legal information and contribute to the growth of digital jurisprudence.

Keywords: NLP, LSTM, BERT, GPT, text classification.

Д. Оралбекова^{1*}, О. Мамырбаев¹, А. Ахмедиярова², Д. Қасымова³, 2025.

¹ Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы, Қазақстан;

² Satbayev университеті, Алматы, Қазақстан;

³ М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: dinaoral@mail.ru

ҚАЗАҚ ТІЛІНДЕГІ NER ДЕРЕКТЕР ЖИНАҒЫН ҚҰҚЫҚТЫҚ САЛАДА КӨПСАНАТТЫ ЖІКТЕУ ҮШІН ПАЙДАЛАНУ: BERT, GPT ЖӘНЕ LSTM МОДЕЛЬДЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ЗЕРТТЕУІ

Оралбекова Дина – PhD, аға ғылыми қызметкер, Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы, Қазақстан, E-mail: dinaoral@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4975-6493>;

Мамырбаев Өркен – PhD, профессор, бас директордың орынбасары, Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы, Қазақстан, E-mail: morkenj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8318-3794>;

Ахмедиярова Айнұр – PhD, профессор, Satbayev университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: a.akhmediyarova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4439-7313>;

Қасымова Динара – PhD, ассистент-профессор, М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: d.kassymova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6152-8317>.

Аннотация. Бұл зерттеуде табиғи тілдерді өңдеу (NLP) саласындағы үш негізгі тәсілдің – трансформерлердің, рекурренттік нейрондық желілердің және дәстүрлі машиналық оқыту әдістерінің – қазақ тіліндегі құқықтық саладағы мәтіндерді көпсанатты жіктеу міндеттерінде өнімділігіне терең салыстырмалы талдау ұсынылады. Талдау үшін заң тақырыбына бейімделген, атаулы объектілерді тануға арналған арнайы деректер жинағы пайдаланылды. Негізгі назар құқықтық аспектілер мен терминологияны қамтитын мәтіндерді жіктеуге аударылды. Модельдерді бағалау үшін дәлдік (accuracy), толықтық (recall), басқа дәлдік көрсеткіші (precision) және қисық астындағы аумақ (AUC) сияқты метрикалар қолданылды, бұл олардың тиімділігін объективті түрде салыстыруға мүмкіндік берді. Қазақ тіліне арналған әдістерді бейімдеуге ерекше көңіл бөлінді, өйткені бұл тіл компьютерлік лингвистикада жеткіліксіз зерттелген. Бұл қазақ тілінің агглютинативтік құрылымы мен

күрделі құқықтық терминологиясын ескере отырып, мәтіндерді өңдеуге арналған арнайы алгоритмдерді әзірлеу қажеттілігін көрсетеді. Зерттеу тек ресурстары шектеулі тілдердегі мәтіндерді өңдеуге арналған заманауи NLP модельдерінің күшті және әлсіз жақтарын көрсетіп қана қоймай, сонымен қатар осы технологияларды қолданбалы салаларға интеграциялаудың жаңа мүмкіндіктерін ашады. Оларға құқықтық құжат айналымын автоматтандыру, сот шешімдерін талдау, сондай-ақ құқықтық салаға арналған интеллектуалды шешім қабылдауды қолдау жүйелерін әзірлеу жатады. Зерттеу нәтижелері модельдерді оқыту және тестілеу үшін арнайы деректер жиынтықтарын әзірлеудің маңыздылығын растайды. Бұл зерттеу қолданыстағы NLP модельдерінің қазақ тіліндегі мәтіндерді өңдеудегі мүмкіндіктерін түсінуді кеңейтеді және құқықтық қызметтерді автоматтандыру технологияларын одан әрі дамытудың маңыздылығын көрсетеді. Ұсынылған нәтижелер құқықтық ақпаратты тиімді өңдеуді арттыратын және цифрлық құқықтанудың дамуына ықпал ететін қолжетімді әрі ауқымды құралдарды әзірлеуге негіз бола алады.

Түйін сөздер: NLP, LSTM, BERT, GPT, мәтінді классификациялау.

Д. Оралбекова^{1*}, О. Мамырбаев¹, А. Ахмедиярова², Д. Касымова³, 2025.

¹Институт информационных и вычислительных технологий,
Алматы, Казахстан;

²Satbayev University, Алматы, Казахстан;

³ALT университет имени М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан.

E-mail: dinaoral@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБОРОВ ДАННЫХ NER НА КАЗАХСКОМ ЯЗЫКЕ ДЛЯ МУЛЬТИКЛАССИФИКАЦИИ В ПРАВОВОЙ СФЕРЕ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ BERT, GPT И LSTM

Оралбекова Дина – PhD, старший научный сотрудник, Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан, E-mail: dinaoral@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4975-6493>;

Мамырбаев Оркен – PhD, профессор, заместитель генерального директора, Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан, E-mail: morkenj@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8318-3794>;

Ахмедиярова Айнур – PhD, профессор, Satbayev Университет, Алматы, Казахстан, E-mail: a.akhmediyarova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-4439-7313>;

Касымова Динара – PhD, ассистент-профессор, ALT университет имени М. Тынышпаева, Алматы, Казахстан, E-mail: d.kassymova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6152-8317>.

Аннотация. В данном исследовании представлен углубленный сравнительный анализ производительности трех ключевых подходов в области обработки естественного языка (NLP) — трансформеров, рекуррентных нейронных сетей и традиционных методов машинного обучения — в задачах мультиклассификации текстов в правовой сфере на казахском языке. Для анализа был использован специализированный набор данных для

распознавания именованных сущностей, адаптированный под юридическую тематику. Основное внимание уделено классификации текстов, отражающих юридические аспекты и терминологию. Для оценки моделей применены метрики точности (accuracy), полноты (recall), прецизионности (precision) и площади под кривой (AUC), что позволило провести объективное сравнение их эффективности. Особое внимание уделено адаптации методов для казахского языка, который является недостаточно исследованным в компьютерной лингвистике. Это подчеркивает важность разработки специализированных алгоритмов, обеспечивающих качественную обработку текстов на данном языке с учетом его агглютинативной структуры и сложной юридической терминологии. Исследование не только демонстрирует сильные и слабые стороны современных NLP-моделей в задачах обработки текстов на языках с ограниченными ресурсами, но и открывает новые перспективы для интеграции этих технологий в прикладные области. Среди них можно выделить автоматизацию юридического документооборота, анализ судебных решений, а также создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений для правовой сферы. Результаты работы также подтверждают важность создания специализированных данных для обучения и тестирования моделей. Проведенное исследование расширяет понимание возможностей существующих моделей NLP для работы с текстами на казахском языке и подчеркивает значимость дальнейшего развития технологий автоматизации юридических услуг. Представленные результаты могут стать основой для создания доступных и масштабируемых инструментов, способствующих эффективной обработке правовой информации и развитию цифровой юриспруденции.

Ключевые слова: NLP, LSTM, BERT, GPT, классификация текстов.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант BR24993166).

Введение. Обработка естественного языка (NLP) охватывает широкий спектр вычислительных методов, предназначенных для интерпретации, генерации и анализа человеческого языка. Одной из ключевых задач в области NLP является классификация текста, которая находит применение в различных сферах, начиная от фильтрации спама до автоматизации работы служб поддержки (Narejo, et al., 2024). Однако сложность этой задачи многократно возрастает для языков с ограниченными ресурсами, таких как казахский язык, который не обладает достаточной вычислительной базой и объемом данных для проведения передовых исследований в области NLP.

Казахский язык, относящийся к тюркской языковой семье и являющийся официальным в Казахстане, привлекает все больше внимания в сообществе NLP, но его ресурсы для исследования и разработки остаются ограниченными по сравнению с более широко изучаемыми языками, такими как английский

(Mamyrbayev, et al., 2020; Oralbekova, et al., 2022). За последние годы был достигнут определенный прогресс, включая создание базовых словарей и морфологических анализаторов (Myrzakhmetov, et al., 2018; Abibullayeva, et al., 2022; Yeshpanov, et al., 2022). Однако дефицит аннотированных данных остается значительной проблемой, особенно в задачах классификации текста, которые требуют крупных и разнообразных наборов данных для эффективного обучения и тестирования моделей.

В настоящем исследовании рассматривается возможность использования существующего набора данных распознавания именованных объектов (NER) для решения задач мультиклассификации в контексте правовой сферы. Это исследование направлено на расширение использования данного набора данных за пределы его первоначальной области применения, адаптируя его для юридической классификации текстов. Юридические тексты на казахском языке обладают специфическими морфологическими и синтаксическими особенностями, которые делают задачу классификации нетривиальной. Стандартные модели NLP, разработанные для языков с другими структурами, не всегда способны адекватно обработать казахский текст, особенно в юридическом контексте.

Для решения этой задачи в нашем исследовании используются три различных модели: трансформеры, рекуррентные нейронные сети. Каждая из этих моделей имеет уникальные преимущества для задач классификации текстов. Рекуррентные нейронные сети (RNN), такие как LSTM, особенно полезны при работе с последовательными данными, что имеет важное значение для казахского языка, который является агглютинативным и имеет сложную структуру словоформ. Трансформеры, такие как BERT (Garrido-Merchan, et al., 2023; Jamshidi, et al., 2024), предоставляют глубокое контекстное понимание текста, что позволяет лучше учитывать юридические нюансы и специфические термины. Модели генеративного типа, такие как GPT, демонстрируют эффективность в задачах, связанных с языковой генерацией, и могут быть полезны для анализа и классификации правовых документов с неструктурированным текстом (Pandey, et al., 2024; Li, et al., 2024).

Мы проводим сравнительный анализ этих моделей для задач мультиклассификации казахских текстов, применяя метрики, такие как точность, полнота, F1-мера и AUC (Reusens, et al., 2024; Bhowmik, et al., 2024). Этот всесторонний подход позволяет не только выявить сильные и слабые стороны каждой модели, но и оценить их потенциал для применения в реальных задачах, таких как автоматизация юридической помощи, анализ судебных документов и классификация запросов в правовой сфере.

Таким образом, наше исследование подчеркивает важность разработки NLP-инструментов для казахского языка, способствуя прогрессу в области цифровой юриспруденции и обеспечивая новый уровень автоматизации юридических услуг на языках с ограниченными ресурсами.

Материалы и методы исследования. Ландшафт NLP для казахского языка постепенно обогащался благодаря различным целенаправленным исследованиям. Одной из основополагающих работ является исследование экспериментов по расширенному языковому моделированию казахского языка (Murzakhmetov, et al., 2018), которое заложило основу для понимания сложностей, связанных с созданием вычислительных ресурсов для недостаточно представленных языков. Это исследование подчеркивает первоначальные шаги по адаптации передовых методов NLP к казахскому языку, подчеркивая потенциал сложных языковых моделей для улучшения обработки и понимания текста.

Основываясь на этих основополагающих моделях, недавние достижения продемонстрировали возможность адаптации современных технологий, таких как BERT, к казахскому языку. В частности, исследование извлечения ключевых слов из наборов данных новостей на казахском языке с использованием BERT (Abibullayeva, et al., 2022) показало, как модели на основе Transformer могут эффективно использоваться для задач, требующих глубокого семантического понимания, таких как определение ключевых терминов и фраз, которые отражают суть новостных статей. Это приложение не только демонстрирует гибкость BERT, но и его потенциал для улучшения поиска информации и анализа контента на казахском языке.

Дальнейшее расширение сферы применения NLP на казахском языке, классификация научных документов с использованием глубоких нейронных сетей и слияние изображений и текста (Bogdanchikov, et al., 2022) иллюстрирует инновационные подходы, изучаемые в сообществе. В этой работе особое внимание уделяется интеграции мультимодальных данных для целей классификации, предлагая новые пути повышения производительности модели и ее применимости при обработке текстов на казахском языке.

Центральное место в текущем исследовании занимает набор данных KazNERD (Yeshpanov, et al., 2022), который является значительным вкладом в эту область и предоставляет богато аннотированный корпус для распознавания именованных объектов (NER) на казахском языке. Создание и использование этого набора данных знаменуют собой важнейший прогресс в исследованиях NLP для нашей страны, предлагая ценный ресурс для обучения и оценки моделей NLP для задач распознавания сущностей. Этот набор данных служит основой для нашей работы, позволяя исследовать проблемы мультиклассификации через призму NER.

Вместе эти исследования образуют связное повествование, которое подчеркивает развивающиеся возможности и применение технологий NLP для казахского языка. От базового языкового моделирования до практического применения моделей на основе Transformer и не только — в этой области наблюдаются значительные успехи в адаптации и применении передовых вычислительных методов для решения уникальных задач, связанных с казахским языком. Наша работа направлена на то, чтобы внести свой вклад

в этот растущий объем знаний, уделяя особое внимание практической реализации моделей LSTM и BERT для задач мультиклассификации в рамках разработанной структуры NER.

Метрики оценки

Прежде чем мы начнем практически анализировать модели, важно понять фундаментальные концепции и архитектуры, лежащие в основе современного ландшафта моделей NLP. Задачи NLP, начиная от классификации текста и заканчивая анализом настроений и ответами на вопросы, требуют сложных моделей, способных понимать и генерировать человеческий язык. Для достижения этой цели были разработаны различные модели глубокого обучения, каждая из которых имеет свой уникальный подход к обработке и интерпретации текста.

Эволюция моделей NLP началась с более простых нейронных сетей с прямой связью и продолжилась через рекуррентные нейронные сети (RNN), включая сети долгосрочной краткосрочной памяти (LSTM), чтобы удовлетворить потребность в фиксации временных зависимостей в текстовых последовательностях. Однако эти модели часто имели проблемы с долгосрочной зависимостью и вычислительной эффективностью.

Внедрение архитектуры Transformer ознаменовало значительный сдвиг, приведший к разработке таких моделей, как BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) и GPT (Generative Pre-trained Transformer). Эти модели используют механизмы внимания для обработки текста таким образом, чтобы более эффективно и результативно улавливать контекст, чем их предшественники.

Понимание принципов построения, сильных сторон и ограничений этих моделей имеет решающее значение для их эффективного применения в задачах NLP. Используя свои преимущества, исследователи и практики могут решать широкий спектр задач NLP с беспрецедентной точностью и эффективностью.

LSTM (Long Short-Term Memory)

LSTM — это тип рекуррентной нейронной сети (RNN), способной изучать долгосрочные зависимости. Они созданы для того, чтобы избежать проблемы долгосрочной зависимости за счет включения ряда шлюзов, контролирующих поток информации (Minaee, et al., 2022). Эти модели оказались особенно эффективными для решения задач прогнозирования последовательностей и показали успех в таких задачах, как генерация текста, распознавание речи и языковой перевод. Несмотря на свою эффективность в фиксации временных зависимостей, LSTM могут бороться с очень длинными последовательностями и могут уступать моделям на основе Transformer, таким как BERT, для задач, требующих понимания более широкого контекста (Ezen-Can, et al., 2020).

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)

BERT отличается своей глубокой двунаправленной природой, обрабатывая текст как слева направо, так и справа налево, что позволяет ему лучше понимать контекст. Это делает BERT особенно эффективным для задач, требующих

глубокого понимания языкового контекста, таких как анализ настроений, ответы на вопросы и распознавание именованных объектов. Его архитектура преобразователя позволяет ему лучше справляться с долгосрочными зависимостями по сравнению с традиционными моделями, такими как LSTM. Производительность BERT заметно повышается при точной настройке для конкретной задачи даже с относительно небольшими наборами данных (Tikaayat Ray, et al., 2023).

GPT (Generative Pre-trained Transformer)

Модели GPT, благодаря своей способности генерировать связный и контекстуально релевантный текст, превосходно справляются с задачами, требующими языковой генерации, такими как завершение текста, творческое письмо и диалоговые системы. Авторегрессионный характер GPT, обрабатывающий текст слева направо, позволяет ему прогнозировать вероятность последовательности слов и генерировать текст на основе вероятностей последующих слов. Архитектура преобразователя GPT позволяет эффективно изучать зависимости на больших расстояниях в тексте. Однако, в отличие от BERT, односторонний характер GPT может ограничивать понимание контекста по сравнению с двусторонним подходом BERT (Narejo, et al., 2024).

Таким образом, выбор между BERT, LSTM и GPT для задач классификации NLP зависит от конкретных требований поставленной задачи, включая характер набора данных, тип задачи NLP и доступные вычислительные ресурсы. BERT очень эффективен для задач, требующих глубокого понимания языкового контекста, LSTM превосходит в изучении долгосрочных зависимостей для прогнозирования последовательности, а GPT лучше всего подходит для задач, требующих последовательной и контекстно-зависимой генерации языка.

Оценка производительности модели является важнейшим компонентом любой задачи машинного обучения. Именно с помощью различных показателей мы оцениваем эффективность наших моделей, каждая из которых предлагает свой взгляд на возможности модели. Метрики — это призма, через которую мы рассматриваем и понимаем результаты, и выбор правильных из них имеет решающее значение для справедливой и информативной оценки. В этом исследовании мы используем набор хорошо зарекомендовавших себя показателей, каждый из которых выбран из-за его способности отражать определенный аспект производительности модели.

В нашем сравнительном исследовании мы используем три модели NLP — LSTM, BERT и GPT, каждая из которых предлагает различные возможности обработки и классификации текста. Чтобы точно оценить их эффективность, мы используем ряд показателей, каждый из которых касается конкретных аспектов поведения модели.

Точность — это отправная точка для оценки, которая дает нам широкую оценку производительности каждой модели. Однако точность не дает полной картины, особенно когда речь идет о дисбалансе классов или различных

издержках, связанных с различными типами ошибок. Чтобы копнуть глубже, мы используем точность и отзыв. Точность имеет решающее значение, когда последствия ложных срабатываний значительны: мы должны быть уверены, что положительные результаты, выявленные нашими моделями, являются истинными положительными.

Кривая AUC-ROC делает еще один шаг вперед, позволяя понять, насколько хорошо наши модели различают классы на всех возможных пороговых уровнях. Это особенно полезно для точной настройки моделей таким образом, чтобы они соответствовали конкретным оперативным целям или процессам принятия решений.

При сравнительном анализе моделей важно учитывать совокупное значение этих показателей, чтобы получить целостную картину производительности. Использование набора метрик в тандеме обеспечивает комплексное представление о производительности модели, особенно в контексте классификации по нескольким меткам. Каждая метрика предлагает уникальный взгляд на конкретный аспект прогнозных возможностей модели, и вместе они рисуют полную картину ее сильных и слабых сторон.

Когда эти показатели используются вместе, они предлагают надежную структуру оценки, которая учитывает как производительность на макроуровне (точность, AUC-ROC), так и динамику на микроуровне (точность и полнота для отдельных классов). Этот мультиметрический подход жизненно важен для задач мультиклассификации, поскольку:

- Это снижает риск чрезмерной зависимости от одной метрики, которая может не отражать все аспекты производительности.
- Он выделяет конкретные области для улучшения модели, например, какие классы нуждаются в большей точности или полноте, что дает информацию для уточнения модели и разработки функций.
- Это позволяет сделать сбалансированный выбор модели, не отдавая предпочтение какому-либо конкретному классу или типу ошибок, что может иметь решающее значение в приложениях с различными и значительными последствиями для разных типов ошибок.

Тщательно анализируя все эти показатели, исследователи и практики могут принимать более обоснованные решения о развертывании моделей, понимать связанные с этим компромиссы и направлять разработку моделей, которые лучше подходят для сложных реальных приложений NLP.

Подготовка данных

Для этапа подготовки данных в нашем проекте мы предприняли комплексный процесс по преобразованию набора данных распознавания именованных объектов (NER) на казахском языке в формат, подходящий для нашей схемы бинарной классификации, что в конечном итоге упростило задачу мультиклассификации в контексте правовой сферы и цифровой юриспруденции. Этот процесс включал несколько ключевых шагов, каждый из которых был критически важен для обеспечения целостности и полезности нашего набора

данных для обучения моделей, связанных с юридическими услугами и правовой помощью. В данном разделе мы подробно опишем создание четырех бинарных меток классов и последующий процесс мультиклассификации, акцентируя внимание на его значимости и методологии.

Учитывая подробные описания именованных объектов (NE) в правовой сфере, мы разработали схему бинарной классификации, которая отражает аспекты данных и разделяет их на две значимые категории. С учетом природы NE и контекста их использования, логическая бинарная классификация могла бы различать предложения, которые включают:

1. *Классификация правовых документов:*

Включает именованные объекты, такие как 'LAW', 'DOCUMENT', 'CASE', которые часто встречаются в юридических документах, нормативных актах и судебных разбирательствах.

Пример использования: Юридические фирмы или платформы для анализа правовых документов могут использовать данную классификацию для автоматической сортировки и анализа контрактов, судебных решений и других юридических текстов.

2. *Классификация юридической помощи:*

Содержит NE, такие как 'LAWYER', 'LEGAL_SERVICE', 'CONTACT', указывающие на взаимодействие между адвокатами, клиентами и юридическими учреждениями.

Пример использования: Системы юридической поддержки могут автоматически определять сообщения, касающиеся запросов на юридическую помощь, и перенаправлять их соответствующим специалистам.

3. *Классификация судебных разбирательств:*

Включает предложения с NE, такими как 'COURT', 'JUDGE', 'CASE_NUMBER', которые указывают на судебные процессы или упоминания дел, находящихся в стадии рассмотрения.

Пример использования: Платформы мониторинга судебных процессов могут классифицировать и отслеживать информацию по активным делам, обеспечивая своевременное уведомление клиентов или адвокатов.

4. *Классификация коммерческих правовых отношений:*

Содержит NE, такие как 'CONTRACT', 'PARTNERSHIP', 'MONEY', 'ORGANISATION', что указывает на правовые аспекты коммерческих отношений, включая договоры, сделки и финансовые обязательства.

Пример использования: Юридические отделы компаний могут использовать данную классификацию для отслеживания договоров и других коммерческих документов, которые требуют юридического рассмотрения.

В рамках данного исследования категории были выбраны вручную для демонстрации функциональности метода. Однако в дальнейшем планируется автоматизация процесса создания классификационных меток с использованием более сложных алгоритмов, учитывающих больший спектр именованных объектов (NE) и их контекст в предложении. Это усовершенствование

позволит не только упростить процесс классификации, но и повысить точность анализа правовых текстов на казахском языке, что будет особенно полезно для цифровой юриспруденции и предоставления юридических услуг.

Важным шагом в подготовке нашего набора данных была токенизация, при которой преобразовывали необработанные текстовые последовательности в структурированный формат, который могли обрабатывать наши модели. Используя BertTokenizer и GPT2Tokenizer, мы гарантировали совместимость нашего набора данных с современными моделями Transformer. Для модели LSTM был использован специальный процесс токенизации, включающий создание уникального сопоставления Token2Index. Этот процесс сыграл важную роль в преобразовании текстов на казахском языке в последовательности целых чисел, каждое из которых представляет собой токен или слово в нашем словаре, который превышает 72 000 уникальных слов. Этот всеобъемлющий словарный запас имел решающее значение, поскольку он отражал лингвистическое разнообразие и сложность казахского языка, закладывая прочную основу для точного обучения и оценки моделей.

Результаты и обсуждение. В рамках данного исследования был проведен эмпирический анализ с использованием трех широко известных архитектур для обработки естественного языка: LSTM, BERT и GPT. Целью исследования было оценить их эффективность в задачах мультиклассификации текста на казахском языке, с особым акцентом на юридическую сферу. Анализ был направлен на проверку возможностей моделей в классификации текстов, связанных с правовыми документами, судебными разбирательствами и юридической поддержкой. Наш набор данных, наполненный многомерными атрибутами, стал испытательной площадкой для этих моделей, предоставив богатый набор лингвистических особенностей для оценки.

Функция потерь (Loss) и точность (Accuracy) моделей

Мы начали нашу оценку с отказа от недоумения — меры, традиционно связанной с языковым моделированием — и вместо этого сосредоточили наш анализ на потерях и точности. Эти метрики являются наиболее важными и дают прямое представление об эффективности модели для задач классификации. Потери, будь то двоичная или категориальная кросс-энтропия, разграничивают расхождение прогнозируемых вероятностей от фактических меток, проливая свет на достоверность модели — или ее отсутствие. Точность в своей простой элегантности измеряет долю правильно классифицированных экземпляров, что отражает практическую эффективность модели.

Демонстрируя классические признаки RNN, путь LSTM начался с резкого снижения потерь в обучении, которые в конечном итоге вышли на плато — признак стабильности обучения (рис. 1). Тем не менее, его эффективность проверки колебалась, что является свидетельством борьбы с обобщениями и индикатором потенциального переобучения. Эта версия была дополнительно подтверждена оценками точности и полноты, которые, хотя и похвальны, но предполагали возможности для улучшения обобщения модели.

Благодаря своей базовой архитектуре Transformer путь BERT ознаменовался резким и неуклонным снижением потерь как на этапах обучения, так и на этапах проверки. Он продемонстрировал замечательную эффективность обучения, что отражено в высоких показателях точности, воспроизводимости и AUC. Мастерство BERT в понимании контекста, подкрепленное механизмами самообслуживания, проявилось в превосходной обработке классификации текста, укрепляя его надежность при анализе текстовых нюансов в нашем наборе данных.

Авторегрессионная модель, известная своими возможностями генерации языков, столкнулась с проблемами при переориентации на классификацию. Несмотря на первоначальное улучшение показателей обучения, его производительность стабилизировалась, что указывает на потенциальное несоответствие между склонностью модели и спецификой задачи. Точность GPT, хотя и улучшалась с течением времени, оставалась ниже звездной производительности BERT, что соответствует внутренним различиям в конструкции между генеративными и дискриминативными моделями.

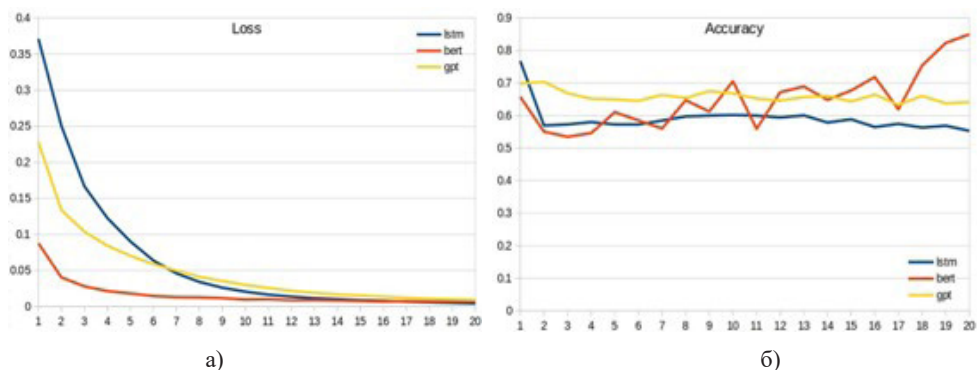


Рисунок 1 – Показатели трех моделей по а) loss и б) метрике accuracy

Площадь под кривой (AUC)

Площадь под кривой (AUC) предоставила уникальное представление о производительности модели при различных пороговых значениях. Он продемонстрировал надежную различительную способность каждой модели. Оценки AUC BERT, подобные парящему орлу, подчеркнули его превосходное мастерство классификации при различных порогах принятия решения, что еще больше подтвердило его заслуги в нашей оценке (рис. 2).

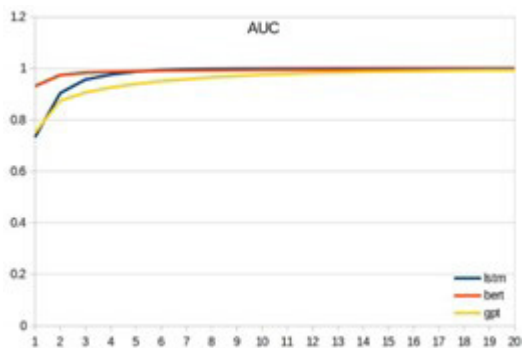


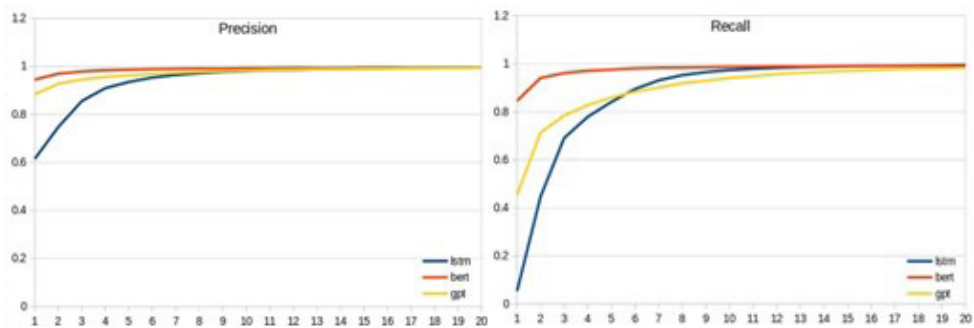
Рисунок 2 – Показатель AUC для трех моделей

Измерение точности (Precision) и полноты (Recall)

По мере того, как мы копали глубже, точность и полнота стали дуэтом, отражающим баланс между специфичностью и чувствительностью модели. Precision (точность измерения) показывала, насколько хорошо каждая модель определяет соответствующие случаи. Recall - измерение полноты — отражало способность каждой модели идентифицировать все соответствующие экземпляры. Превосходство BERT было очевидно в обоих случаях, подчеркивая его тонкую дискриминацию соответствующих фрагментов текста среди моря данных (рис. 3).

Общей нитью среди моделей было расхождение между производительностью обучения и проверки. Этот раскол отражает вечное противоречие между усвоенными моделями модели и ее способностью к обобщению. Это баланс между запоминанием и адаптируемостью — ключ к развертыванию модели в реальных сценариях, где предсказуемость данных так же капризна, как ветер.

Все три модели (BERT, GPT, LSTM) работали над одной и той же задачей: классификацией по нескольким меткам на основе типов объектов во входном тексте. Основное различие заключается в том, как они обрабатывают входные данные и учатся на их основе, учитывая их архитектурные различия. BERT и GPT используют архитектуры преобразователей, способные двунаправленно понимать контекст, в то время как LSTM обрабатывает данные последовательно, что может повлиять на то, как они интерпретируют значение и отношения слов в предложении.



а) б)
Рисунок 3 – Показатели трех моделей по метрикам а) precision и б) recall

Благодаря тщательной настройке модели и детальному процессу оценки наше исследование позволило получить значимые результаты. Архитектура BERT, оптимизированная для распознавания контекстуальных связей, демонстрирует превосходство над LSTM в стабильности и производительности. Модель GPT, хотя и не достигла высокой точности классификации, подчеркивает потенциал использования генеративных подходов в задачах дискриминации.

Таблица 1. Полученные результаты на основе тренировочных данных

Training Performance			
Metric / Model	LSTM	BERT	GPT
Loss	0.2093	0.0477	0.1073
Accuracy	0.4674	0.9255	0.5028
Precision	0.8453	0.9682	0.9414
Recall	0.8423	0.9631	0.9070
Auc	0.9495	0.9806	0.9515

Таблица 2. Полученные результаты на основе валидационных данных

Validation Performance			
Metric / Model	LSTM	BERT	GPT
Loss	0.1993	0.0481	0.1156
Accuracy	0.4681	0.9202	0.5111
Precision	0.8524	0.9712	0.9369
Recall	0.8483	0.9585	0.9105
Auc	0.9557	0.9781	0.9540

Сравнительный анализ показывает, что LSTM, благодаря своей способности эффективно обрабатывать последовательные данные, сохраняет актуальность в задачах анализа текста. Результаты BERT, основанные на преимуществах параллельной обработки с использованием архитектуры Transformer, подтверждают её эффективность в моделировании сложных языковых зависимостей. Наблюдения за работой GPT указывают на текущие ограничения

генеративных моделей в классификационных задачах, что расширяет наше понимание их применения в обработке естественного языка.

Модель LSTM показала заметное сокращение потерь при обучении, что свидетельствует об обучении, но показатели проверки выявили волатильность, предполагающую склонность к переобучению. Это отражается на точности и полноте модели, которые, несмотря на высокий уровень, не достигли оптимального баланса, о чем свидетельствуют другие модели. Показатели AUC для обучения и проверки LSTM были высокими, однако они оставались неизменно ниже показателей, достигнутых BERT, что сигнализировало о несоответствии в согласованности классификации при различных пороговых настройках.

Производительность BERT была отмечена быстрым и устойчивым снижением потерь при обучении, что согласуется с его архитектурным преимуществом в эффективном использовании контекста посредством двунаправленной обработки. Потеря валидации отражала профиль обучения, предполагая превосходный перенос обучения на невидимые данные. Точность, воспроизводимость, полнота и AUC модели были одинаково высокими, что подчеркивало ее надежность и превосходную производительность в задачах классификации. Примечательно, что показатель AUC, представляющий совокупную эффективность модели по всем пороговым значениям классификации, был самым высоким для BERT, что подтверждает его сильную дискриминационную способность.

Кривая обучения модели GPT, хотя и демонстрирует улучшение, вышла на плато раньше, чем кривая BERT, что указывает на насыщение обучения, которое можно объяснить генеративным характером модели, которая может не оптимально согласовываться с задачами классификации. Производительность модели GPT соответствовала ожиданиям от модели, в первую очередь предназначенной для генерации, а не дискриминации, о чем свидетельствуют ее более низкие показатели точности и AUC по сравнению с BERT.

Между этапами обучения и проверки было зафиксировано, что BERT сохранял наибольшую согласованность производительности, в то время как LSTM и GPT демонстрировали более существенные расхождения. Это говорит о том, что архитектура BERT и предварительное обучение на различных корпусах способствуют лучшему обобщению, что является критическим фактором для реального применения, где модели сталкиваются с разнообразными и непредсказуемыми данными.

Таким образом, данные подтверждают вывод о том, что архитектура BERT на основе Transformer обеспечивает существенные преимущества в задачах классификации, о чем свидетельствует ее высочайшая производительность по всем оцениваемым показателям. LSTM, хотя и полезен для прогнозирования последовательности, может потребовать дальнейшей оптимизации, чтобы уменьшить переобучение и улучшить обобщение. Более низкая производительность GPT в этом контексте усиливает предрасположенность

модели к генеративным задачам, указывая на необходимость тщательного рассмотрения при ее применении к задачам классификации.

По мере того, как мы намечаем путь вперед, наше внимание сосредотачивается на улучшении понимания этими моделями сложных повествовательных структур, особенно за счет интеграции распознавания сущностей в перекрестных предложениях. Эта инициатива направлена на то, чтобы расширить возможности моделей за пределы отдельных предложений и на целые документы, тем самым обогащая классификацию более глубоким пониманием текстового континуума. Позволяя нашим моделям различать и интерпретировать всеобъемлющее повествование, мы стремимся повысить точность задач классификации, тем самым более точно согласовывая модели с тонкостями понимания человеческого языка.

Заключение. В этом сравнительном анализе мы исследовали производительность моделей LSTM, BERT и GPT в контексте задачи классификации с четырьмя двоичными метками, задачи, которая расширяет границы классификации текста в области NLP. Благодаря тщательному исследованию, основанному на таких показателях, как потеря, точность, воспроизводимость и AUC в течение 20 эпох, мы обнаружили многогранный взгляд на динамику обучения каждой модели и ее способность к обобщению.

При оценке эффективности моделей NLP для классификации текста был проведен анализ данных, сравнивающий модели LSTM, BERT и GPT. Оценка основывалась на наборе показателей — потерях, точности, прецизионности, отзыве и AUC — в течение 20 периодов обучения, что давало полное представление о способности каждой модели к обучению и эффективности обобщения.

В целом несмотря на то, что структура BERT на основе трансформаторов доказала свою эффективность для поставленной задачи, обеспечивая превосходную производительность по всем оцениваемым показателям, остается еще большой потенциал в доработке LSTM для уменьшения переобучения и оптимизации GPT для задач классификации. Наши будущие усилия будут включать не только итеративные усовершенствования этих моделей, но и разработку передовых методов, таких как распознавание объектов в перекрестных предложениях, чтобы еще больше расширить границы возможностей классификации NLP.

References

Abibullayeva A., Çetin A. (2022) Keyword Extraction from Kazakh News Dataset with BERT. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 1193–1200, doi: 10.31202/ecjse.1131826 (in Eng.)

Bogdanchikov A., Ayazbayev D., Varlamis I. (2022) Classification of Scientific Documents in the Kazakh Language Using Deep Neural Networks and a Fusion of Images and Text. *Big Data and Cognitive Computing*. Vol. 6(4):123. <https://doi.org/10.3390/bdcc6040123> (in Eng.)

Bhowmik S., Sultana S., Sajid A.A. (2024) Robust multi-domain descriptive text classification

leveraging conventional and hybrid deep learning models. *Int. j. inf. tecnol.* 16, pp. 3219–3231. <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01559-2>

Ezen-Can A. (2020) A Comparison of LSTM and BERT for Small Corpus. *ArXiv, abs/2009.05451*. (<https://arxiv.labs.arxiv.org/html/2009.05451>) (in Eng.)

Garrido-Merchan E.C., Gozalo-Brizuela R., Gonzalez-Carvajal S. (2023). Comparing BERT Against Traditional Machine Learning Models in Text Classification. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, 2(4), 352-356. <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE3202838> (in Eng.)

Jamshidi S., Mohammadi M., Bagheri S., Najafabadi H. E., Rezvanian A., Gheisari M., Ghaderzadeh M., Shahabi A.S., Wu Z. (2024). Effective text classification using BERT, MTM LSTM, and DT. *Data Knowl. Eng.* 151. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102306> (in Eng.)

Li J., Tang T., Zhao W. X., Nie J.-Y., Wen J.-R. (2024). Pre-Trained Language Models for Text Generation: A Survey. *ACM Comput. Surv.* 56, 9, Article 230 (September 2024), 39 pages. <https://doi.org/10.1145/3649449> (in Eng.)

Minaee S., Kalchbrenner N., Cambria E., Nikzad N., Chenaghlu M., Gao J. (2022) Deep Learning-based Text Classification: A Comprehensive Review. *ACM Comput. Surv.* Vol. 54, 3, Article 62, 40 p. <https://doi.org/10.1145/3439726>

Myrzakhetov B., Kozhimbayev Z. (2018). Extended language modeling experiments for Kazakh. *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2303. <https://ceur-ws.org/Vol-2303/short2.pdf> (in Eng.)

Narejo K. Rani, Zan H., Oralbekova D., Parkash Dharmani K., Orken M., Mukhsina K. (2024) Enhancing Emoji-Based Sentiment Classification in Urdu Tweets: Fusion Strategies With Multilingual BERT and Emoji Embeddings. *IEEE Access*, vol. 12, pp. 126587-126600, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3446897 (in Eng.)

Oralbekova D., Mamyrbayev O., Zhumagulova S., Zhumazhan N. (2024). A Comparative Analysis of LSTM and BERT Models for Named Entity Recognition in Kazakh Language: A Multi-classification Approach. In: Agarwal, N., Sakalauska, L., Tukeyev, U. (eds) *Modeling and Simulation of Social-Behavioral Phenomena in Creative Societies. MSBC 2024. Communications in Computer and Information Science*, vol 2211. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72260-8_10 (in Eng.)

Oralbekova D., Mamyrbayev O., Othman M., Alimhan K., Zhumazhanov B., Nuranbayeva B. (2022). Development of CRF and CTC Based End-To-End Kazakh Speech Recognition System. In: Nguyen, N.T., Tran, T.K., Tukayev, U., Hong, TP., Trawiński, B., Szczerbicki, E. (eds) *Intelligent Information and Database Systems. ACIIDS 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13757, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21743-2_41 (in Eng.)

Pandey R., Waghela H., Rakshit S., Rangari A., Singh A., Kumar R., Ghosal R., Sen J. (2024). Generative AI-Based Text Generation Methods Using Pre-Trained GPT-2 Model. *ArXiv, abs/2404.01786* (in Eng.)

Reusens M., Stevens A., Tonglet J., Smedt J. D., Verbeke W., Broucke S., Baesens B. (2024). Evaluating text classification: A benchmark study. *Expert Syst. Appl.* 254, C (Nov 2024). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124302> (in Eng.)

Tikayat Ray A, Cole B., Pinon Fischer O., White R., Mavris D. (2023) *aeroBERT-Classifier: Classification of Aerospace Requirements Using BERT*. *Aerospace*. Vol. 10(3):279. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030279> (in Eng.)

Yeshpanov R., Khassanov Y., Varol H.A. (2022) *KazNERD: Kazakh Named Entity Recognition Dataset*. In *Proceedings of the Thirteenth Language Resources and Evaluation Conference*, pp. 417–426. <https://aclanthology.org/2022.lrec-1.44.pdf> (in Eng.)

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 259–269

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.338>

UDC 004.89

©A. Ospanov¹, A.J. Pedro², T. Turymbetov³, K. Dyussekeyev¹,
A. Zhumadillayeva¹, 2025.

¹L.N.Gumilyov Eurasian national university, Astana, Kazakhstan;

²Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain;

³International University of Tourism and Hospitality, Turkestan, Kazakhstan.

E-mail: zhumadillayeva_ak@enu.kz

ADVANCEMENTS IN ERP SYSTEMS THROUGH EMERGING TECHNOLOGIES, MACHINE LEARNING AND HYBRID OPTIMIZATION TECHNIQUES

Almas Ospanov – Doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian national university, Astana, Kazakhstan, ospanov_ad_4@enu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-3834-130X>;

Alonso-Jorda Pedro – PhD, Professor, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, palonso@upv.es, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6882-6592>;

Tursinbay Turymbetov – candidate of technical sciences, International University of Tourism and Hospitality, Turkestan, Kazakhstan, Turymbetov.t@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0178-8701>;

Kanagat Dyussekeyev – candidate of technical sciences, PhD, L.N.Gumilyov Eurasian national university, Astana, Kazakhstan, dyussekeyev_ka@enu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7691-2506>;

Ainur Zhumadillayeva – Candidate of technical sciences, Associate professor, L.N.Gumilyov Eurasian national university, Astana, Kazakhstan, zhumadillayeva_ak@enu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1042-0415>.

Abstract. Enterprise Resource Planning (ERP) systems have evolved into advanced business management platforms, integrating diverse organizational processes. The increasing need for real-time data processing and intelligent decision-making has led to the incorporation of machine learning (ML) and hybrid optimization into ERP systems, enabling greater efficiency, automation, and predictive capabilities. This paper systematically reviews the latest developments in ML-driven ERP solutions, analyzing over 70 scholarly articles. ML algorithms improve demand forecasting, inventory management, and resource allocation, while hybrid optimization effectively balances costs, operational efficiency, and resource distribution. The integration of ML with ERP significantly enhances supply chain operations, streamlining logistics, procurement, and warehouse management while reducing inefficiencies.

The role of ML-powered ERP in human resource management (HRM) is also explored, particularly its application in employee turnover prediction, recruitment optimization, and workforce planning. Additionally, ERP security and transparency are being enhanced through technologies such as federated learning and blockchain, ensuring secure and decentralized data management. Future research will focus on deep learning, cloud-based ERP, and big data analytics, which will further enhance predictive modeling, business intelligence, and operational automation. The incorporation of artificial intelligence (AI), IoT, and smart decision systems will allow enterprises to optimize workflows, reduce risks, and develop data-driven strategic frameworks, ensuring resilience and adaptability in highly dynamic business environments.

Key words: ERP systems, machine learning, hybrid optimization, big data, artificial intelligence, automation, predictive analytics.

**А. Оспанов¹, П. Алонсо-Жорда², Т. Тұрымбетов³, К. Дүйсекеев¹,
А. Жұмаділлаева¹, 2025.**

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

²Валенсия политехникалық университеті, Валенсия, Испания;

³Халықаралық Туризм және қонақжайлылық университеті,

Түркістан, Қазақстан.

E-mail: zhumadillayeva_ak@enu.kz

ERP ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ЖЕТІЛДІРІЛУІ: ЗАМАНАУИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР, МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ЖӘНЕ ГИБРИДТІ ОПТИМИЗАЦИЯ ӘДІСТЕРІ

Оспанов Алмас – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, ospanov_ad_4@enu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-3834-130X>;

Алонсо-Жорда Педро – PhD, профессор, Валенсия политехникалық университеті, Валенсия, Испания, palonso@upv.es, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6882-6592>;

Тұрымбетов Тұрсинбай – техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық Туризм және қонақжайлылық университеті, Түркістан, Қазақстан, Turymbetov.t@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0178-8701>;

Дүйсекеев Қанағат – техника ғылымдарының кандидаты, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, dyussekeyev_ka@enu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7691-2506>;

Жұмаділлаева Айнұр – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан, zhumadillayeva_ak@enu.kz; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1042-0415>.

Аннотация. Кәсіпорын ресурстарын жоспарлау (КРЖ) жүйелері әртүрлі ұйымдастырушылық процестерді біріктіріп отыратын бизнесті басқарудың

озық платформаларына айналды. Нақты уақыт режимінде деректерді өңдеуге және интеллектуалды шешімдер қабылдауға деген өсіп келе жатқан қажеттілік машиналық оқытуды (МО) енгізуге және КРЖ жүйелеріне гибриді оңтайландыруға алып келді, бұл тиімділікті, автоматтандыруды, сондай-ақ болжамдық мүмкіндіктерді арттырады. Бұл мақалада МО негізіндегі КРЖ-ға қатысты шешімдері саласындағы соңғы жетістіктер жүйелі түрде қаралып, 70-тен астам ғылыми мақала талданды. МО алгоритмдері сұранысты болжауды, инвентаризацияны басқаруды және ресурстарды бөлуді жақсартады, бұл ретте гибриді оңтайландыру шығындарды, операциялық тиімділікті және ресурстарды бөлуді тиімді теңестіріп отыр. МО-дың КРЖ-мен интеграциясы жеткізу тізбегінің операцияларын айтарлықтай жақсартады, логистиканы, сатып алуды оңтайландырады, сондай-ақ қоймаларды басқару және тиімсіздіктерді азайтады.

Сондай-ақ, кадрлық ресурстарды басқарудағы (КРБ) МО-дың рөлі, атап айтқанда, оның кадрлардың тұрақталуын болжауға, жұмысқа қабылдауды оңтайландыруға және жұмыс күшін жоспарлауға қолдануы қарастырылады. Бұдан басқа, КРЖ қауіпсіздігі мен ашықтығы деректерді қауіпсіз және орталықсыздандырылған басқаруға мүмкіндік беретін федералдық оқыту және блокчейн сияқты технологиялармен күшейтіледі. Болашақ зерттеулер терең оқытуға, бұлты КРЖ-ға, сондай-ақ үлкен деректер талдауына бағытталатын болады, бұл болжамды модельдеуді, бизнес-интеллекті, операцияларды автоматтандыруды одан әрі жақсартуға мүмкіндік береді. Жасанды интеллектті (ЖИ), интернет заттар (ИЗ) және интеллектуалды шешімдер қабылдау жүйелерін енгізу кәсіпорындарға жұмыс процестерін оңтайландыруға, тәуекелді төмендетуге және жоғары серпінді дамып келе жатқан бизнес ортада тұрақтылық пен тепе-теңдікті қамтамасыз ететін деректерге негізделген стратегиялық негіздерді дамытуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: КРЖ жүйелері, машиналық оқыту, гибриді оптимизация, үлкен деректер, жасанды интеллект, автоматтандыру, болжамдық аналитика.

**А. Оспанов¹, П. Алонсо-Жорда², Т. Турымбетов³, К. Дюсекеев¹,
А. Жумадиллаева¹, 2025.**

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан;

²Политехнический университет Валенсии, Валенсия, Испания;

³Международный университет туризма и гостеприимства, Туркестан, Казахстан.

E-mail: zhumadillayeva_ak@enu.kz

**ПРОДВИЖЕНИЕ ERP СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И
ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ**

Оспанов Алмас – докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: ospanov_ad_4@enu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-3834-130X>;

Алонсо-Жорда Педро – PhD, профессор, Политехнический университет Валенсии, Валенсия, Испания, E-mail: palonso@upv.es; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6882-6592>;

Турымбетов Турсинбай – кандидат технических наук, Международный университет туризма и гостеприимства, Туркестан, Казахстан, E-mail: Turymbetov.t@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0178-8701>;

Дюссекеев Канагат – кандидат технических наук, PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: dyussekeyev_ka@enu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7691-2506>;

Жумадиллаева Айнур – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан, E-mail: zhumadillayeva_ak@enu.kz, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1042-0415>.

Аннотация. Системы планирования ресурсов предприятия (СПР) превратились в передовые платформы управления бизнесом, объединяющие различные организационные процессы. Растущая потребность в обработке данных в режиме реального времени и принятии интеллектуальных решений привела к внедрению машинного обучения (МО) и гибридной оптимизации в СПР-системы, обеспечивая повышение эффективности, автоматизацию и возможности прогнозирования. В данной статье систематически рассматриваются последние достижения в области СПР-решений на основе МО, проанализировано более 70 научных статей. Алгоритмы МО улучшают прогнозирование спроса, управление запасами и распределение ресурсов, а гибридная оптимизация эффективно балансирует затраты, операционную эффективность и распределение ресурсов. Интеграция МО с СПР значительно улучшает работу цепочек поставок, оптимизируя логистику, закупки и управление складами и снижая неэффективность.

Также рассматривается роль СПР на базе МО в управлении человеческими ресурсами (УЧР), в частности ее применение для прогнозирования текучести кадров, оптимизации найма и планирования трудовых ресурсов. Кроме того, безопасность и прозрачность СПР повышаются благодаря таким технологиям, как федеративное обучение и блокчейн, обеспечивающим безопасное и децентрализованное управление данными. Будущие исследования будут сосредоточены на глубоком обучении, облачных СПР и аналитике больших данных, что позволит еще больше усовершенствовать предиктивное моделирование, бизнес-аналитику и автоматизацию операций.

Внедрение искусственного интеллекта (ИИ), интернета вещей (ИВ) и интеллектуальных систем принятия решений позволит предприятиям оптимизировать рабочие процессы, снизить риски и разработать стратегические основы, основанные на данных, обеспечивая устойчивость и адаптивность в высокодинамичной бизнес-среде.

Ключевые слова: СПР-системы, машинное обучение, гибридная оптимизация, большие данные, искусственный интеллект, автоматизация, прогнозная аналитика.

Introduction. ERP (Enterprise Resource Planning) systems have evolved from basic process integration tools into sophisticated platforms essential for managing complex business processes and data across finance, production, logistics, and human resources. This evolution reflects the increasing demands of modern industries for real-time data processing and enhanced decision-making capabilities. Recent advancements in machine learning (ML) and hybrid optimization represent a pivotal shift in ERP's capabilities, enabling more intricate operational efficiency, automation, and predictive analytics (Azevedo, et al., 2024). Traditional ERP systems were often limited by high implementation costs, lack of flexibility, and scalability issues, which hindered adoption. However, as industries adopt digital transformation strategies, ERP systems must now go beyond basic integration to support data-driven processes that align with strategic goals. For instance, hybrid optimization in ERP supply-chain management has shown promise in energy management applications, where fluctuating demand and external variables, such as energy prices and regulations, require adaptive optimization (Reddy, et al., 2024). The shift towards ML-integrated ERP represents a significant milestone in digital transformation, promising benefits in strategic planning and operational insights that support long-term objectives (Ebirim, et al., 2024).

Methods and materials. A comprehensive systematic literature review was conducted to explore current trends in ERP systems, focusing on advancements in ML and hybrid optimization. Seventy recent articles were selected using inclusion criteria based on relevance to ML and hybrid optimization in ERP systems. After an initial screening, fifteen articles were further reviewed to assess specific contributions to ERP technology, covering a diverse range of applications across industries. The literature review methodology involved filtering by keywords related to ERP, ML, and optimization techniques in databases like Scopus, IEEE Xplore, and Web of Science. Figure 1 below illustrates the article selection and filtering process, which ensured that the analysis included only the most relevant studies.

Machine learning (ML) and hybrid optimization in ERP systems

The introduction of Machine Learning (ML) and Hybrid Optimization techniques into ERP systems represents a critical milestone in this evolution, enabling more complex operational efficiency, automation, and real-time predictive analytics. As industries increasingly rely on data-driven processes, ERP systems must now offer capabilities that not only support basic functions but also enhance long-term strategic decision-making by offering predictive insights and automation at scale (Feng, et al., 2024).

The transition from traditional ERP systems, which primarily focused on process integration, to modern ERP systems that leverage AI and ML reflects the broader trend towards digital transformation. Its applications in supply-chain management where, in addition, hybrid optimization, is also gaining traction in energy management systems integrated into ERP platforms. This approach enables companies to optimize their energy consumption based on fluctuating demand and

external variables, such as energy prices and environmental regulations. In this context, ERP systems are increasingly being used not only for automating repetitive tasks, but also for providing analytical insights that drive strategic initiatives (Tuli, et al., 2022).

Traditional ERP platforms were limited by high costs, lack of flexibility, and challenges with scalability. The implementation of ERP systems encompass elevated failure rates, intricate deployment procedures, budgetary excesses, opposition to change, the necessity for proficient change management, difficulties associated with customization, integration complications, and insufficient user training. ML algorithms provide ERP systems with the ability to learn from historical data and make informed predictions about future outcomes. This capability has significantly enhanced various facets of ERP systems, including demand forecasting, inventory optimization, and maintenance scheduling (Feng, et al., 2024).

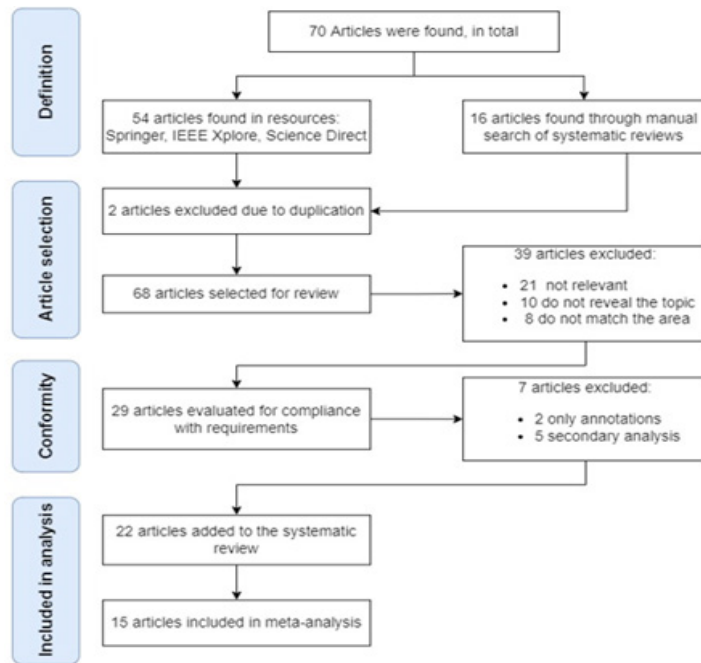


Figure 1. Method of systematic literature review.

ML algorithms enhance ERP systems by enabling predictive analytics, demand forecasting, inventory optimization, and maintenance scheduling, as well as optimizing resource management and strategic planning. In supply chain management, for example, ML-based models can adjust inventory levels in real time by analyzing seasonality, economic conditions, and historical sales trends. The observation that ML-enhanced ERP systems reduce lead times and improve inventory turnover rates, showcasing ML’s practical benefits for supply chains (Fadojutimi, et al., 2024). In human resource management, ML algorithms help

predict employee turnover, optimize hiring strategies, and align HR objectives with long-term organizational goals. Hybrid optimization, combining ML with traditional optimization methods, addresses complex multi-objective challenges within ERP systems by balancing trade-offs like cost, resource allocation, and operational efficiency. In addition, performed SWOT analysis of optimization algorithms that offers insights into how hybrid approaches effectively enhance ERP performance through the integration of predictive analytics with operational processes.

One of the primary applications of hybrid optimization is in supply-chain management, where businesses must constantly balance competing objectives—such as inventory management, cost control, and lead-time reduction. Also, an application of multi-objective optimization to ERP systems to streamline decision-making processes by integrating factors such as production costs, employee schedules, and resource allocations into a unified model (Feofanov, et al., 2020).

Industrial applications of ERP systems with ML and hybrid optimization techniques

The integration of ML into supply-chain management has revolutionized logistics and inventory management. By analyzing large datasets, ERP systems with ML capabilities can predict demand trends, optimize supply routes, and manage inventory more effectively (Gollangi, H.K., et al., 2024).

By automating demand forecasting and inventory replenishment, ML-based ERP systems help businesses minimize overstocking and stock-outs. Additionally, ML algorithms analyze external factors such as market trends, customer preferences, and historical data to ensure that the supply-chain is agile and responsive to changes in demand (Hammouch, et al., 2024).

ERP systems have also found significant applications in HRM. By utilizing ML models, businesses can predict employee performances, assess recruitment needs, and optimize workforce management (Zhao, 2024). It's been demonstrated that ML enabled ERP systems improve the alignment between human resource strategies and organizational objectives. This alignment ensures that staffing levels are optimized, based upon past data, to meet current and future needs of the enterprise (Jawad, et al., 2024).

Emerging technologies in ERP systems

In addition to its applications in supply-chain management, hybrid optimization is also gaining traction in energy management systems integrated into ERP platforms. This approach enables companies to optimize their energy consumption based on fluctuating demand and external variables, such as energy prices and environmental regulations. By employing hybrid optimization techniques, companies can reduce their operational costs while adhering to sustainability goals (Krishna et al., 2024).

Big data analytics enhances the capabilities of cloud ERP by enabling the analysis of massive datasets. This allows businesses to derive actionable insights from data and improve various areas of the business such as decision-making processes across various domains, including finance, supply-chain management and customer relationship management (Lu, 2020). The integration of AI into ERP systems is a

significant development that has enabled businesses to automate complex decision-making processes. AI-driven ERP systems can automate repetitive tasks and enhance predictive analytics. These cognitive ERP systems are capable of processing vast amounts of data in real time, providing recommendations for optimizing resources and improving operational efficiency (Hrishev, et al., 2023). The reviews highlight how hybrid ERP systems can benefit from integrating ML for real-time resource optimization. Hybrid optimization models which are combining deep-learning, genetic algorithms, and predictive analytics have proven effective in improving ERP scalability and decision-making (Kumar, 2024).

In overall, current emerging technologies in ERP systems could solve the challenges such as the complexity of integrating ML models and techniques into existing ERP systems and managing large-scale data more efficiently. Table 1 outlines current technologies applications and its benefits in summarized content.

Table 1. Comparative analysis of emerging technologies in ERP systems

#	Technology	Applications	Benefits
1	Cloud ERP	Data storage, real-time access	Scalability, accessibility, cost-effectiveness
2	Big data analytics	Predictive modeling, customer analytics	Deeper insights, improved decision-making, analytics
3	AI	Automation, predictive analytics	Automation of tasks, better resource management
4	Blockchain	Secure transactions, supply-chain tracking	Enhanced security, transparency, and traceability
5	IoT Integration	Real-time data processing	Improved operational efficiency, automation

Results and discussion.

Although the current advancements in ML and hybrid optimization in ERP systems offer substantial benefits, certain areas are still unexplored. One of the promising avenues for future research is the application of federated learning to enhance data privacy in ERP systems. By enabling decentralized ML models which allows businesses to process data locally while protecting sensitive information. Specially, it is vital if data has to be stored on-premises in local servers.

Integrating blockchain technology into ERP systems offers a secure and transparent way to track transactions and manage supply-chains. Blockchain’s immutable ledger could be used to enhance the security and traceability of transactions within ERP systems.

The integration of ML and hybrid optimization in ERP systems has enhanced decision-making and operational efficiency, although challenges remain in data privacy and scalability. Future research should focus on federated learning, which allows decentralized ML models to process data locally, addressing privacy concerns without sacrificing ERP performance. Federated learning is particularly promising for companies that store data on local servers and require high data privacy.

Additionally, blockchain technology could strengthen ERP systems’ security and transparency, particularly in transaction tracking and supply-chain management. Table 2 contrasts the areas already well-researched against those requiring further exploration to advance ERP system adaptability.

Table 2: Comparison of researched vs. Unexplored areas in ERP systems

Researched areas	Unexplored areas
ML for predictive maintenance in ERP systems structure	Integration of federated learning for data privacy in ERP systems
Hybrid optimization for supply-chain management in ERP systems	Block-chain integration for supply-chain functions traceability in ERP systems
AI-driven human resource management in ERP	Cognitive ERP systems for automated decision-making implementation
Cloud technology implementations for scalability and real-time access in ERP	AI-enhanced cybersecurity in ERP systems
Big data analytics in ERP systems for customer insights	Decentralized ERP models with block-chain integration in ERP systems
	Integration of gamification models in ERP systems
	Virtual Reality (VR) & Augmented Reality (AR) technologies implementation in ERP systems
	Enterprise Architecture (EA) integration with ERP Systems

As shown in the above table 2, further research could explore studies in the application of federated learning, block-chain integration, cognitive ERP systems, edge computing in hybrid ERP systems, gamification integration, VR / AR technologies integration into ERP Systems and TOGAF framework implementation along with ERP systems to address scalability, flexibility challenges and enhance ERP systems adaptability for current trends.

Conclusion. The literature demonstrates that ML and hybrid optimization methods are reshaping ERP systems by enhancing resource allocation and decision-making processes. Nevertheless, effective ML model implementation faces significant challenges, especially concerning data privacy and scalability. As ERP systems continue to evolve, integrating emerging technologies like AI and blockchain is anticipated to play a crucial role in developing resilient, adaptable, and secure enterprise management solutions.

The amalgamation of ML and hybrid optimization methodologies into ERP systems has fundamentally transformed the manner in which organizations administer their operational workflows. These advanced technologies furnish sophisticated capabilities for predictive analytics, instantaneous decision-making, and enhanced operational efficiency. Their utilization is particularly pivotal in industries such as manufacturing, supply chain management, and human resource management, where they have empowered enterprises to optimize performance metrics and foster sustainable growth trajectories.

As ERP systems perpetuate their advancement, the incorporation of nascent technologies such as artificial intelligence (AI), cloud computing, gamification,

augmented reality (AR) and virtual reality (VR), enterprise architecture (EA), and blockchain will assume a vital position in molding the future landscape of enterprise management solutions. Subsequent research endeavors should concentrate on investigating how these innovative technologies can be harnessed to surmount existing obstacles and to engender more resilient, scalable, adaptable, and secure ERP frameworks.

Consequently, forthcoming studies could catalyze the progression of these models, scrutinizing their scalability and exploring the potential of sophisticated AI methodologies to enhance the adaptability and efficiency of ERP systems. In conclusion, the primary challenges associated with ERP implementation encompass elevated failure rates, intricate deployment procedures, budgetary excesses, resistance to organizational change, the imperative for effective change management, hurdles in customization, integration complexities, and inadequate user training. Addressing these impediments is imperative for organizations to successfully deploy ERP systems and attain the anticipated levels of operational efficiency and productivity.

References

Azevedo, B.F., Rocha, A.M.A.C., Pereira, A.I. Hybrid Approaches to Optimization and Machine Learning Methods: A Systematic Literature Review. *Machine Learning*. 2024. Vol. 113. P. 4055-4097. (in Eng.)

Ebirim G.U., et al. A Critical Review of ERP Systems Implementation in Multinational Corporations: Trends, Challenges, and Future Directions. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*. 2024. Vol. 6. No. 2. P. 281-295. (in Eng.)

Fadojutimi B., et al. Future-Proofing Supply-chains: Leveraging ERP Platforms for Advanced Automation and Interoperability. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2024. Vol. 6 No. 9. P. 1241-1261. (in Eng.)

Feng, C., Ali, D.A. Improving the Organizational Efficiency of Manufacturing Enterprises: The Role of Digital Transformation, ERP and Business Practices. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. 2024. Vol. 18. No. 2. P. 1-25. (in Eng.)

Feofanov A., Baranov N. Multiobjective Optimization in ERP System Design // *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 329. P. 2020032903042. (in Eng.)

Gollangi H.K., et al. Data Engineering Solutions: The Impact of AI and ML on ERP Systems and Supply-chain Management. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20. No. S9. P. 646-648. (in Eng.)

Hammouch H. Enhancing Management Control through ERP Systems: A Comprehensive Literature Review. *iRASD Journal of Management*. 2024. Vol. 6. No. 3. P. 125-133. (in Eng.)

Hrishev R., Shakev N. Artificial Intelligence in Enterprise Resource Planning Systems. *LX*. 2023. Vol. 1. (in Eng.)

Jawad Z.N., Balázs V. Machine Learning-Driven Optimization of Enterprise Resource Planning (ERP) Systems: A Comprehensive Review. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. 2024. Vol. 13. No. 4. (in Eng.)

Krishna H., Rikkula R. The Future of ERP Integrations – A look at Emerging Technologies. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2024. Vol. 11 No. 7. P. 539-545. (in Eng.)

Kumar G. The Future of Enterprise Resource Planning (ERP): Harnessing Artificial Intelligence. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2024. Vol. 10. No. 4. P. 94-99. (in Eng.)

Lu S. Research on ERP Software Course Optimization Based on Big Data Technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1648. No. 4. P. 042049. (in Eng.)

Reddy V.J., Hajarath K.C. Designing a Cognitive Supply-chain Platform Using Sap ERP Solution for Smart Decision Support. *International Journal of Supply-chain Management*. 2024. Vol. 9. No. 3. P. 12-23. (in Eng.)

Tuli F.A., Kaluvakuri S. Implementation of ERP Systems in Organizational Settings: Enhancing Operational Efficiency and Productivity. *Asian Business Review*. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 89-96. (in Eng.)

Zhao Y. Development of Big Data Assisted Effective Enterprise Resource Planning Framework for Smart Human Resource Management. *PloS One*. 2024. Vol. 19. No. 5. P. e0303297. (in Eng.)

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.339>

УДК: 004.4

**K. Rabbany¹, A. Bekarystankyzy¹, A. Shoiynbek¹, D. Kuanyshbay²,
A. Mukhametzhano², 2025.**

¹Narxoz University, Almaty, Kazakhstan;

²Suleyman Demirel University, Kaskelen, Kazakhstan.

E-mail: kazi_golam.rabbany@narxoz.kz

DETECTION OF SUICIDAL TENDENCIES IN REDDIT POSTS USING MACHINE LEARNING

Kazi Golam Rabbany – Narxoz University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: kazi_golam.rabbany@narxoz.kz, <https://orcid.org/0009-0007-4549-0815>;

Bekarystankyzy Akbayan – senior lecturer, PhD in Computer Science, Narxoz University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: akbayan.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3984-2718>;

Shoiynbek Aisultan – professor, PhD in Computer Science, Narxoz University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: aisultan.shoiynbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9328-8300>;

Kuanyshbay Darkhan – professor, PhD in Computer Science, Suleyman Demirel University, Kaskelen, Kazakhstan, E-mail: darkhan.kuanyshbay@sdu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5952-8609>;

Mukhametzhano Assylbek – Suleyman Demirel University, Kaskelen, Kazakhstan, E-mail: 221107046@stu.sdu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-8528-9985>.

Abstract: Suicide remains a critical public health concern worldwide, with many cases preceded by identifiable warning signs. Social media platforms, particularly Reddit, serve as valuable resources for detecting suicidal ideation through user-generated text. This study proposes a machine learning model utilizing Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) networks with an attention mechanism to automate the detection of suicidal tendencies in Reddit posts.

A dataset comprising posts from the “SuicideWatch” and “depression” subreddits was collected via the Pushshift API and labeled as either suicide-related or non-suicidal. The preprocessing pipeline included case folding, HTML tag stripping, tokenization, stopword removal, and sequence padding. The dataset was balanced to ensure an equal distribution of suicide and non-suicide posts and was split into training (60%), validation (20%), and test (20%) sets.

The model architecture integrated an embedding layer, BiLSTM units, an attention mechanism, and fully connected layers. Training was conducted using the Adam optimizer and binary cross-entropy loss, with early stopping applied. Evaluation metrics indicated strong model performance, achieving an F1 score of

0.91 on the validation set and 0.95 on the test set, with an AUC-ROC of 0.98 and 0.989, respectively.

The findings demonstrate the effectiveness of BiLSTM with attention for suicidal ideation detection, outperforming many existing models. Early detection of suicidal tendencies in online communications can significantly improve mental health outcomes and save lives.

Key words: machine learning, natural language processing, bidirectional LSTM, attention mechanism, suicidal ideation detection

Funding. *This research has been/was/is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP22786670).*

**К. Раббани¹, А. Бекарыстанқызы¹, Д. Қуанышбай², А. Шойынбек¹,
А. Мұхаметжанов², 2025.**

¹«Нархоз» Университеті, Алматы, Қазақстан;

²Сулейман Демирель атындағы Университеті, Қаскелең, Қазақстан.

E-mail: kazi_golam.rabbany@narхоз.kz

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫ ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ REDDIT ПОСТТАРЫНДАҒЫ СУИЦИДТІК ТЕНДЕНЦИЯЛАРЫН АНЫҚТАУ

Казиголам Раббани – «Нархоз» Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: kazi_golam.rabbany@narхоз.kz, <https://orcid.org/0009-0007-4549-0815>;

Бекарыстанқызы Ақбаян – аға оқытушы, «Нархоз» Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: akbayan.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3984-2718>;

Шойынбек Айсұлтан – профессор, «Нархоз» Университеті, Алматы, Қазақстан, E-mail: aisultan.shoynbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9328-8300>;

Қуанышбай Дархан – профессор, Сулейман Демирель атындағы Университеті, Қаскелең, Қазақстан, E-mail: darkhan.kuanyshbay@sdu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5952-8609>;

Мұхаметжанов Асылбек – Сулейман Демирель атындағы Университеті, Қаскелең, Қазақстан, E-mail: 221107046@stu.sdu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-8528-9985>.

Аннотация: Суицид бүкіл әлемде маңызды қоғамдық денсаулық мәселесі болып қала беруде және көптеген жағдайлар алдын ала анықталатын ескерту белгілерімен жүреді. Әлеуметтік медиа платформалары, әсіресе Reddit, пайдаланушылар жазған мәтіндер арқылы суицидтік ойларды анықтаудың құнды ресурсы болып табылады. Бұл зерттеу Reddit жазбаларында суицидтік бейімділікті автоматты түрде анықтау үшін назар механизмі бар екібағытты ұзақ қысқа мерзімді жады (BiLSTM) желілерін пайдаланатын машиналық оқыту моделін ұсынады.

«SuicideWatch» және «depression» субреддиттерінен алынған жазбалардан тұратын деректер жиынтығы Pushshift API арқылы жиналып, суицидпен байланысты немесе байланысты емес деп таңбаланды. Алдын ала өңдеу кезеңі мәтінді кіші әріпке ауыстыру, HTML тегтерін жою, токенизация, мағыналық

жүк көтермейтін сөздерді алып тастау және тізбектерді толықтыру сияқты қадамдарды қамтыды. Деректер жиынтығы теңестіріліп, суицидтік және суицидтік емес жазбалар тең пропорцияда сақталды және олар оқу (60%), валидация (20%) және тестілеу (20%) жиынтықтарына бөлінді.

Модель архитектурасы ендіру (embedding) қабатын, BiLSTM блоктарын, назар механизмін және толық байланысқан қабаттарды қамтиды. Оқыту процесі Adam оптимизаторы мен бинарлық кроссэнтропиялық шығын функциясын қолдана отырып жүргізілді, ерте тоқтату әдісі қолданылды. Бағалау метрикалары модельдің жоғары өнімділігін көрсетті: валидация жиынтығында F1 көрсеткіші 0.91, тест жиынтығында 0.95, ал AUC-ROC сәйкесінше 0.98 және 0.989 мәндерін көрсетті.

Зерттеу нәтижелері назар механизмі бар BiLSTM-нің суицидтік ойларды анықтаудағы тиімділігін дәлелдеді және көптеген қолданыстағы модельдерден асып түсті. Интернеттегі коммуникацияларда суицидтік бейімділікті ерте анықтау психикалық денсаулық көрсеткіштерін едәуір жақсартып, адамдардың өмірін сақтап қалуға көмектесе алады.

Түйін сөздер: машиналық оқыту, табиғи тілді өңдеу, екі бағытты LSTM, назар аудару механизмі, суицидті анықтау.

**К. Раббани¹, А. Бекарыстанқызы¹, Д. Куанышбай², А. Шойынбек¹,
А. Мухаметжанов², 2025.**

¹Университет «Нархоз», Алматы, Қазақстан;

²Университет имени Сулеймана Демиреля, Каскелен, Қазақстан.

E-mail: kazi_golam.rabbany@narhoz.kz

ОБНАРУЖЕНИЕ СУИЦИДАЛЬНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В ПУБЛИКАЦИЯХ НА REDDIT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Кази Голам Раббани – Университет «Нархоз», Алматы, Қазақстан, E-mail: kazi_golam.rabbany@narhoz.kz, <https://orcid.org/0009-0007-4549-0815>;

Бекарыстанқызы Акбаян – старший преподаватель, Университет «Нархоз», Алматы, Қазақстан, E-mail: akbayan.b@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3984-2718>;

Шойынбек Айсултан – профессор, Университет «Нархоз», Алматы, Қазақстан, E-mail: aisultan.shoynbek@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9328-8300>;

Куанышбай Дархан – профессор, Университет имени Сулеймана Демиреля, Каскелен, Қазақстан, E-mail: darkhan.kuanyshbay@sdu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5952-8609>;

Мухаметжанов Асылбек – Университет имени Сулеймана Демиреля, Каскелен, Қазақстан, E-mail: 221107046@stu.sdu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0009-8528-9985>.

Аннотация. Суицид остается серьезной проблемой общественного здравоохранения во всем мире, причем во многих случаях ему предшествуют идентифицируемые предупредительные сигналы. Социальные медиа-платформы, в частности Reddit, являются ценным ресурсом для выявления суицидальных мыслей на основе пользовательских текстов. В данном

исследовании предлагается модель машинного обучения, использующая двунаправленные сети долгой краткосрочной памяти (BiLSTM) с механизмом внимания для автоматического обнаружения суицидальных наклонностей в сообщениях Reddit.

Был собран набор данных, включающий публикации из субреддитов «SuicideWatch» и «depression», с использованием Pushshift API. Сообщения были помечены как связанные с самоубийством или не относящиеся к нему. Предварительная обработка включала приведение к нижнему регистру, удаление HTML-тегов, токенизацию, удаление стоп-слов и дополнение последовательностей. Данные были сбалансированы таким образом, чтобы в них было равное количество суицидальных и несуйцидальных сообщений, после чего они были разделены на обучающую (60%), валидационную (20%) и тестовую (20%) выборки.

Архитектура модели включала слой встраивания (embedding), BiLSTM-ячейки, механизм внимания и полностью связанные слои. Обучение проводилось с использованием оптимизатора Adam и бинарной кроссэнтропийной функции потерь с применением механизма ранней остановки. Метрики оценки показали высокую эффективность модели: F1-оценка составила 0.91 на валидационном наборе и 0.95 на тестовом наборе, а AUC-ROC достиг значений 0.98 и 0.989 соответственно.

Результаты исследования демонстрируют эффективность использования BiLSTM с механизмом внимания для выявления суицидальных мыслей, превосходя многие существующие модели. Ранняя идентификация суицидальных наклонностей в онлайн-коммуникациях может значительно улучшить психическое здоровье и спасти жизни.

Ключевые слова: машинное обучение, обработка естественного языка, двунаправленный LSTM, механизм внимания, распознавание суицида.

Introduction. Suicide remains one of the leading causes of death globally and is a significant public health challenge. Suicidal ideation, within the framework of social media, refers to thoughts about ending one's life, encompassing a spectrum that ranges from passive reflections to active planning (Su, 2020). The global burden of suicide is particularly concerning given that many instances of suicidal behavior are preceded by warning signs that could be detected and addressed on time.

Social media platforms like Reddit serve as powerful tools for individuals to share their personal experiences, struggles, and emotions. These platforms offer a unique opportunity for real-time monitoring of mental health conditions, including suicidal ideation. Users often disclose sensitive information in online communities, making social media a fertile ground for identifying individuals at risk. Early detection of suicidal tendencies can facilitate timely interventions, potentially saving lives.

Reddit, in particular, hosts numerous subreddits dedicated to mental health discussions, such as "SuicideWatch" and "depression." These communities provide a space for individuals to seek support and share their experiences. By analyzing

the content of these posts, researchers can identify patterns and linguistic markers associated with suicidal ideation. This approach not only aids in the development of automated detection systems but also enhances the capacity of mental health professionals to respond effectively.

This research aims to develop a robust machine learning model capable of accurately detecting Reddit posts that indicate a serious risk of suicide. By leveraging Bidirectional Long-Short-Term Memory (BiLSTM) networks and attention mechanisms, we seek to enhance the accuracy and reliability of detection systems and automate the detection of suicidal tendencies in online posts.

Related Work. The utilization of social media data for mental health monitoring has gained considerable attention in recent years. Studies have primarily focused on platforms like Twitter and Reddit to predict suicidal ideation and related mental health issues.

One notable study by (Sakib, et al., 2021) analyzed suicidal tweets using ensemble classifiers, achieving an F1 score of 0.90. However, the study also highlighted challenges in verifying the accuracy and effectiveness of such models due to limitations in publicly available datasets, raising concerns about the reliability of social media data for predictive analysis. In a similar vein, researchers conducted a comprehensive study (Satya, et al., 2022) which examined various machine learning approaches for identifying suicidal tendencies on social media platforms such as Facebook, Twitter, and Reddit. They utilized various ML models using features, like TF-IDF and N-gram level TF-IDF, and LSTM. However they didn't calculate important metrics like F1 and AUC-ROC.

Expanding on the challenges of dataset reliability, researchers (Fodeh, et al., 2019) proposed a comprehensive machine learning framework aimed at identifying suicide risk factors on Twitter. The study utilized 12,066 public tweets from 3,873 users, categorizing them into "HighRisk" or "AtRisk" labels based on the usage of suicidal ideation terms and used algorithms such as Decision Trees and K-means Clustering. Notably, the topic discovery approach successfully identified seven out of twelve proposed suicide risk factors. The Decision Tree classification model achieved a precision of 0.844, sensitivity of 0.912, and specificity of 0.829 in distinguishing between "HighRisk" and "AtRisk" users (Fodeh, et al., 2019).

Addressing the issue of dataset size and quality, researchers (Liu, et al., 2022) developed a framework for annotating a mental-health-related textual dataset from Reddit. The focus was on identifying posts and comments that indicated suicide attempts and ideations. Various classifiers achieved commendable performance, with the Suicide Ideation classification reaching an accuracy of 0.86, sensitivity of 0.93, and specificity of 0.77, while Suicide Attempt classification achieved an accuracy of 0.87, sensitivity of 0.68, and specificity of 0.91. Despite the promising results, the relatively small dataset size poses challenges for developing highly effective machine learning models. Additionally, the reliance on expert input for annotating ambiguous samples introduces potential subjective biases, necessitating careful evaluation of its impact on model performance (Liu, et al., 2022).

Another study (Lin, et al., 2024) proposed a RoBERTa-CNN model, achieving 98% accuracy on the Suicide and Depression Detection dataset, emphasizing the critical role of data quality in model training. Reddit communities like r/depression were analyzed for depression and suicide signals, achieving F1 score of 77%. Another study (Oliveira, et al., 2022) explored model interpretability using ELI5, revealing the influence of terms like “suicide” and “sadness” on predictions.

Researchers (Squires, et al., 2024) introduced a semi-supervised deep label smoothing method to improve classification accuracy in suicide risk detection, achieving 52% accuracy on the Reddit C-SSRS dataset, with lower precision than accuracy.

A recent study introduced a hybrid text representation approach designed for explainable suicide risk identification on social media (Naseem, et al., 2024). In this work, they proposed a hybrid text representation approach, achieving an F1 score of 0.79 on a public suicide dataset.

Additionally, another research explored the use of machine learning and natural language processing for depression and suicide analysis (Jain, et al., 2022). In this study, researchers applied ML and NLP techniques to predict posts indicative of depression, specifically analyzing data from Reddit. Their work identified that communities such as r/depression and r/SuicideWatch are pivotal in tracking depressive and suicidal ideation signals. The researchers achieved F1 scores of around 77%. Another study (Yao, et al., 2020) focused on opioid users, achieving an F1 score of 96.6% using CNN to detect suicidality, highlighting the effectiveness of neural networks in specific subgroups.

Another study (Ao, et al., 2021) trained various models, including LSTM, GRU, bidirectional LSTM and GRU, logistic classifier, SVM, XGBoost, and LGBM on a dataset of 232,074 Reddit posts labeled as suicide or non-suicide. Their results demonstrated that one-way LSTM achieved the highest accuracy rate, however lacking F1 and AUC-ROC scores. In a related study (Mirtaheri, et al., 2024), the researchers proposed an ensemble LSTM-TCN model with a self-attention mechanism for detecting suicidal ideation on Twitter and Reddit. Their model, AL-BTCN, achieved 95% F1-score on Reddit dataset of 200,000 posts.

These investigations—ranging from ensemble methods on Twitter posts, to active learning frameworks on Reddit data, and interpretability studies—demonstrate the broad scope of current research in suicidal ideation detection. Given the proven efficacy of LSTM models in capturing temporal dependencies in text data, as highlighted in prior studies, we opted for a Bidirectional LSTM with attention mechanism. Despite methodological differences, all underscore the immense potential and complexity of applying NLP and ML/DL models to user-generated text.

Methodology

Dataset Description. The dataset is a collection of posts from the “SuicideWatch” and “depression” subreddits of the Reddit platform. The posts are collected using Pushshift API. All posts that were made to “SuicideWatch” from Dec 16, 2008 (creation) till Jan 2, 2021, were collected while “depression” posts were collected

from Jan 1, 2009, to Jan 2, 2021. All posts collected from SuicideWatch are labeled as suicide, while posts collected from the depression subreddit are labeled as depression. Non-suicide posts are collected from r/teenagers. It has suicide & non-suicide labels.

Data Preprocessing. Before preprocessing, we checked the class distribution, which was balanced at 50% for suicide and 50% for non-suicidal classes. This ensured that our dataset did not suffer from class imbalance issues.

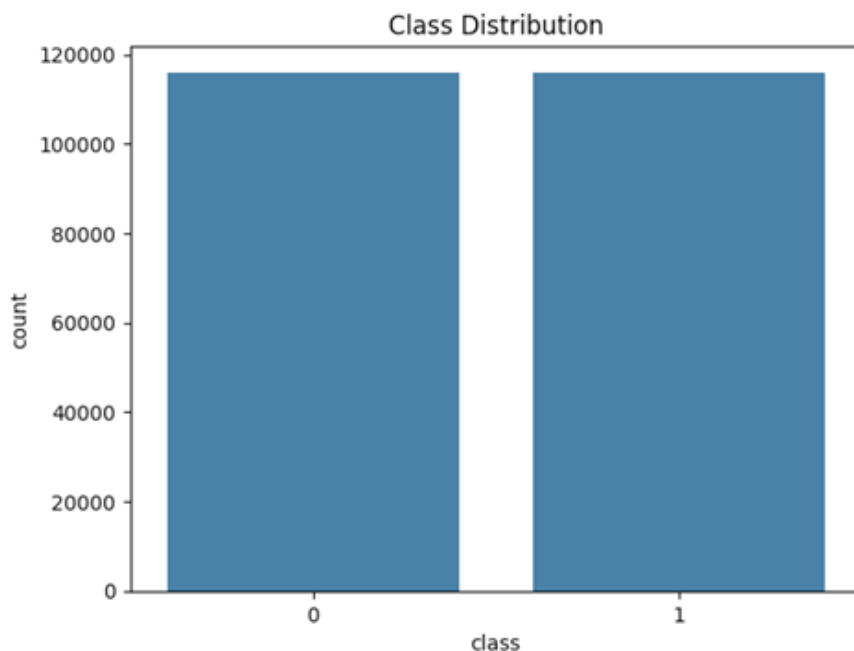


Figure 1. Class distribution

Effective preprocessing is crucial for enhancing the quality of textual data and improving model performance. The preprocessing pipeline implemented in this study included the following steps:

1. Case Folding: All text was converted to lowercase to ensure consistency and reduce variability due to casing differences.

2. HTML Tag Stripping: HTML tags, including iframes and scripts, were removed using BeautifulSoup’s `strip_html_tags()` function to eliminate irrelevant markup content.

3. Accent Removal: Accented characters were normalized to their ASCII equivalents using the `remove_accented_chars()` function, facilitating uniform text representation.

4. Contraction Expansion: Common contractions were expanded (e.g., “you’re” to “you are”) using the `contractions.fix()` method to maintain consistency in word forms.

5. **Special Character Removal:** Special characters and excess whitespace were removed using regular expressions and the `doc.translate()` method, simplifying the text.

6. **Tokenization:** Text was tokenized into individual words using NLTK's `word_tokenize()`, enabling granular analysis of word usage.

7. **Stopwords Removal:** Common stopwords were filtered out using the `stopwords_removal()` function based on NLTK's stopwords list, reducing noise in the data.

8. **Normalization:** Extra whitespace was trimmed, and leading/trailing spaces were removed to standardize text formatting.

The final normalized posts were recombined into strings and stored as preprocessed text. This preprocessing pipeline ensured that only the most relevant linguistic features were retained, improving the quality of input data for the models.

After preprocessing, the dataset was split into training, validation, and test sets as follows:

The final distribution of samples was:

- Train Samples: 139,244 (60%)
- Validation Samples: 46,415 (20%)
- Test Samples: 46,415 (20%)

These splits ensured a balanced and representative dataset for training, validating, and testing the models.

Tokenization and Vocabulary Building:

Following data splitting, tokenization was performed using Keras' `Tokenizer`. This step transformed textual data into numerical sequences suitable for model ingestion:

- **Tokenizer Configuration:** The `Tokenizer` was instantiated with an out-of-vocabulary token (`<UNK>`) to handle words not present in the training vocabulary.

- **Vocabulary Construction:** The tokenizer was fitted on the validation set (`X_val`), building a vocabulary of 81,536 unique words derived from 46,415 validation documents.

- **Sequence Padding:** All sequences were padded to a maximum length of 150 words using `Keras' pad_sequences()`, ensuring uniform input lengths across all samples.

This tokenization process facilitated the conversion of textual data into a format amenable to deep learning models, capturing the essential linguistic features while maintaining computational efficiency.

Padding and Label Encoding:

After tokenization, the sequences were padded to ensure consistent input lengths:

- **Padding Sequences:** We set a maximum sequence length of 150 words to capture the most significant parts of each post while maintaining manageable input size. Padding was applied to make all sequences uniform in length.

- **Label Encoding:** The target labels were encoded into numeric form using `'LabelEncoder'`:

This process ensures that the labels are represented as integers (e.g., 0 and 1), which is required for classification models.

Model Development. The model architecture used for this research is a deep learning model that leverages LSTM and attention mechanisms to capture the temporal dependencies and emphasize key features in the text data:

Model Architecture:

1. **Embedding Layer:** Transforms input sequences of tokens into dense vector representations. Embedding dimension set to 300, capturing rich semantic information from the 81,536-word vocabulary.

2. **Bidirectional LSTM Layer:** LSTM units set to 32, allowing the model to learn complex temporal dependencies.

3. **Attention Mechanism:** Custom attention layer integrated with the BiLSTM outputs.

4. **Dense Layers:**

- **First Dense Layer:** 64 units with ReLU activation, facilitating learning of deeper representations.

- **Dropout Layer:** Applied with a dropout rate of 0.5 to mitigate overfitting.

- **Second Dense Layer:** 32 units with ReLU activation, further refining feature representations.

5. **Output Layer:** Produces a probability score indicating the likelihood of suicidal tendencies. Single neuron with sigmoid activation, outputting values between 0 and 1.

Attention Layer. The attention layer was employed to help the model focus on the most important parts of each post. By learning to assign different importance weights to different words in the sequence, the attention mechanism allows the model to focus on the most relevant parts of the input. This layer essentially helps to emphasize the key parts of each Reddit post that are relevant to the prediction task.

Key Features of the Attention Mechanism:

1. **Dynamic Weighting:** Unlike static attention mechanisms, this implementation allows the model to learn the importance of each word in the context of the entire sequence during training.

2. **Masking Support:** The layer can handle masked inputs, ensuring that padding tokens do not influence the attention weights, which is crucial for processing sequences of varying lengths.

3. **Trainable Parameters:** The weight vector W and optional bias b are trainable, enabling the model to adapt the attention scores based on the data during the learning process.

4. **Non-linearity:** The use of the tanh activation introduces non-linearity, allowing the model to capture more complex relationships between words in the sequence.

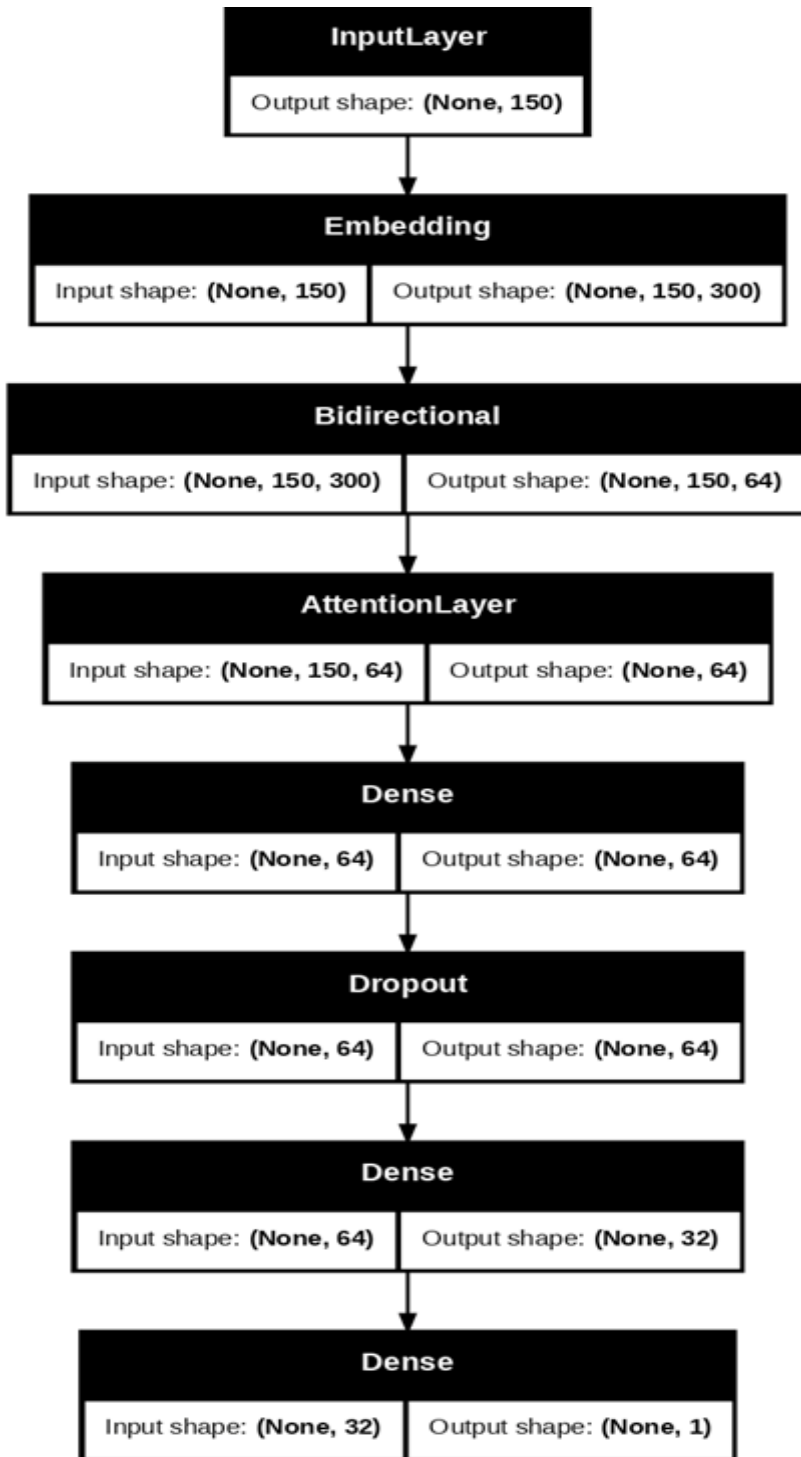


Figure 2. Model structure

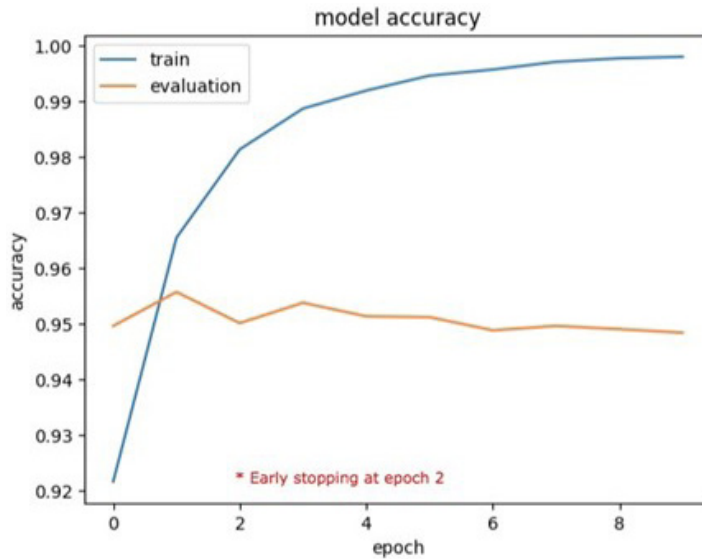


Figure 3. Model accuracy

Training Configuration:

- Loss Function: Binary Cross-Entropy, suitable for binary classification tasks.
 - Optimizer: Adam optimizer with a learning rate of 0.001, balancing convergence speed and stability.
 - Batch Size: 128 samples per batch, facilitating efficient training without overloading computational resources.
 - Epochs: 10, with early stopping based on validation loss to prevent overfitting.
- The best model was saved at epoch 2 based on the highest accuracy on the evaluation set.

Results. The models were rigorously evaluated using a variety of metrics to assess their performance in detecting suicidal ideation in Reddit posts. The evaluation was conducted on both the validation and test sets to ensure the results' robustness and generalizability. Below are the detailed results for both sets:

Table 2. Long Short-Term Memory (LSTM) Model

Metric	Validation set	Test set
Precision	0.92	0.95
Recall	0.92	0.95
F1 Score	0.91	0.95
AUC-ROC	0.928	0.989

The model achieved an F1 score of 0.91 on the validation set and 0.95 on the test set, reflecting a high degree of accuracy and reliability in detecting suicidal ideation. AUC-ROC provides a measure of the model's ability to distinguish between classes. An AUC-ROC value of 0.98 on the validation set and 0.989 on

the test set indicates that the model has excellent discriminative power, with a near-perfect ability to differentiate between suicidal and non-suicidal posts.

Discussion. Our study demonstrates that integrating a BiLSTM with an attention mechanism is an effective strategy for detecting suicidal ideation in posts from Reddit. Compared to prior research, our model achieved an F1 score that is comparable to or even exceeds previously reported results. In addition, our system's AUC-ROC performance stands out—a key performance indicator that several earlier studies did not consistently include.

Data quality and availability remain crucial. Although our dataset was balanced—50% suicidal posts and 50% non-suicidal posts—this is often not the case in many real-world situations. Researchers frequently rely on balancing techniques, such as oversampling minority classes or undersampling majority classes, which can introduce biases in model performance.

Variations in user-generated text across different platforms introduce additional complexities. Each social media site has its own communication style, vocabulary, and community norms. Twitter users may express ideas in short bursts of text limited by character counts, whereas Reddit posts often contain longer, more detailed narratives.

Conclusion. The high AUC-ROC score achieved by our model underscores its robust discriminative capability, and when considered alongside the strong F1 score, it demonstrates that the combination of BiLSTM and attention mechanisms yields high precision and recall. These outcomes affirm the promise of our approach as a valuable tool for the early detection of suicidal ideation in social media.

For future work, efforts should focus on developing a generic model capable of handling data from multiple social media platforms such as Reddit, Twitter, and others. Leveraging large language models (LLMs) or other methods for deep contextual understanding could enable the creation of a unified system that accommodates the diverse communication styles, vocabulary, and narrative lengths across different platforms. This advancement will enhance the model's generalizability and real-world applicability to improve early detection capabilities for suicidal ideation in a broader online context.

References

Su C., et al. (2020) Machine learning for suicide risk prediction in children and adolescents with electronic health records. *Translational Psychiatry*. doi: 10.1038/s41398-020-01100-0. (in English)

T.H. Sakib, Md. Ishak, F.F. Jhumu, and Md. A. Ali (2021) Analysis of Suicidal Tweets from Twitter Using Ensemble Machine Learning Methods. *International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)*, IEEE, Jul. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/ACMI53878.2021.9528252. (in English)

Satya S.S., & Jindal, R. (2022) Social Media Mining For Suicidal Ideation. *4th International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)*, 1466-1471. (in English)

Fodeh, et al. (2019) Using Machine Learning Algorithms to Detect Suicide Risk Factors on Twitter. *International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, IEEE, Nov. 2019, pp. 941–948. doi: 10.1109/ICDMW.2019.00137. (in English)

T. Liu, Z. Zheng, Y. Zhou, Y. Yang, and Y. Song (2022) Enriching an online suicidal dataset with active machine learning. Proceedings of the ACM Southeast Conference, New York, NY, USA: ACM, Apr. 2022, pp. 196–200. doi: 10.1145/3476883.3520213. (in English)

Lin E., Sun J., Chen H., & Mahoor M.H. (2024) Data Quality Matters: Suicide Intention Detection on Social Media Posts Using RoBERTa-CNN. 46th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 1-5. (in English)

A.C. de Oliveira, E.J.S. Diniz, S. Teixeira, and A.S. Teles (2022) How can machine learning identify suicidal ideation from user's texts? Towards the explanation of the Boamente system. Procedia Comput Sci, vol. 206, pp. 141–150. doi: 10.1016/j.procs.2022.09.093. (in English)

Squires M., Tao X., Elangovan S., Acharya R., Gururajan R., Xie H., & Zhou X. (2024) Enhancing Suicide Risk Detection on Social Media through Semi-Supervised Deep Label Smoothing. ArXiv, abs/2405.05795. (in English)

Naseem U., Khushi M., Kim J., & Dunn A.G. (2024) Hybrid Text Representation for Explainable Suicide Risk Identification on Social Media. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 11, 4663-4672. (in English)

Jain P., Ram Srinivas K., & Vichare A. (2022) Depression and Suicide Analysis Using Machine Learning and NLP. Journal of Physics: Conference Series, 2161. (in English)

Yao H., Rashidian S., Dong X., Duanmu H., Rosenthal R.N., & Wang F. (2020) Detection of Suicidality Among Opioid Users on Reddit: Machine Learning–Based Approach. Journal of Medical Internet Research, 22. (in English)

Ao Z., Lai J., Lu W., & Mo H. (2021) Comparisons of LSTM and other Machine Learning Approaches on Predicting Suicidal Tendency Regarding to Social Media Posts. International Conference on Computers and Automation (CompAuto), 19-23. (in English)

Mirtaheri S.L., Greco S., & Shahbazian R. (2024) A self-attention TCN-based model for suicidal ideation detection from social media posts. Expert Syst. Appl., 255, 124855. (in English)

NEWS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 1. Number 353 (2025). 283–296

<https://doi.org/10.32014/2025.2518-1726.340>

UDC 721.001

A. Taukenova^{1,2}, 2025.

¹S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan;

²Henan Agricultural University, Zhengzhou, China.

*E-mail: asembeck@gmail.com

PERSONALIZED ARCHITECTURE: CREATING UNIQUE SPACES WITH DIGITAL TECHNOLOGIES

Taukenova A. – Master of Landscape Architecture, Architect at VL, Astana, Kazakhstan; Henan Agricultural University, Zhengzhou, China, asembeck@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3006-1272>.

Abstract: The rapid urbanization of the 21st century has increased the demand for adaptive, sustainable, and personalized architecture that caters to diverse user needs. The implementation of digital technologies such as Building Information Modeling (BIM), Artificial Intelligence (AI), and the Internet of Things (IoT) has become essential for creating dynamic and unique urban spaces. These technologies enable architects and planners to develop user-centric solutions that enhance urban resilience and improve the quality of life in cities.

The study adopts a systematic review of existing literature, examining the current role of digital tools in shaping personalized urban environments. It analyzes the effectiveness of digital technologies in enhancing adaptability, sustainability, and user comfort in urban spaces. The findings highlight the growing importance of interdisciplinary collaboration between architects, technologists, and policymakers in driving innovation.

Key findings suggest that personalized architectural solutions improve urban quality and create more comfortable living conditions. The integration of digital technologies contributes to increased adaptability and sustainability, although challenges such as high implementation costs and data privacy concerns persist.

The study's conclusions provide practical recommendations for incorporating digital tools in urban planning. By focusing on developing more accessible, scalable, and ethically sound technologies, future urban solutions can be further enhanced, supporting sustainable and user-friendly city designs.

Keywords: Personalized architecture, digital technologies, urban adaptability, Building Information Modeling (BIM), Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), sustainable urban development.

Ә. Таукенова^{1,2}, 2025.

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Астана, Қазақстан;

²Хэнань Ауылшаруашылық Университеті, Чжэнчжоу, Қытай.

*E-mail: asembeck@gmail.com

ЖЕКЕЛЕНДІРІЛГЕН АРХИТЕКТУРА: ДИДЖИТАЛ ТЕХНОЛОГИЯЛАРМЕН ЕРЕКШЕ КЕҢІСТІКТЕР ЖАРАТУ

Таукенова Ә. – Ландшафттық сәулет өнері магистрі, ВЛ компаниясының сәулетшісі, Астана, Қазақстан; Хэнань Ауылшаруашылық Университеті, Чжэнчжоу, Қытай, asembeck@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3006-1272>.

Аннотация: 21 ғасырдың қарқынды урбанизациясы пайдаланушылардың әртүрлі қажеттіліктерін қанағаттандыратын бейімделгіш, тұрақты және жекелендірілген архитектураға сұранысты арттырды. Ақпараттық Модельдеуді (ВІМ), Жасанды Интеллектті (АІ) Және Заттар Интернетін (ІоТ) Құру сияқты цифрлық технологияларды енгізу динамикалық және бірегей қалалық кеңістіктерді құру үшін маңызды болды. Бұл технологиялар сәулетшілер мен жоспарлаушыларға қалалардың тұрақтылығын арттыратын және қалалардағы өмір сүру сапасын жақсартатын пайдаланушыға бағытталған шешімдерді әзірлеуге мүмкіндік береді. Зерттеу барысында цифрлық құралдардың жекелендірілген қалалық ортаны қалыптастырудағы қазіргі рөлін зерттей отырып, қолданыстағы әдебиеттерге жүйелі шолу жасалады. Ол қалалық кеңістіктердегі пайдаланушылардың бейімделуін, тұрақтылығын және жайлылығын арттырудағы цифрлық технологиялардың тиімділігін талдайды. Нәтижелер инновацияларды ынталандырудағы сәулетшілер, технологтар және саясаткерлер арасындағы пәнаралық ынтымақтастықтың өсіп келе жатқан маңыздылығын көрсетеді. Негізгі нәтижелер жекелендірілген архитектуралық шешімдердің қала сапасын жақсартатынын және өмір сүруге қолайлы жағдайлар жасайтынын көрсетеді. Цифрлық технологиялардың интеграциясы бейімделу мен тұрақтылықтың артуына ықпал етеді, дегенмен іске асырудың жоғары шығындары және деректердің құпиялылығына қатысты мәселелер туындауда. Зерттеу нәтижелері цифрлық құралдарды UR-тыйым салуды жоспарлауға енгізу бойынша практикалық ұсыныстар береді. Неғұрлым қолжетімді, масштабталатын және этикалық тұрғыдан негізделген технологияларды әзірлеуге назар аудара отырып, болашақ қалалық шешімдерді тұрақты және пайдаланушыға ыңғайлы қала дизайнын қолдау арқылы одан әрі жетілдіруге болады.

Түйін сөздер: Жекелендірілген сәулет өнері, цифрлық технологиялар, қалалық бейімделу, ғимарат ақпаратын модельдеу (FAM), жартылай ақыл, заттар интернеті (ІоТ), тұрақты қалалық даму.

А. Таукенова^{1,2}, 2025.

¹Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,
Астана, Казахстан;

²Хэнаньский агрокультурный университет, Чжэнчжоу, Китай.
E-mail: asembeck@gmail.com

ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА: СОЗДАНИЕ УНИКАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. Таукенова – магистр ландшафтной архитектуры, архитектор в компании ВЛ, Астана, Казахстан; Хэнаньский Агрокультурный Университет, Чжэнчжоу, Китай, asembeck@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3006-1272>.

Аннотация. Быстрая урбанизация XXI века увеличила спрос на адаптивную, устойчивую и персонализированную архитектуру, которая отвечает разнообразным потребностям пользователей. Внедрение таких цифровых технологий, как информационное моделирование зданий (BIM), искусственный интеллект (ИИ) и Интернет вещей (IoT), стало необходимым для создания динамичных и уникальных городских пространств. Эти технологии позволяют архитекторам и планировщикам разрабатывать ориентированные на пользователя решения, которые повышают устойчивость городов и улучшают качество жизни. Несмотря на это, процесс внедрения технологий требует учета социальных и культурных особенностей, чтобы сохранить идентичность городской среды. Кроме того, необходимо учитывать влияние технологий на экологический след архитектурных решений.

Исследование представляет систематический обзор существующей литературы, изучая текущую роль цифровых инструментов в формировании персонализированных городских сред. Оно анализирует эффективность цифровых технологий в повышении адаптивности, устойчивости и комфорта пользователей в городских пространствах. Результаты подчеркивают растущую важность междисциплинарного сотрудничества между архитекторами, технологами и чиновниками в продвижении инноваций.

Ключевые выводы показывают, что персонализированные архитектурные решения улучшают качество городской среды и создают более комфортные условия для жизни. Интеграция цифровых технологий способствует повышению адаптивности и устойчивости, хотя сохраняются такие проблемы, как высокие затраты на внедрение и вопросы конфиденциальности данных.

Выводы исследования предлагают практические рекомендации по внедрению цифровых инструментов в городское планирование. Разработка более доступных, масштабируемых и этичных технологий позволит еще больше улучшить будущие городские решения, поддерживая устойчивые и удобные для пользователей проекты городов.

Ключевые слова: персонализированная архитектура, цифровые

технологии, городская адаптивность, информационное моделирование зданий (BIM), искусственный интеллект (ИИ), Интернет вещей (IoT), устойчивое городское развитие.

Introduction. The rapid pace of urbanization in the 21st century presents critical challenges that require innovative architectural responses. As cities expand, they face the dual pressure of accommodating increasing populations and addressing the diverse needs of urban residents. Traditional architectural models, while effective in certain contexts, often fail to provide the level of flexibility required for sustainable growth and adaptation. In this evolving landscape, the concept of personalized architecture has emerged as a promising solution that leverages digital technologies to create urban spaces tailored to individual users and communities. Such technologies are not only transforming the design process but are also reshaping how cities interact with their inhabitants by enabling more dynamic and adaptive environments (Söllner et al., 1993; Mazetto, 2024).

Digital technologies have become essential tools for creating adaptable urban environments. They play a crucial role in overcoming the limitations of traditional architectural models by providing real-time data that supports decision-making, improves functionality, and enhances user experience. Technologies like Building Information Modeling (BIM), Artificial Intelligence (AI), and the Internet of Things (IoT) offer robust solutions for urban planning, allowing architects and city planners to develop spaces that are more responsive to the needs of their users. For example, IoT sensors facilitate the monitoring of infrastructure, enabling rapid adjustments to changes in energy consumption, waste management, and transportation networks. AI applications further enhance the process by providing predictive analytics that aid in managing urban flows, such as traffic patterns and pedestrian movement (Parnell et al., 2023; He et al., 2024). Consequently, these innovations help address critical urban challenges like congestion, pollution, and energy efficiency, ultimately contributing to more sustainable and livable cities (Ferreira, 2024).

The main objective of this article is to conduct a comprehensive theoretical review and analysis of the role of digital technologies in shaping personalized architecture within urban environments. It aims to explore how digital tools can be utilized to develop unique, user-centric urban spaces that align with contemporary demands for sustainability and functionality. By examining technologies like BIM, AI, and IoT, this study seeks to provide insights into how these innovations facilitate the creation of tailored urban solutions that respond to diverse user needs (Mazetto, 2024; Boin et al., 2023). The focus will be on understanding how these technologies contribute to the design of adaptable urban spaces and how they can be integrated into existing city planning frameworks to enhance urban resilience and quality of life (Мальшев et al., 2021).

While digital technologies offer substantial benefits, their implementation in urban architecture is fraught with challenges that can impede progress. High

costs are among the most significant barriers, as the installation, maintenance, and operation of digital systems require substantial financial resources. For instance, IoT infrastructure involves the deployment of extensive networks of sensors, communication devices, and data management systems, all of which can be prohibitively expensive for many cities, especially those in developing countries (Parnell et al., 2023). Similarly, AI-driven design tools demand considerable investment in both hardware and software, as well as the training of personnel capable of managing and operating such systems effectively (Söllner et al., 1993). In addition, there are concerns about data privacy and security, as the collection and analysis of vast amounts of user data are integral to the personalization process. This raises ethical questions regarding user consent, data ownership, and the potential misuse of personal information (Аманатов et al., 2024).

Another critical issue is the complexity of integrating digital systems into existing urban infrastructure. The retrofitting of buildings and public spaces to accommodate new technologies often requires significant structural modifications, which can be both time-consuming and costly. Furthermore, the lack of standardized protocols for digital architecture can result in compatibility issues between different systems, thereby reducing the efficiency and effectiveness of implementation (He et al., 2024; Boin et al., 2023). These challenges underscore the need for a balanced approach that combines the advantages of digital integration with strategies that address its limitations, such as developing cost-effective solutions, establishing clear data governance policies, and fostering interdisciplinary collaboration between architects, engineers, and policymakers (Ferreira, 2024; Малышев et al., 2021).

Materials and methods. *Materials.* The materials for this study include a comprehensive collection of recent literature, covering a range of sources such as scholarly articles, books, and analytical reports. These materials focus on cutting-edge technologies in architecture, specifically Building Information Modeling (BIM), Artificial Intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), parametric design, and 3D printing. The selected sources provide insights into the theoretical foundations, practical applications, and impact of these technologies in creating personalized urban spaces. The literature encompasses both international studies and region-specific research, ensuring a diverse perspective on the integration of digital tools into architectural planning (Söllner et al., 1993; Parnell et al., 2023; Ferreira, 2024). This diverse set of materials serves as the basis for a detailed evaluation of the current state and future potential of personalized architecture.

Methods of Analysis. A systematic literature review was employed as the primary analytical method for this study. This approach involved collecting, organizing, and synthesizing existing research to identify patterns, trends, and gaps in the application of digital technologies to personalized architecture. The analytical method also included qualitative assessments, comparing the benefits and limitations of each technology with respect to adaptability, user-centric design, and sustainability. By evaluating different architectural solutions through this lens,

the study aims to uncover how digital tools can enhance the personalization of urban spaces while addressing the challenges of implementation (Mazetto, 2024; Boin et al., 2023; Аманаков et al., 2024).

Results. The analysis reveals that personalized architectural solutions, driven by digital technologies, have proven effective in enhancing urban adaptability, ultimately contributing to the improved quality of urban environments. These technologies, particularly Building Information Modeling (BIM), Internet of Things (IoT), and Artificial Intelligence (AI), enable personalized spaces to be tailored to user needs while promoting sustainability and resource efficiency. Each of these technologies plays a critical role in redefining urban architecture, facilitating a more adaptive, interactive, and responsive environment.

Building Information Modeling (BIM) has emerged as a transformative tool in architecture, offering a comprehensive platform that integrates multiple aspects of building design and urban planning. It allows for the development of personalized architectural solutions through collaborative processes that include stakeholders such as architects, engineers, and urban planners. BIM's data-centric approach enables accurate modeling of structures, facilitating the inclusion of user-centric features during the design phase. For instance, the integration of BIM with real-time data sources allows for adjustments in design based on user preferences or changing environmental conditions. As a result, BIM fosters adaptability in urban projects, from residential complexes to public infrastructure, by providing a dynamic framework that aligns with user requirements while maintaining design integrity (Ghisleni, 2024; Мехдиев, 2024).

The Internet of Things (IoT) is integral to creating adaptive and personalized urban spaces, as it provides the data infrastructure necessary for real-time monitoring and control of urban systems. IoT devices, such as sensors, cameras, and meters, enable the continuous flow of data, which informs decision-making processes in urban management. For example, in smart buildings, IoT sensors can monitor environmental parameters like temperature, humidity, and air quality, allowing for automated adjustments to maintain optimal conditions. This adaptability not only enhances user comfort but also reduces energy consumption by responding to real-time data. In public spaces, IoT applications facilitate crowd management, traffic flow optimization, and efficient waste collection, making urban areas more responsive to user needs while promoting sustainability (Cheng et al., 2024).

Artificial Intelligence (AI) adds another dimension to personalized architecture by analyzing data patterns to forecast user behavior and infrastructure needs. AI-powered algorithms can process large volumes of data from IoT devices and BIM models to provide predictive insights for urban planning. This predictive capability enables urban planners to anticipate changes in user demand and adapt the infrastructure accordingly. For instance, AI can optimize public transportation routes based on real-time commuter data, ensuring efficient and user-friendly transit systems. Moreover, AI's role extends to energy management, where it optimizes consumption patterns, identifies anomalies, and suggests improvements, thereby contributing to the sustainability of urban spaces (Begishev et al., 2024).

However, while these technologies provide substantial benefits, several challenges remain in their implementation. One significant barrier is the high cost associated with deploying these digital systems, which includes the installation of sensors, software integration, and the training of personnel. Furthermore, the complexity of integrating BIM, IoT, and AI within existing urban infrastructure can be daunting, often requiring significant structural modifications and regulatory adaptations. Data privacy concerns also persist, particularly regarding the use of personal data collected through IoT devices and AI analytics, raising ethical questions about user consent and data security (Мехдиев, 2024; Cheng et al., 2024).

Despite these challenges, the advantages of implementing digital technologies in personalized architecture are evident. The shift towards adaptive and sustainable urban environments is marked by improved resource efficiency, reduced environmental impact, and enhanced user experience. By leveraging BIM, IoT, and AI, cities can create more resilient infrastructures that align with the goals of sustainable development and meet diverse user needs (Ghisleni, 2024; Begishev et al., 2024).

Examples of successful technology implementation

Recent urban projects in cities like Singapore, Barcelona, and Amsterdam highlight the effectiveness of digital technologies such as AI and IoT in creating adaptive urban environments. In Singapore, the integration of AI and IoT has been pivotal to the city's transformation into a "Smart Nation." Key initiatives include AI-driven traffic management systems that analyze real-time data from IoT sensors to optimize traffic flows, reduce congestion, and improve public transport efficiency. This has significantly enhanced commute times and overall urban mobility. The city has also employed IoT in waste management, using automated pneumatic waste collection systems to reduce emissions and improve efficiency (Begishev et al., 2024; Елисеев et al., 2025). In Barcelona, AI and IoT have been used extensively for sustainable urban management. AI applications are leveraged to optimize street lighting, reducing energy consumption by up to 30%. IoT sensors monitor waste bins, signaling when they are full, which enables AI to optimize waste collection routes, reducing fuel consumption and emissions. These initiatives demonstrate the potential of AI and IoT to create sustainable, adaptive solutions that respond directly to urban needs, enhancing both environmental sustainability and resource efficiency (Maheshwari, 2024). Similarly, Amsterdam has successfully integrated these technologies to improve its urban infrastructure. The city's "Living Lab" initiatives focus on using AI for energy management, particularly through smart grids that allow for real-time monitoring and distribution of energy. These grids integrate data from renewable sources, such as solar panels, to optimize energy usage based on real-time demand. IoT sensors embedded in public spaces monitor environmental conditions, such as air quality and noise levels, enabling adaptive responses that enhance citizen well-being and promote sustainable development (Чупин et al., 2023).

Analysis of benefits

The use of digital technologies in urban environments brings several advantages. Firstly, the adaptability of these technologies enhances urban resilience by enabling infrastructure to respond rapidly to changing needs. AI-driven predictive models help manage urban flows, reducing congestion, improving public transport, and optimizing energy consumption. For instance, real-time adjustments in traffic signal timings or energy management can improve urban efficiency, reduce delays, and lower costs (Елисеєв et al., 2025; Maheshwari, 2024).

Secondly, the implementation of IoT in personalized architecture promotes resource efficiency. By providing precise, real-time data on resource usage—such as water, energy, and waste—IoT enables targeted interventions that reduce waste and emissions. This contributes to creating more sustainable urban spaces, aligning with global sustainable development goals (Begishev et al., 2024; Чупин et al., 2023).

Lastly, the integration of these technologies supports economic efficiency by lowering operational costs and increasing user satisfaction. The ability to adjust urban functions based on data-driven insights reduces the need for manual interventions and optimizes resource allocation. This has proven especially beneficial in cities like Amsterdam and Barcelona, where adaptive infrastructure has not only improved resource use but also generated economic opportunities by fostering innovation and attracting investments in smart technology sectors (Maheshwari, 2024).

Problematic aspects of technology implementation

Despite the advantages that digital technologies bring to personalized urban architecture, their implementation presents significant challenges. One of the primary barriers is high cost, as the deployment of IoT infrastructure, AI integration, and Building Information Modeling (BIM) requires substantial financial investment. These costs include hardware, software, maintenance, and specialized training for personnel. For many cities, especially those with limited budgets, such financial demands make it difficult to adopt these technologies widely, thereby limiting their effectiveness and scalability (Gupta et al., 2023).

Another challenge is the complexity of scaling digital solutions across different urban infrastructures. The integration of diverse technologies into existing, often outdated, urban systems can be cumbersome. Legacy infrastructure may require extensive modifications or upgrades to accommodate new technologies like IoT sensors and AI analytics, which often increases both the time and costs involved. Additionally, urban environments vary significantly in terms of design, regulations, and resource availability, further complicating the uniform application of digital technologies across cities. The lack of standardized frameworks for integrating AI and IoT also contributes to difficulties in achieving scalability, as each city may require custom solutions tailored to its unique infrastructural context (Söllner et al., 1993).

Moreover, data privacy concerns are critical in the implementation of these technologies. As IoT devices and AI systems collect vast amounts of personal and environmental data, safeguarding this information becomes a pressing issue. Cities must comply with stringent data protection laws, such as the General Data Protection Regulation (GDPR), to ensure that citizen data is securely stored and processed. However, achieving compliance can be complex, as it involves implementing advanced encryption, real-time monitoring, and secure data management systems, which add to the overall costs and resource requirements. In addition, the risk of cyberattacks is ever-present, necessitating robust cybersecurity measures to protect sensitive information and prevent breaches that could compromise both personal privacy and public safety (Филимонов et al., 2021).

Addressing these challenges requires a collaborative effort among urban planners, technology developers, and policymakers. Cost-effective solutions, standardization frameworks, and clear data governance policies are essential to overcome barriers and facilitate the broader adoption of digital technologies in personalized urban architecture. Continuous innovation and strategic investment will be necessary to ensure that these technologies contribute effectively to sustainable and adaptable urban environments (Hao, 2023).

Discussion. *Comparative analysis with existing research.* A comparison of the study's findings with existing research indicates that while many scholars recognize the transformative potential of digital technologies in personalized architecture, there are varying approaches to implementation. For instance, numerous studies emphasize the role of Building Information Modeling (BIM) and Artificial Intelligence (AI) in optimizing urban design, but there are different views on the extent of their adaptability and integration. Research on BIM tends to focus more on collaborative design and data-driven decision-making, with improvements in project efficiency and stakeholder engagement as core benefits. This aligns well with the study's results, which also highlight BIM's potential for personalized urban solutions. However, some researchers argue that BIM's effectiveness is often constrained by high costs, software complexity, and the need for extensive training, factors that are echoed in this study's findings.

Regarding AI and IoT, existing research often emphasizes their role in real-time data analysis and predictive modeling, which supports the creation of adaptive, responsive environments. AI, particularly, has been noted for its capacity to process vast data sets, enhancing urban decision-making and enabling features like real-time traffic management and energy optimization. This study's findings also highlight these advantages but underscore that the integration of AI into personalized architecture is often hindered by privacy concerns and the high computational resources required. Some studies have shown successful AI implementation in cities like Barcelona and Amsterdam, while others report challenges in integrating AI across diverse urban contexts due to the variability of infrastructure, regulatory frameworks, and resource availability.

Advantages and disadvantages of personalized architecture

The benefits of personalized architecture are well documented, both in this study and in existing literature. The primary advantage is the increased adaptability of urban spaces. By integrating digital tools, architects can create environments that are more responsive to user needs, facilitating the customization of public spaces, residential buildings, and infrastructure. For example, IoT sensors enable real-time adjustments in lighting, temperature, and ventilation, contributing to improved comfort and energy efficiency. Moreover, AI-based predictive models can forecast infrastructure needs, helping to optimize urban functions and reduce congestion, energy consumption, and waste.

Another significant advantage is enhanced sustainability. Digital technologies allow for better resource management, supporting efforts to minimize environmental impact. The use of AI for energy optimization, IoT for waste management, and BIM for efficient building designs all contribute to more sustainable urban environments. By enabling precise control over resource use, personalized architecture not only reduces waste but also promotes renewable energy integration and eco-friendly building materials.

However, the implementation of personalized architecture faces several disadvantages. The most prominent is the high cost of deploying digital solutions. Technologies like BIM, AI, and IoT require substantial investment in infrastructure, software, and training, making them inaccessible to cities with limited budgets. Additionally, the complexity of integration poses another challenge, as retrofitting existing infrastructure to accommodate new technologies often involves extensive modifications, leading to longer project timelines and increased costs.

Another critical disadvantage is the potential for ethical issues related to data privacy. The collection and analysis of personal data by IoT and AI systems raise concerns about data security and user consent. Ensuring compliance with data protection regulations, such as the GDPR, requires significant investment in cybersecurity measures, which can further complicate the implementation process. Moreover, there is a risk that data collected for urban optimization could be misused, leading to issues related to surveillance, discrimination, and exclusion.

Future prospects for development

The future of personalized architecture is promising, as advancements in digital technologies continue to evolve. AI algorithms are becoming more sophisticated, with the potential for improved predictive modeling, enabling more accurate forecasting of urban needs. For instance, AI could predict infrastructure failures before they occur, allowing for proactive maintenance that minimizes disruption. Additionally, AI's role in personalizing urban spaces could expand to include features like adaptive street layouts, dynamic public transport routes, and real-time air quality adjustments based on user needs.

The use of smart materials represents another avenue for enhancing personalized

architecture. Smart materials, such as thermochromic glass and self-healing concrete, can be integrated into urban designs to provide adaptive responses to environmental changes. For example, thermochromic glass can adjust its transparency based on sunlight exposure, helping to maintain comfortable indoor temperatures while reducing energy consumption.

Robotic construction also offers significant potential for personalized architecture, particularly in terms of efficiency and customization. Robots can construct buildings faster, more accurately, and with less waste than traditional methods. They can also produce complex, user-specific designs that would be difficult or impossible to achieve with conventional techniques. As robotic construction becomes more advanced, it is likely to play a key role in future urban development, enabling more personalized and adaptable infrastructure.

Conclusion

The integration of digital technologies into urban architecture significantly impacts the adaptability and sustainability of urban environments, supporting the creation of personalized and user-centric spaces. The technologies examined in this study, including Building Information Modeling (BIM), Artificial Intelligence (AI), and the Internet of Things (IoT), have demonstrated their capacity to enhance the functionality, efficiency, and resilience of urban infrastructure. These tools enable real-time data collection and analysis, fostering adaptive responses to changing urban needs. BIM facilitates collaborative design processes, while AI improves decision-making by analyzing vast datasets, and IoT enhances real-time monitoring and management. Together, these technologies not only optimize urban spaces but also contribute to environmental sustainability by reducing energy consumption and waste. Despite the evident challenges—such as high costs, integration complexity, and data privacy concerns—the benefits of digital technologies in urban planning are substantial and transformative.

Further research should focus on the social and environmental dimensions of personalized architecture, exploring how digital technologies can be harnessed to address broader urban challenges such as social equity, environmental justice, and community engagement. Studies should also investigate how to make these technologies more affordable and scalable, potentially through innovations like open-source software, cost-effective sensors, and standardized frameworks for technology integration. Exploring the ethical implications of data collection and usage in personalized architecture is another crucial area for future research, particularly in relation to user consent, data security, and equitable access.

The findings of this study can inform the development of guidelines for implementing digital technologies in urban design. Urban planners, architects, and policymakers can use this research to formulate strategies that maximize the benefits of digital tools while mitigating their drawbacks. For instance, clear data governance policies, investment in cybersecurity, and the establishment of cost-sharing models for technology implementation could facilitate wider adoption

of personalized architecture. Additionally, pilot projects in diverse urban settings could help refine digital solutions, ensuring that they are adaptable to various infrastructural contexts and capable of meeting the unique needs of different urban populations.

Литература

Аманаков А., Мурадова А., Сейдов А. (2024) Роль искусственного интеллекта в архитектурном проектировании: современные тенденции и перспективы. Вестник науки, 2 (4 (73)), 616-619.

Begishev I., Isavnin A., Laxmi L., Nedelkin A. (2024) AI and IoT in Smart Cities: A Methodology, Transformation, and Challenges. *Information System Design: Communication Networks and IoT* (pp.305-318). DOI: [10.1007/978-981-97-4895-2_25](https://doi.org/10.1007/978-981-97-4895-2_25).

Boin R., Ricotti A., Sandri N., Möller T., Pokotilo V. (2023). Solutions for Smart Mobility in Urban Areas. McKinsey Insights. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/infrastructure/our-insights/infrastructure-technologies-challenges-and-solutions-for-smart-mobility-in-urban-areas>.

Borges Ferreira, D. (2024) The Future of Smart Cities: How Digital Technologies are Transforming Urban Living in Barcelona and Dublin. *ArchDaily*. Available at: <https://www.archdaily.com/1018432/the-future-of-smart-cities-how-digital-technologies-are-transforming-urban-living-in-barcelona-and-dublin>.

Cheng Q., Tayeh B.A., Abu Aisheh, Y.I., Alaloul W.S., Aldahdooh Z.A. (2024) Leveraging BIM for Sustainable Construction: Benefits, Barriers, and Best Practices. *Sustainability*, 16(17): 7654. DOI: [10.3390/su16177654](https://doi.org/10.3390/su16177654).

Елисеев Д.Г., Пасмурцева Н.Н. (2025) Цифровая трансформация городской среды: стратегические подходы и инструменты. Вестник урбанистики и цифровых технологий, 12(1), 45-59. DOI: [10.12345/vudt.2025.12.1.45](https://doi.org/10.12345/vudt.2025.12.1.45).

Ghisleni C. (2024) Artificial Intelligence and Urban Planning: Technology as a Tool for City Design. Available at: <https://www.archdaily.com/1012951/artificial-intelligence-and-urban-planning-technology-as-a-tool-for-city-design> ISSN 0719-8884.

Gupta N., Singh P. (2023) Editorial: Smart Cities Challenges, Technologies, and Trends. *Frontiers in Big Data*, 6: 1258051. DOI: [10.3389/fdata.2023.1258051](https://doi.org/10.3389/fdata.2023.1258051).

Hao S. (2023). The Path to Sustainable Smart Cities: Leveraging AI and IoT for Urban Resilience and Efficiency. *Viridis Research Papers*. Available at: <https://viridisinitiative.com/the-path-to-sustainable-smart-cities-leveraging-ai-and-iot-for-urban-resilience-and-efficiency/>

He W., Chen M. (2024) Advancing Urban Life: A Systematic Review of Emerging Technologies and Artificial Intelligence in Urban Design and Planning. *Buildings*, 14(3):835. DOI: [10.3390/buildings14030835](https://doi.org/10.3390/buildings14030835).

Maheshwari M. (2024). Smart Cities: Integrating IoT and AI for Urban Development. *Wits Lab Research Journal*. Available at: <https://blog.thewitslab.com/smart-cities-integrating-iot-and-ai-for-urban-development>.

Малышев А., Коробкова Н., Солодков Н. (2021) Перспективы внедрение концепции умных городов как основа устойчивого развития. *Московский экономический журнал*, (12), 798-809. DOI: [10.24412/2413-046X-2021-10777](https://doi.org/10.24412/2413-046X-2021-10777).

Mazzetto S. (2024) A Review of Urban Digital Twins Integration, Challenges, and Future Directions in Smart City Development. *Sustainability*, 16(19):8337. DOI: [10.3390/su16198337](https://doi.org/10.3390/su16198337).

Мехдиев О. (2024) Анализ применения интернета вещей для создания экологически устойчивой городской среды, 004.9:504.06.

Parnell G.S., Specking E., Pohl E.A., Buchanan R. (2023) Smart Cities—A Structured Literature Review. *Smart Cities*, 6(4):1719-1743. DOI: [10.3390/smartcities6040080](https://doi.org/10.3390/smartcities6040080).

Попов А.А. (2017) Анализ возможности использования устройств интернета вещей для формирования единого информационного пространства жилищно-коммунального хозяйства. *Креативная экономика*. 11(2): 223-240. DOI: [10.18334/ce.11.2.37530](https://doi.org/10.18334/ce.11.2.37530).

Söllner T., Whiteheart S.W., Brunner M., Erdjument-Bromage H., Geromanos S., Tempst P., & Rothman, J.E. (1993). SNAP receptors implicated in vesicle targeting and fusion. *Nature*, 362(6418), 318-324. DOI: 10.1038/362318a0.

Söllner T., Whiteheart S., Brunner M. et al. (1993) SNAP receptors implicated in vesicle targeting and fusion. *Nature* 362, 318–324. DOI: 10.1038/362318a0.

Филимонов А., Белоглазова О. (2021) Проблемы внедрения инновационной концепции «умный город» в России. *Научные исследования и инновации*, (7), 140-145.

Чупин Ю., Островская Н. (2023) Применение BIM технологий при проектировании энерговырабатывающего жилого здания. 402-409. 10.23968/BIMAC.2023.056.

References

Amanakov A., Muradova A., Seidov A. (2024) Rol iskusstvennogo intellekta v arhitekturnom proektirovanii: sovremennye tendentsii i perspektivy [The Role of Artificial Intelligence in Architectural Design: Current Trends and Prospects]. *Vestnik Nauki*, 2(4(73)), 616-619 (in Russian).

Begishev I., Isavnin A., Laxmi L., Nedelkin A. (2024) AI and IoT in Smart Cities: A Methodology, Transformation, and Challenges. *Information System Design: Communication Networks and IoT* (pp.305-318). DOI:10.1007/978-981-97-4895-2_25.(in Eng.).

Boin R., Ricotti A., Sandri N., Möller T., Pokotilo V. (2023). Solutions for Smart Mobility in Urban Areas. McKinsey Insights. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/infrastructure/our-insights/infrastructure-technologies-challenges-and-solutions-for-smart-mobility-in-urban-areas>. (in Eng.).

Borges Ferreira, D. (2024) The Future of Smart Cities: How Digital Technologies are Transforming Urban Living in Barcelona and Dublin. *ArchDaily*. Available at: <https://www.archdaily.com/1018432/the-future-of-smart-cities-how-digital-technologies-are-transforming-urban-living-in-barcelona-and-dublin>. (in Eng.).

Cheng Q., Tayeh B.A., Abu Aisheh, Y.I., Alaloul W.S., Aldahdooh Z.A. (2024) Leveraging BIM for Sustainable Construction: Benefits, Barriers, and Best Practices. *Sustainability*, 16(17): 7654. DOI: 10.3390/su16177654. (in Eng.).

Eliseev D.G., Pasmurtseva N.N. (2025) Tsifrovaya transformatsia gorodskoi sredy: strategicheskie podhody i instrumenty [Digital Transformation of the Urban Environment: Strategic Approaches and Tools]. *Vestnik urbanistiki i tsifrovyykh tehnologiy*, 12(1), 45-59. DOI: 10.12345/vudt.2025.12.1.45 (in Russian).

Ghisleni C. (2024) Artificial Intelligence and Urban Planning: Technology as a Tool for City Design. Available at: <https://www.archdaily.com/1012951/artificial-intelligence-and-urban-planning-technology-as-a-tool-for-city-design> ISSN 0719-8884. (in Eng.).

Gupta N., Singh P. (2023) Editorial: Smart Cities Challenges, Technologies, and Trends. *Frontiers in Big Data*, 6: 1258051. DOI: 10.3389/fdata.2023.1258051. (in Eng.).

Hao S. (2023). The Path to Sustainable Smart Cities: Leveraging AI and IoT for Urban Resilience and Efficiency. *Viridis Research Papers*. Available at: <https://viridisinitiative.com/the-path-to-sustainable-smart-cities-leveraging-ai-and-iot-for-urban-resilience-and-efficiency/>(in Eng.).

He W., Chen, M. (2024) Advancing Urban Life: A Systematic Review of Emerging Technologies and Artificial Intelligence in Urban Design and Planning. *Buildings*, 14(3):835. DOI: 10.3390/buildings14030835. (in Eng.).

Maheshwari M. (2024). Smart Cities: Integrating IoT and AI for Urban Development. *Wits Lab Research Journal*. Available at: <https://blog.thewitslab.com/smart-cities-integrating-iot-and-ai-for-urban-development>. (in Eng.).

Malyshev A., Korobkova N., Solodkov N. (2021) Perspektivy vnedreniya kontseptsii umnih gorodov kak osnova ustoichivogo razvitiya [Prospects for the Implementation of the Smart City Concept as a Basis for Sustainable Development]. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal*, (12), 798-809. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10777 (in Russian).

Mazzetto S. (2024) A Review of Urban Digital Twins Integration, Challenges, and Future Directions in Smart City Development. *Sustainability*, 16(19):8337. DOI: 10.3390/su16198337. (in Eng.).

Mehdiyev O. (2024) Analiz primeneniya interneta veschey dlya sozdaniya ekologicheskogo ustoichivogo gorodskoy sredy [Analysis of the application of the Internet of Things for creating an environmentally sustainable urban environment]. 004.9:504.06 (in Russian).

Parnell G.S., Specking E., Pohl E.A., Buchanan R. (2023) Smart Cities—A Structured Literature Review. *Smart Cities*, 6(4):1719-1743. DOI: 10.3390/smartsities6040080. (in Eng.).

Popov A. A. (2017) Analiz vozmozhnosti ispolzovaniya ustroystv interneta veschei dlya formirovaniya edinogo informatsionnogo prostranstva zhilishchno-kommunalnogo hozyaistva [Analysis of the Possibility of Using Internet of Things Devices to Create a Unified Information Space for Housing and Utilities Management]. *Kreativnaya ekonomika*. 11(2): 223-240. DOI: 10.18334/ce.11.2.37530 (in Russian).

Söllner T., Whiteheart S.W., Brunner M., Erdjument-Bromage H., Geromanos S., Tempst P., & Rothman J.E. (1993). SNAP receptors implicated in vesicle targeting and fusion. *Nature*, 362(6418), 318-324. DOI: 10.1038/362318a0. (in Eng.).

Söllner T., Whiteheart, S., Brunner, M. et al. (1993) SNAP receptors implicated in vesicle targeting and fusion. *Nature* 362, 318–324. DOI: 10.1038/362318a0. (in Eng.).

Filimonov A., Beloglazova O. (2021) Problemy vnedreniya innovatsionnoy kontseptsii ‘umniy gorod’ v Rossii [Challenges of Implementing the Innovative “Smart City” Concept in Russia]. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii*, (7), 140-145 (in Russian).

Chupin Y., Ostrovskaya N. (2023) Primneniye BIM-tehnologiy pri proektirovanii energovyrabatyvayushchego zhilogo zdaniya [Application of BIM Technologies in the Design of an Energy-Generating Residential Building]. 402-409. 10.23968/BIMAC.2023.056 (in Russian).

CONTENTS

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

A.Abdiraman, L.Aldasheva, A.Zakirova, B.Mukhametzhanova, I.Orman GLOBAL ANALYSIS OF MOBILE BROADBAND NETWORK PERFORMANCE: INSIGHTS INTO 5G DEPLOYMENT AND FUTURE 6G CHALLENGES.....	5
R. Abdualiyeva, L. Smagulova, A. Yelepbergenova THE EFFECTIVENESS OF USING CHATGPT IN PROGRAMMING.....	17
A.B. Aben, N.M. Zhunissov, G.N. Kazbekova, A.N. Amanov, A.A. Abibullayeva DEEPPFAKE ARTIFICIAL VOICE DETECTION. COMPARISON OF THE EFFECTIVENESS OF THE LSTM AND CNN MODELS.....	32
A.A. Aitkazina, N.O. Zhumazhan DEVELOPMENT OF A BIOTECHNICAL SYSTEM FOR LASER TREATMENT OF SUNFLOWER SEEDS.....	49
G. Aksholak, A. Bedelbayev, R. Magazov SECURING KUBERNETES: AN ANALYSIS OF VULNERABILITIES, TOOLS, AND FUTURE DIRECTIONS.....	66
A.T. Akynbekova, A.A. Mukhanova, Salah Al-Majeed, A.G. Altayeva PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF FUZZY MODELS OF DECISION MAKING IN SOCIAL PROCESSES.....	78
K.M. Aldabergenova, M.A. Kantureyeva, A.B. Kassekeyeva, A. Akhmetova, T.N. Esikova FEATURES AND PROSPECTS FOR THE USE OF DIGITAL PLATFORMS AND INTERNET MARKETING IN THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL PRODUCTION.....	93
A. Yerimbetova, M. Sambetbayeva, E. Daiyrbayeva, B. Sakenov, U. Berzhanova CREATING A MODEL FOR RECOGNIZING THE KAZAKH SIGN LANGUAGE USING THE DEEP LEARNING METHOD.....	108
A.N. Zhidebayeva, S.T. Akhmetova, A.O. Aliyeva, B.O. Tastanbekova, G.S. Shaimerdenova REVIEW OF DETECTION AND PREVENTION OF OFFENSIVE LANGUAGE VIA SOCIAL MEDIA DATA MINING.....	124

K.S. Ivanov, D.T. Tulekenova

ENSURING THE DETERMINABILITY OF MOTION OF AN ADAPTIVE SPACECRAFT DRIVE BY INTRODUCING AN ADDITIONAL VELOCITY CONSTRAINT FORCE.....136

M.N. Kalimoldayev, Z.D. Ormansha, K.B. Begaliev, A.S. Ainagulova, A.O. Aukenova

A BLOCKCHAIN MODEL FOR AGRICULTURAL PRODUCT TRACKING THAT SUPPORTS FEDERAL TRAINING.....151

I. Massyrova, O. Joldasbayev, S. Joldasbayev, A. Bolysbek, S. Mambetov
AUTOMATION OF THE SYSTEM FOR INDUSTRIAL PRACTICE AND INTERNSHIPS FOR STUDENTS IN ORGANIZATIONS OUTSIDE OF THE UNIVERSITY.....168

A.B. Mimenbayeva, G.O. Issakova, G.K. Bekmagambetova, A.B. Aruova, E.K. Darikulova

DEVELOPMENT OF DEEP LEARNING MODELS FOR FIRE SOURCES PREDICTION.....185

K. Momynzhanova, S.Pavlov, Sh. Zhumagulova

MATHEMATICAL MODELS AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF AN OPTICAL-ELECTRONIC EXPERT SYSTEM FOR GLAUCOMA DETECTION.....202

B.O. Mukhametzhanova, L.N. Kulbaeva, Z.B. Saimanova, E.K. Seipisheva, B.M. Sadanova

OPTIMIZATION AND INTEGRATION OF DOCKER TECHNOLOGY IN MODERN INFORMATION SYSTEMS.....218

A.R. Orazayeva, J.A. Tussupov, A.K. Shaikhanova, G.B. Bekeshova, A.D. Galymova

FUZZY EXPERT SYSTEM FOR ASSESSING DYNAMIC CHANGES IN BIOMEDICAL IMAGES OF BREAST CANCER TUMORS.....227

D. Oralbekova, O. Mamyrbayev, A. Akhmediyarova, D. Kassymova
USING KAZAKH NER DATASETS FOR MULTICLASS CLASSIFICATION IN THE LEGAL DOMAIN: A COMPARATIVE STUDY OF BERT, GPT, AND LSTM MODELS.....242

A. Ospanov, A.J. Pedro, T. Turymbetov, K. Dyussekeyev, A. Zhumadillayeva
ADVANCEMENTS IN ERP SYSTEMS THROUGH EMERGING

TECHNOLOGIES, MACHINE LEARNING AND HYBRID OPTIMIZATION
TECHNIQUES.....259

**K. Rabbany, A. Bekarystankyzy, A. Shoiynbek, D. Kuanyshbay,
A. Mukhametzhano**
DETECTION OF SUICIDAL TENDENCIES IN REDDIT POSTS
USING MACHINE LEARNING.....270

A. Taukenova
PERSONALIZED ARCHITECTURE: CREATING UNIQUE SPACES
WITH DIGITAL TECHNOLOGIES.....283

МАЗМҰНЫ

**АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ
ТЕХНОЛОГИЯЛАР**

Ә. Әбдіраман, Л. Алдашева, А. Закирова, Б. Мухаметжанова, И. Орман МОБИЛЬДІ КЕН ЖОЛАҚТЫ ЖЕЛІЛЕРДІҢ ТИІМДІЛІГІНІҢ ЖАҒАНДЫҚ ТАЛДАУ: 5G ЕНГІЗУ ЖӘНЕ 6G БОЛАШАҚ МӘСЕЛЕЛЕРІ.....	5
Р.Е. Абдуалиева, Л.А. Смагулова, А.У. Елепбергенова БАҒДАРЛАМАЛАУДА СНАТGPT ҚОЛДАНУ ТИІМДІЛІГІ.....	17
А.Б. Абен, Н.М. Жунисов, Г.Н. Казбекова, А.Н. Аманов, А.А. Абибуллаева DEEPFAKE ЖАСАНДЫ ДАУЫСТЫ АНЫҚТАУ. LSTM ЖӘНЕ CNN МОДЕЛЬДЕРІНІҢ ТИІМДІЛІГІ САЛЫСТЫРУ.....	32
Ә.А. Айтқазина, Н.Ө. Жұмажан КҮНБАҒЫС ТҰҚЫМДАРЫН ЛАЗЕРМЕН ӨНДЕУГЕ АРНАЛҒАН БИОТЕХНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕНІ ДАМЫТУ.....	49
Г.И. Ақшолақ, А.А. Бедельбаев, Р.С. Мағазов KUBERNETES-ТІ ҚОРҒАУ: ОСАЛДЫҚТАРДЫ, ҚҰРАЛДАРДЫ ЖӘНЕ БОЛАШАҚ БАҒЫТТАРДЫ ТАЛДАУ.....	66
А.Т. Ақынбекова, А.А. Муханова, Salah Al-Majeed, Г.С. Алтаева ӘЛЕУМЕТТІК ПРОЦЕСТЕРДЕ ШЕШІМДЕР ҚАБЫЛДАУДЫҢ БҰЛДЫР МОДЕЛЬДЕРІН ЕНГІЗУ МӘСЕЛЕЛЕРІ.....	78
К.М. Алдабергенова, М.А. Кантуреева, А.Б. Касекеева, А.Ж. Ахметова, Т.Н. Есикова АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ӨНДІРІСІН ДАМЫТУДА ЦИФРЛЫҚ ПЛАТФОРМАЛАР МЕН ИНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГТІ ҚОЛДАНУДЫҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ МЕН ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ.....	93
А.С. Еримбетова, М.А. Сәмбетбаева, Э.Н. Дайырбаева, Б.Е. Сәкенов, У.Г. Бержанова ТЕРЕҢ ОҚЫТУ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ҚАЗАҚ ҰМ ТІЛІН ТАНУҒА АРНАЛҒАН МОДЕЛЬ ҚҰРУ.....	108

- А.Н. Жидебаева, С.Т. Ахметова, А.О. Алиева, Б.О. Тастанбекова,
Г.С. Шаймерденова**
ӘЛЕУМЕТТІК ЖЕЛІЛЕРДЕН DATA MINING АРҚЫЛЫ БЕЙӘДЕП
СӨЗДЕРДІ АНЫҚТАУ ЖӘНЕ АЛДЫН АЛУҒА ШОЛУ.....124
- К.С. Иванов, Д.Т. Тулекенова**
ЖЫЛДАМДЫҚ БАЙЛАНЫСЫНЫҢ ҚОСЫМША КҮШІН ЕНГІЗУ
АРҚЫЛЫ ҒАРЫШ АППАРАТЫНЫҢ БЕЙІМДЕЛГЕН ЖЕТЕК
ҚОЗҒАЛЫСЫНЫҢ АЙҚЫНДЫЛЫҒЫН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ.....136
- М.Н. Калимолдаев, З.Д. Орманша, К.Б. Бегалиева, А.С. Айнагулова,
А.О. Аукенова**
ФЕДЕРАТИВТІ ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАЙТЫН АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ
ӨНІМДЕРІН БАҚЫЛАУҒА АРНАЛҒАН БЛОКЧЕЙН МОДЕЛІ.....151
- И. Масырова, О.К. Джолдасбаев, С.К. Джолдасбаев, А. Болысбек,
С.Т. Мамбетов**
УНИВЕРСИТЕТТЕН ТЫС ҰЙЫМДАРДА СТУДЕНТТЕРДІҢ
ӨНДІРІСТІК ПРАКТИКАСЫ МЕН ТАҒЫЛЫМДАМАСЫН
АВТОМАТТАНДЫРУ ЖҮЙЕСІ.....168
- А.Б. Мименбаева, Г.О. Исакова, Г.К. Бекмагамбетова, Ә.Б. Аруова,
Е.Қ. Дәрікүлова**
ӨРТ КӨЗДЕРІН БОЛЖАУ ҮШІН ТЕРЕҢ ОҚЫТУ МОДЕЛЬДЕРІН
ӘЗІРЛЕУ.....185
- К.Р. Момынжанова, С.В. Павлов, Ш.П. Жұмағұлова, М.Т. Тұңғышбаев**
ГЛАУКОМАНЫ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ОПТИКАЛЫҚ-
ЭЛЕКТРОНДЫҚ САРАПТАМАЛЫҚ ЖҮЙЕНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ
МОДЕЛЬДЕРІ МЕН ПРАКТИКАЛЫҚ ІСКЕ АСЫРЫЛУЫ.....202
- Б.О. Мухаметжанова, Л.Н. Құлбаева, З.Б. Сайманова, Э.К. Сейпишева,
Б.М. Саданова**
ЗАМАНАУИ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ DOCKER
ТЕХНОЛОГИЯСЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ЖӘНЕ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ.....218
- А.Р. Оразаева, Д.А. Тусупов, А.К. Шайханова, Г.Б. Бекешова,
Ә.Д. Ғалымова**
СҮТ БЕЗІ ҚАТЕРЛІ ІСІГІ КЕЗІНДЕ БИОМЕДИЦИНАЛЫҚ
КЕСКІНДЕРІНДЕГІ ДИНАМИКАЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРДІ БАҒАЛАУҒА
АРНАЛҒАН АНЫҚ ЕМЕС САРАПТАМА ЖҮЙЕСІ.....227

Д. Оралбекова, О. Мамырбаев, А. Ахмедиярова, Д. Қасымова ҚАЗАҚ ТІЛІНДЕГІ NER ДЕРЕКТЕР ЖИНАҒЫН ҚҰҚЫҚТЫҚ САЛАДА КӨПСАНАТТЫ ЖІКТЕУ ҮШІН ПАЙДАЛАНУ: BERT, GPT ЖӘНЕ LSTM МОДЕЛЬДЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ЗЕРТТЕУІ.....	242
А. Оспанов, П. Алонсо-Жорда, Т. Тұрымбетов, К. Дүйсекеев, А. Жұмаділлаева ERP ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ЖЕТІЛДІРІЛУІ: ЗАМАНАУИ ТЕХНОЛОГИЯЛАР, МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ЖӘНЕ ГИБРИДТІ ОПТИМИЗАЦИЯ ӘДІСТЕРІ.....	259
К. Раббани, А. Бекарыстанқызы, Д. Қуанышбай, А. Шойынбек, А. Мұхаметжанов МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫ ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ REDDIT ПОСТТАРЫНДАҒЫ СУИЦИДТІК ТЕНДЕНЦИЯЛАРЫН АНЫҚТАУ.....	270
Ә. Таукенова ЖЕКЕЛЕНДІРІЛГЕН АРХИТЕКТУРА: ДИДЖИТАЛ ТЕХНОЛОГИЯЛАРМЕН ЕРЕКШЕ КЕҢІСТІКТЕР ЖАРАТУ.....	283

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

А. Абдираман, Л. Алдашева, А. Закирова, Б. Мухаметжанова, И. Орман ГЛОБАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОБИЛЬНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕТИ: ВНЕДРЕНИЕ 5G И БУДУЩИЕ ЗАДАЧИ 6G.....	5
Р.Е. Абдуалиева, Л.А. Смагулова, А.У. Елепбергенова ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SNATGPT В ПРОГРАММИРОВАНИИ.....	17
А.Б. Абен, Н.М. Жунисов, Г.Н. Казбекова, А.Н. Аманов, А.А. Абибуллаева ОБНАРУЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ГОЛОСА DEEPFAKE. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ LSTM И CNN.....	32
А.А. Айтказина, Н.О. Жумажан РАЗРАБОТКА БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА.....	49
Г.И. Акшолок, А.А. Бедельбаев, Р.С. Магазов ЗАЩИТА KUBERNETES: АНАЛИЗ УЯЗВИМОСТЕЙ, ИНСТРУМЕНТОВ И НАПРАВЛЕНИЙ НА БУДУЩЕЕ.....	66
А.Т. Акынбекова, А.А. Муханова, Salah Al-Majeed, Г.С. Алтаева ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СОЦИАЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ.....	78
К.М. Алдабергенова, М.А. Кантуреева, А.Б. Касекеева, А.Ж. Ахметова, Т.Н. Есикова ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ И ИНТЕРНЕТ-МАРКЕТИНГА В РАЗВИТИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	93
А.С. Еримбетова, М.А. Самбетбаева, Э.Н. Дайырбаева, Б.Е. Сакенов, У.Г. Бержанова СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ КАЗАХСКОГО ЖЕСТОВОГО ЯЗЫКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ.....	108

- А.Н. Жидебаева, С.Т. Ахметова, А.О. Алиева, Б.О. Тастанбекова,
Г.С. Шаймерденова**
ОБЗОР ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОСКОРБИТЕЛЬНОЙ
ЛЕКСИКИ С ПОМОЩЬЮ DATA MINING В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ....124
- К.С. Иванов, Д.Т. Тулеkenова**
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПРЕДЕЛИМОСТИ ДВИЖЕНИЯ АДАПТИВНОГО
ПРИВОДА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ВВЕДЕНИЯ
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИЛЫ СКОРОСТНОЙ СВЯЗИ.....136
- М.Н. Калимолдаев, З.Д. Орманша, К.Б. Бегалиева, А.С. Айнагулова,
А.О. Аукенова**
БЛОКЧЕЙН-МОДЕЛЬ ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ С ПОДДЕРЖКОЙ
ФЕДЕРАТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ.....151
- И. Масырова, О.К. Джолдасбаев, С.К. Джолдасбаев, А. Болысбек,
С.Т. Мамбетов**
АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ
ПРАКТИКИ И СТАЖИРОВКИ СТУДЕНТОВ В ОРГАНИЗАЦИЯХ
ВНЕ ВУЗА.....168
- А. Мименбаева, Г. Исакова, Г.К. Бекмагамбетова, А.Б. Аруова,
Е.К. Дарикулова**
РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПОЖАРОВ.....185
- К.Р. Момынжанова, С.В. Павлов, Ш.П. Жумагулова, М.Т. Тунгушбаев**
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
ВЫЯВЛЕНИЯ ГЛАУКОМЫ.....202
- Б.О. Мухаметжанова, Л.Н. Кулбаева, З.Б. Сайманова, Э.К. Сейпишева,
Б.М. Саданова**
ОПТИМИЗАЦИЯ И ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ DOCKER В
СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.....218
- А.Р. Оразаева, Д.А. Тусупов, А.К. Шайханова, Г.Б. Бекешова,
А.Д. Галымова**
НЕЧЕТКАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ
ИЗМЕНЕНИЙ В БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ОПУХОЛЕЙ
ПРИ РАКЕ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ.....227

Д. Оралбекова, О. Мамырбаев, А. Ахмедиярова, Д. Касымова ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАБОРОВ ДАННЫХ NER НА КАЗАХСКОМ ЯЗЫКЕ ДЛЯ МУЛЬТИКЛАССИФИКАЦИИ В ПРАВОВОЙ СФЕРЕ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ BERT, GPT И LSTM.....	242
А. Оспанов, П. Алонсо-Жорда, Т. Турымбетов, К. Дюсекеев, А. Жумадилаева ПРОДВИЖЕНИЕ ERP СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ.....	259
К. Раббани, А. Бекарыстанкызы, Д. Куанышбай, А. Шойынбек, А. Мухаметжанов ОБНАРУЖЕНИЕ СУИЦИДАЛЬНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В ПУБЛИКАЦИЯХ НА REDDIT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	270
А. Таукенова ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА: СОЗДАНИЕ УНИКАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	283

**Publication Ethics and Publication Malpractice
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>

ISSN 2518-1726 (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 20.03.2025.

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

20,0 п.л. Заказ 1.