

ISSN 1998-6688 (Print)
ISSN 2959-8109 (Online)

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

**HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH
TECHNICAL UNIVERSITY**

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Volume 22, Issue 3
July-September, 2025

**ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН
ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ**

**HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH
TECHNICAL UNIVERSITY**

**ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Алматы
№ 3 (74) 2025 г.

Издание зарегистрировано Министерством культуры и информации Республики Казахстан. Свидетельство о постановке на учет СМИ № 9757 – Ж от 03.12.2008 г.

Журнал зарегистрирован в Международном центре по регистрации сериальных изданий ISSN (ЮНЕСКО, г. Париж, Франция)

В журнале публикуются научные статьи на английском, казахском и русском языках по направлениям: компьютерные науки, математические науки, физические науки, нефтегазовая инженерия и геология, экономика и бизнес.

Подписной индекс – 74206

Издается с 2004 года. Выходит 4 раза в год.

УЧРЕДИТЕЛЬ
Казахстанско-Британский технический университет

ISSN 1998-6688 (Print)
ISSN 2959-8109 (Online)

© Казахстанско-Британский технический университет, 2025

Editor-in-chief – **B. Kulpeshov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, School of Applied Mathematics of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan

EDITORIAL BOARD

Section “Computer science”

- Akzhalova A.Zh.** - Candidate of Physical and Mathematical sciences, PhD, Professor, School of Information Technology and Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Pak A.A.** - Candidate of Technical Sciences, Associate professor, School of Information Technology and Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Samigulina Z.I.** - PhD, Professor, School of Information Technology and Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Ilyas Muhammad** - PhD, Professor, School of Information Technology and Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan.
- Uvalieva I.M.** - PhD, Professor at the Faculty of Computer Science, EKTU named after D. Serikbayev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Section “Mathematical Sciences”

- Kalmurzayev B.S.** - PhD, Associate professor, School of Applied Mathematics of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Sudoplatov S.V.** - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Institute of Mathematics SB RAS; Head of Department, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;
- Bazhenov N.A.** - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, Russia.

Section “Physical Sciences”

- Abdirakhmanov A.R.** - PhD, Assistant Professor JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan; University of Mons, Mons, Belgium;
- Beysen Khanov N.B.** - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dean, Professor, School of Materials Science and Green Technologies JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Laifa Boufendi** - PhD, Professor, Orlean University, France

Section “Oil and Gas Engineering and Geology”

- Ismailov A.A.** - Candidate of Technical Sciences, Dean, Professor, School of Energy and Oil and Gas Industry of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Korobkin V.V.** - Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, School of Geology of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Kang Wanli** - Professor, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, PR China;
- Sarsenbekuly B.** - PhD, Associate professor, School of Energy and Petroleum Engineering of JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Moldabaeva G.Zh.** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Petroleum Engineering of K. Turysov Institute of Geology and Petroleum Engineering, KazNTU, Almaty, Kazakhstan.

Section “Economics and Business”

- Narbaev T.S.** - PhD, Professor, Business School JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Kozhakhmetova A.K.** - PhD, Assistant Professor, Business School JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Aldashev A.** - Professor, International School of Economics JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Akhmedov E.T.** - PhD, Associate Professor, Business School, JSC “Kazakh-British Technical University”, Almaty, Kazakhstan;
- Seitkazieva A.M.** - Doctor of Economics, Professor/Business School JSC “KBTU”, Almaty, Kazakhstan;
- Gabriel Castelblanco** - PhD, Assistant-Professor, University of Florida, Florida, USA;
- Dubina I.** - Doctor of Economic Sciences, Professor, Novosibirsk National Research State University (NSU);
- Osei-Kyei Robert** - PhD, Associate Professor, University of Western Sydney, Penrith, Australia;
- Montag Josef** - PhD, Senior Lecturer, Charles University, Prague, Czech Republic..

Бас редактор – **Кулпешов Б.Ш.**, ф.-м.ғ.д., ҚР ҰҒА академигі, профессор,
«ҚБТУ» АҚ Қолданбалы математика мектебі, Алматы қ., Қазақстан

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ

«Компьютерлік ғылымдар» бөлімі

- Акжолова А.Ж.** - ф.-м.ғ.к, PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Пак А.А. - т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Самигулина З.И. - PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Pyas Muhammad - PhD, профессор, «ҚБТУ» АҚ Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Алматы қ., Қазақстан.
Увалиева И.М. - PhD, компьютерлік ғылымдар факультетінің профессоры, Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ, Өскемен қ., Қазақстан

«Математикалық ғылымдар» бөлімі

- Калмурзаев Б.С.** - PhD, қауымдастырылған профессор, «ҚБТУ» АҚ Қолданбалы математика мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Судоплатов С.В. - ф.-м.ғ.д., профессор, РҒА СБ математика институтының бас ғылыми қызметкері; Новосібір мемлекеттік техникалық университеті, кафедра меңгерушісі, Новосібір қ., Ресей;
Баженов Н.А. - ф.-м.ғ.к., РҒА СБ математика институтының аға ғылыми қызметкері, Новосібір қ., Ресей.

«Физикалық ғылымдар» бөлімі

- Әбдірахманов А.Р.** - PhD, ассистент-профессор, «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан; Монс университеті, Монс қ., Бельгия;
Бейсенханов Н.Б. - ф.-м.ғ.д., декан, профессор, Материалтану және жасыл технологиялар мектебі «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Laifa Boufendi - PhD, профессор, Орлеан университеті, Франция.

«Мұнай газ инженериясы және геология» бөлімі

- Исмаилов А.А.** - т.ғ.к., декан, профессор, «ҚБТУ» АҚ Энергетика және мұнай-газ индустриясы мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Коробкин В.В. - геол.-минерал.ғ.к., профессор, «ҚБТУ» АҚ Геология мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Канг Ванли - профессор, Мұнай инженериясы мектебі, Қытай мұнай университеті (Шығыс Қытай), Циндао қ., ҚХР;
Сарсенбекұлы Б. - PhD, қауымдастырылған профессор, «ҚБТУ» АҚ Энергетика және мұнай-газ индустриясы мектебі, Алматы қ., Қазақстан;
Молдабаева Г.Ж. - тех.ғ.д., профессор, мұнай инженериясы кафедрасы, Қ. Тұрысов атындағы геология және мұнай-газ институты, ҚазҰТУ, Алматы қ., Қазақстан.

«Экономика және бизнес» бөлімі

- Нарбаев Т.С.** - PhD, профессор, Бизнес мектебі «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Кожаметова А.К. - PhD, ассистент-профессор, Бизнес мектебі, «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Алдашев А. - PhD, профессор, Халықаралық экономика мектебі, «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Ахмедов Е.Т. - PhD, қауымдастырылған профессор, Бизнес мектебі, «Қазақстан-Британ техникалық университеті» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Сейтказиева А.М. - э.ғ.к., профессор, Бизнес мектебі «ҚБТУ» АҚ, Алматы қ., Қазақстан;
Gabriel Castelblanco - PhD, ассистент-профессор, Флорида университеті, Флорида, АҚШ
Дубина И. - э.ғ.д., профессор, Новосибирск ұлттық зерттеу мемлекеттік университеті (НМУ);
Osei-Kyei Robert - PhD, қауымдастырылған профессор, Батыс Сидней университеті, Пенрит қ., Австралия;
Montag Josef - PhD, сениор-лектор, Карлов университеті, Прага қ., Чехия Республикасы.

Главный редактор – **Кулпешов Б.Ш.**, д.ф.-м.н., академик НАН РК, профессор,
Школа прикладной математики АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

Раздел «Компьютерные науки»

- Акжалова А.Ж.** - к.ф.-м.н., PhD, профессор, Школа информационных технологий и инженерии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Пак А.А.** - к.т.н., ассоциированный профессор, Школа информационных технологий и инженерии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Самигулина З.И.** - PhD, профессор, Школа информационных технологий и инженерии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Puys Muhammad** - PhD, профессор, Школа информационных технологий и инженерии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан.
- Увалиева И.М.** - PhD, профессор факультета компьютерных наук, ВКТУ им. Д.Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Раздел «Математические науки»

- Калмурзаев Б.С.** - PhD, ассоциированный профессор, Школа прикладной математики АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Судоплатов С.В.** - д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт математики СО РАН; зав. кафедрой, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия;
- Баженов Н.А.** - к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт математики СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

Раздел «Физические науки»

- Әбдірахманов А.Р.** - PhD, ассистент-профессор АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан; Университет Монса, г. Монс, Бельгия;
- Бейсенханов Н.Б.** - д.ф.-м.н., декан, профессор, Школа материаловедения и зеленых технологий АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Laifa Boufendi** - PhD, профессор, Университет Орлеана, Франция.

Раздел «Нефтегазовая инженерия и геология»

- Исмаилов А.А.** - к.т.н., декан, профессор, Школа энергетики и нефтегазовой индустрии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Коробкин В.В.** - к.геол.-минерал.н., профессор, Школа геологии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Канг Ванли** - профессор, Школа нефтяной инженерии, Китайский нефтяной университет (Восточный Китай), г. Циндао, КНР;
- Сарсенбекұлы Б.** - PhD, ассоциированный профессор, Школа энергетики и нефтегазовой индустрии АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Молдабаева Г.Ж.** - д.тех.н., профессор, кафедра нефтяной инженерии, Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, КазНТУ, г. Алматы, Казахстан.

Раздел «Экономика и бизнес»

- Нарбаев Т.С.** - PhD, профессор, Бизнес-школа АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Кожаметова А.К.** - PhD, ассистент-профессор, Бизнес-школа АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Алдашев А.** - PhD, профессор, Международная школа экономики АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Ахмедов Е.Т.** - PhD, ассоциированный профессор, Бизнес-школа АО «Казахстанско-Британский технический университет», г. Алматы, Казахстан;
- Сейтказиева А.М.** - д.э.н., профессор, Бизнес-школа АО «КБТУ», г. Алматы, Казахстан;
- Gabriel Castelblanco** - PhD, ассистент профессора, Университет Флориды, Флорида, США.
- Дубина И.** - д.э.н., профессор, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ);
- Osei-Kyei Robert** - PhD, ассоциированный профессор, Университет Западного Сиднея, г. Пенрит, Австралия;
- Montag Josef** - PhD, сениор-лектор, Карлов университет, Прага, Чешская Республика.

МАЗМҰНЫ – СОДЕРЖАНИЕ

**1 КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ**

Aitim A.K., Toleukhan A.E., Chshir Sh.R.

Mobile technologies as a tool for increasing digital literacy and accessibility
of services in rural areas 10

Daineko Y., Mustafina A., Mukanova M., Turzhanov U., Tsoy D., Ipalakova M.

Application of immersion experience in digital educational institution: metauniversity 25

Самигулин Т.И., Маратұлы Т.

Разработка цифрового двойника процесса сборки и очистки кислой воды 36

Artykbayeva A.A., Salykova O.S., Nurmagambetova L.I.

Neural network algorithms for intelligent processing of students' reviews 49

Assymkhan N., Momynkul N., Kartbayev A.

Optimizing indoor thermal comfort prediction using machine learning models 59

Капалова Н.А., Абишева А.Ж.

Современные подходы к управлению криптографическими ключами
и применению цифровой подписи 75

Самигулина Г.А., Самигулина З.И., Бекешев Д.Д.

Разработка мультиагентной системы для интеллектуальной диагностики
промышленного оборудования 85

Ordabaeva Zh., İbrahim Rıza Hallaç, Moldagulova A.N.

Scoring cards for different types of credit products 98

Telgozhayeva F., Tyulepberdinova G., Kunelbayev M.

Modeling heating dynamics in the room using COMSOL Multiphysics 110

Sabeshuly I., Akzhalova A., Sadok Ben Yahia

Quantum-Enhanced Blockchain Security: Integrating Quantum Computing with
Network Attack Detection 123

Svambayeva A.S., Zhabagin R.N.

Ai-based solutions in agriculture: fertilizer prediction and tomato disease
detection using machine learning and computer vision 134

Джурсаев Д.Б., Уалиева И.М., Акжалова А.Ж.

Анализ эффективности трансформеров и сверточных нейросетей
для классификации заболеваний риса 149

Смурыгин В.В., Еримбетова А.С., Кучин Я., Сымагулов А.

Қашықтықтан зондтау мен компьютерлік көру технологияларына негізделген
интеллектуалды картография және факторларды тану жүйесі 161

Құсайын Д.Р., Мухамедиев Р.И., Еримбетова А.С., Кучин Я.И., Сымагулов А.

Ұшақ маршруттарын тиімділеу алгоритмін әзірлеу және енгізу 176

**2 МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

Калтаев А., Құрмансейіт М.Б., Тунгатарова М.С.

Моделирование и исследование процесса выщелачивания урана 186

Badaev S.A., Isakov A.M., Kalmurzaev B.S., Askarbekkyzy A.

A note on the structure of minimal dark ceers 199

Темешева С.М., Кадирбаева Ж.М., Аширов С.Б.

Параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеу үшін көпнүктелі
шеттік есептің шешілімділігі 210

Усманов К.И., Назарова К.Ж., Турганбаева Ж.Н.

О разрешимости нелокальной краевой задачи для интегро-дифференциального уравнения с инволюцией 221

Турғұмбаев М.Ж., Мұхамбетжан М.А., Сулейменова З.Р.

Весовые неравенства для суммы рядов по мультипликативным системам 231

Сулейменова М.У., Манапова А.Қ., Абзалиев К.Б., Абзалиева С.А., Шоманов А.С., Чен С.

Прогнозирование сердечно-сосудистого старения с применением математического моделирования 243

Байжанов Б., Тазабекова Н., Замбарная Т.

Әлсіз реттелген минималды теориялардағы айналалар 271

3 ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

Muratov M.M., Zaitsev S.I., Pshikov M.I., Guseinov N.R., Nemkayeva R.R.,

Mukhametkarimov Ye.S., Tolepov Zh.K., Akhmetsadyk D.S.

Determination of resist contrast in electron beam lithography under depth-dependent nonuniform energy deposition 280

Kadau A.T., Kalkozova Zh.K., Gritsenko L.V., Markhabayeva A.A., Abdullin Kh.A.

Influence of parameters of low-cost synthesis methods on zinc oxide morphology 290

Отунчи Е., Шонгалова А., Умирзаков А., Бондарь Е., Дмитриева Е.,

Кемелбекова А., Токмолдин Н.

WS₂ мен mхene негізінде гибридітік нанокұрылымдарды алу және олардың құрылымдық қасиеттерін зерттеу 302

Накысбеков Ж.Т., Жумадилов Б.Е., Партизан Г., Исмаилов Д.В., Грищенко В.Ф.,

Суюндыкова Г.С., Медянова Б.С., Алиев Б.А., Мерейхан Л.

Ғарыш технологиясында қолдануға арналған графен нанокұрылымдарының синтезі және трибологиялық қасиеттері 313

4 МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

Иманбаева Н.С., Тыныштыков А.А., Мусаев М.М., Таттимбетова С.Ж., Алғожаева Р.С.

Штангалық сорғы қондырғы жетегінің ваттметрограммасын есептеуді теңгеру режимдерін оңтайландыру тиімділігі 324

Jarassova T.S., Altunsoy M.

Petroleum biomarkers as indicators of oil origin and maturity in the south-eastern Precaspian Basin 340

Назирханов Э.Н.

Корреляционный анализ взаимосвязи минералогического состава и содержания меди на месторождении Бозшаколь 347

Tulepbayev K., Tulemissova Zh.

Hydrothermal alteration and mineralogical zonation at the Bozshakol porphyry copper deposit: integration of spectral, magnetic, and 3D modeling data 356

Ерболат Н.К., Тулемисова Ж.С.

Построение геологической модели коллекторов на основе комплексного анализа геолого-геофизических данных 370

5 ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС ЭКОНОМИКА И БИЗНЕС

Zhumatayeva A., Mukashev Y.

Artificial intelligence in project management: review and assessment of critical success factors 381

Kalidullin B., Samoilov A., De Marco A.

AI applications in project management: trends, challenges and future perspectives 390

CONTENTS

1 COMPUTER SCIENCE

Aitim A.K., Toleukhan A.E., Chshir Sh.R. Mobile technologies as a tool for increasing digital literacy and accessibility of services in rural areas	10
Daineko Y., Mustafina A., Mukanova M., Turzhanov U., Tsoy D., Ipalakova M. Application of immersion experience in digital educational institution: metauniversity	25
Samigulin T.I., Maratuly T. Development of a digital twin for the sour water collection and purification process.....	36
Artykbayeva A.A., Salykova O.S., Nurmagambetova L.I. Neural network algorithms for intelligent processing of students' reviews.....	49
Assymkhan N., Momynkul N., Kartbayev A. Optimizing indoor thermal comfort prediction using machine learning models	59
Kapalova N., Abisheva A. Modern approaches to cryptographic key management and application of digital signature	75
Samigulina G.A., Samigulina Z.I., Bekeshev D.D. Development of a multi-agent system for intelligent diagnostics of industrial equipment	85
Ordabaeva Zh., Ibrahim Rıza Hallaç, Moldagulova A.N. Scoring cards for different types of credit products	98
Telgozhayeva F., Tyulepberdinova G., Kunelbayev M. Modeling heating dynamics in the room using COMSOL Multiphysics	110
Sabeshuly I., Akzhalova A., Sadok Ben Yahia Quantum-Enhanced Blockchain Security: Integrating Quantum Computing with Network Attack Detection.....	123
Svambayeva A.S., Zhabagin R.N. Ai-based solutions in agriculture: fertilizer prediction and tomato disease detection using machine learning and computer vision.....	134
Jurayev D.B., Ualiyeva I.M., Akzhalova A.Zh Comparative analysis of the effectiveness of transformer and convolutional neural network architectures for automatic classification of rice leaf diseases.....	149
Smurygin V.V., Yerimbetova A.S., Kuchin Y.I., Symagulov A. Intelligent mapping and factor recognition system based on remote sensing and computer vision technologies.....	161
Kusain D., Mukhamediev R.I., Yerimbetova A.S., Kuchin Y.I., Symagulov A. Development and implementation of a route optimization algorithm for uavs	176

2 MATHEMATICAL SCIENCES

Kaltayev A., Kurmanseiit M.B., Tungatarova M.S. Modeling and study of the uranium leaching process	186
Badaev S.A., Iskakov A.M., Kalmurzayev B.S., Askarbekkyzy A. A note on the structure of minimal dark ceers	199
Temesheva S.M., Kadirbayeva Zh.M., Ashirov S.B. Solvability of a multipoint boundary value problem for loaded differential equations with a parameter	210

Usmanov K.I., Nazarova K.Zh., Turganbayeva Zh.N. On the solvability of a nonlocal boundary value problem for an integro-differential equation with involution	221
Turgumbaev M.Zh., Mukhambetzhon M.A., Suleimenova Z.R. Weight inequalities for the sum of series with respect to the multiplicative systems.....	231
Suleimenova M., Manapova A., Abzaliyev K., Abzaliyeva S., Shomanov A., Chen S. Prediction of cardiovascular aging using mathematical modeling	243
Baizhanov B., Tazabekova N., Zambarnaya T. Neighborhoods in weakly ordered minimal theories	271

3 PHYSICAL SCIENCES

Muratov M.M., Zaitsev S.I., Pshikov M.I., Guseinov N.R., Nemkayeva R.R., Mukhametkarimov Ye.S., Tolepov Zh.K., Akhmetsadyk D.S. Determination of resist contrast in electron beam lithography under depth-dependent nonuniform energy deposition	280
Kadau A.T., Kalkozova Zh.K., Gritsenko L.V., Markhabayeva A.A., Abdullin Kh.A. Influence of parameters of low-cost synthesis methods on zinc oxide morphology	290
Otunchi E., Shongalova A., Umirzakov A., Bondar E., Dmitriyeva E., Kemelbekova A., Tokmoldin N. Preparation of hybrid nanostructures based on WS ₂ and MXene and study of their structural properties.....	302
Nakysbekov ZH.T., Zhumadilov B.E., Partizan G., Ismailov D.V., Grishchenko V.F., Suyundykova G.S., Medyanova B.S., Aliyev B.A., Meirkhan L. Synthesis and tribological properties of graphene nanostructures for use in space technology	313

4 OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY

Imanbayeva N.S., Tynyshtikov A.A., Mussayev M.M., Tattimbetova S.Zh., Algozhayeva R.S. Efficiency of calculation of the wattmetrogram of the rod pump unit drive for optimizing balancing modes	324
Jarassova T.S., Altunsoy M. Petroleum biomarkers as indicators of oil origin and maturity in the south-eastern Precaspian Basin.....	340
Nazirkhanov E.N. Correlation analysis of the relationship between mineralogical composition and copper content at the Bozshakol deposit.....	347
Tulepbayev K., Tulemissova Zh. Hydrothermal alteration and mineralogical zonation at the Bozshakol porphyry copper deposit: integration of spectral, magnetic, and 3D modeling data.....	356
Yerbolat N.K., Tulemissova Zh.S. Construction of a geological reservoir model based on a comprehensive analysis of geological and geophysical data	370

5 ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС

Zhumatayeva A., Mukashev Y. Artificial intelligence in project management: review and assessment of critical success factors	381
Kalidullin B., Samoilov A., De Marco A. AI applications in project management: trends, challenges and future perspectives	390

**COMPUTER SCIENCE
КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ**

UDC 004.4
IRSTI 20.51.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-10-24>

¹**Aitim A.K.,**

Master's degree, Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0003-2982-214X,
e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz

^{1*}**Toleukhan A.E.,**

Bachelor, ORCID ID: 0009-0006-2725-2058,
*e-mail: aneltoleuhan@icloud.com

¹**Chshir Sh.R.,**

Bachelor, ORCID ID: 0009-0007-1806-3017,
e-mail: shamsudin.shirjust@gmail.com

¹International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

**MOBILE TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR INCREASING
DIGITAL LITERACY AND ACCESSIBILITY
OF SERVICES IN RURAL AREAS**

Abstract

Developing a mobile app for rural delivery is one of the most important challenges of our time. Rural residents often face difficulties in adapting to new digital technologies due to the lack of IT infrastructure, small population, and poor internet quality. This article examines the key aspects of implementing such a project, with a particular focus on creating a user-friendly and intuitive app tailored to the needs of rural users. The study highlights both challenges, including infrastructural limitations and digital literacy gaps, and opportunities, such as promoting digital inclusion and meeting the needs of rural residents. The study identifies key factors for successful implementation, such as simplifying navigation, ensuring accessibility, and taking into account the socio-economic characteristics of rural areas. By focusing on an intuitive interface and a clear structure, the project aims to bridge the digital divide, allowing rural users to enjoy modern delivery services without the barriers they face every day.

Keywords: rural areas, mobile app development, IT infrastructure, digital literacy, rural residents.

Introduction

In our age of digital technology, the development of mobile applications for the convenience of users has become an integral part of everyday life. The development of a mobile application for delivery for rural areas plays an important role in the development of digital technology and

its implementation, since the development contributes not only to the expansion of knowledge of residents, but also to the mastery of new technologies.

Rural residents are constantly faced with the problems of adapting new technologies associated with the constant growth of new information. Mobile delivery applications do not always cover all points of the city, so there is a need to create mobile applications that focus on sparsely populated regions that would be actively used by rural residents.

In many cases, it is difficult for rural residents to master the full functionality of a particular application, due to its complex design and interface. Therefore, our main task in creating such a mobile application is to develop an intuitive and simple interface to provide users with full and effective use. The main effective approach in this factor is to reduce complex tasks, and increase the simplest tasks, with unobtrusive color schemes.

The main hypotheses that were developed during the creation of this study were:

- ♦ The development of a mobile delivery application stimulates local economic growth, expands opportunities for rural entrepreneurs and increases the digital literacy of residents.
- ♦ The application with a user-friendly and intuitive interface will remove barriers to use.
- ♦ Using a mobile delivery application will allow residents of remote areas to reduce the time and cost of obtaining necessary goods, which will improve the standard of living and access to goods.

Based on these hypotheses, the following main objectives of our study were set:

- ♦ Identify approaches to simplify the lives of local residents in rural areas.
- ♦ Explore research findings to improve the digital literacy of residents in rural areas.
- ♦ Identify methods to learn to improve the local economy, such as supporting the development of local businesses by creating opportunities for farmers and producers to sell their goods through the application, expanding their market.

Research on the topic of «Empowering Rural Communities: Mobile Solutions For Delivery And Digital Literacy» mainly emphasizes how important the conditions of limited IT infrastructure in rural areas are to adapt to new technologies. As an example, the RulProvider website discusses the key aspect of creating a mobile application with a simple and intuitive interface due to low digital literacy in sparsely populated areas. Such a simple design includes a minimalist structure and basic and easy-to-read colors, which will help the user get used to the application faster [1].

Also, an important aspect is the creation of routing functionality. This takes into account the specific features of rural regions, such as the lack of accurate maps and difficult weather conditions. To solve these problems, recent studies propose solutions related to the integration of GPS and machine learning, this will allow, in conditions of weak IT infrastructure, to optimize routes easier than it is now. For example, we can take notification systems for users of such applications that will provide timely information about delivery. This is a decisive role in improving the IT infrastructure in rural areas [2].

Developing a mobile delivery application for rural areas can be useful for economic and social inclusion, with such functionality as a platform for selling local products, it will facilitate access to fresh goods. The implementation of such a platform requires sustainability, these are factors such as minimizing mobile data consumption and adding different languages.

In reviewing the literature on rural mobile app development, we identified many key aspects. For example, research by Marie Bjerede (2018) highlights the common challenges rural residents face in adopting new technologies. The researcher point out issues such as insufficient infrastructure and high costs of supporting new digital services [3].

And research by Rosa Maria Fanelli (2021) examines various mobile platforms that allow rural residents to sell and buy their goods. The author conclude that such applications significantly help increase economic activity and facilitate access to fresh and homemade goods. This highlights the relevance of creating mobile applications that focus on the basic needs of users [4].

Nikola M. Trendov, Samuel Varas and Meng Zeng (2019) also focus on the basic needs of residents, such as improving the digital literacy of rural residents. The authors write that the use and implementation of new digital technologies in rural areas requires training in basic digital skills. This

can be helped by applications that include video tutorials on the basics of digital literacy, so that users can more easily master new technologies [5]. And the key aspects of the research can be seen in Table 1.

Table 1 – Key aspects of research and functions

Study	Key aspects	Recommendations for the application
Marie Bjerede (2018)	Lack of infrastructure and high costs: the main problems in the adopting technology.	Reducing usage of mobile data, developing a robust architecture.
Rosa Maria Fanelli (2021)	Platforms for selling and buying goods in rural areas, enhancement of economic vitality in rural areas.	Setting up a platform for the marketing of local products, enhancing access to fresh produce.
Nikola M. Trendov, Samuel Varas and Meng Zeng (2019)	Raising the level of the digital literacy of people in the villages.	Inclusion of video lessons in digital literacy fundamentals.
General conclusions	Accounting in problems of IT-infrastructure, user requirements, and limitations of digital technologies.	Integrating several functionalities towards improving overall well-being of the rural population. Табл

Table 1 provides a structured overview of key research and aspects related to the development of mobile applications for rural areas. The table highlights key challenges such as insufficient infrastructure and the need for digital literacy. It also suggests solutions to improve the quality of life of rural residents. Overall, the table demonstrates the relationship between research and functional recommendations for creating an effective application.

Creating such a mobile application, which requires so many different factors, is a complex process that requires taking into account the problems of IT infrastructure in rural areas, user needs and limited digital technologies [6]. Therefore, developing such a mobile application will help improve the quality of life of rural residents, providing access to goods and services. This literature review highlights the need for continuous improvement and innovation in the development of such mobile applications to fully exploit the potential of implementing different functionalities.

Materials and methods

To develop a mobile application for rural areas, we have chosen a comprehensive methodology that includes: A mixed method of data collection, demand analysis in rural areas, testing and results illustration. This approach includes the following steps:

Formulating research questions:

- ♦ How important do you consider digital literacy education to be for schoolchildren and local residents?
- ♦ What problems do you encounter when searching for and using taxis, transportation, and delivery?
- ♦ How would you rate the idea of an online market for local goods where you could sell or buy products from local manufacturers?
- ♦ How can maps, navigation services, and online taxis affect your daily life, and what benefits do you expect from using them [7]?

Hypothesis development:

- ♦ The development of an online taxi system targeting rural areas can provide residents with access to transportation services, which will solve the problem of lack of public transport and improve mobility.

- ♦ The organization of a network of local couriers providing home delivery of goods and services can reduce time costs and increase the availability of service even in remote villages.

- ♦ The introduction of educational programs on digital literacy, including training webinars and simple instructions for working with mobile applications, will increase the trust and willingness of rural residents to use digital technologies.

- ♦ Creating a simplified application interface with a minimum number of elements and support for offline functionality (for example, the ability to place orders with a weak Internet connection) will increase usability for residents with low digital literacy [8].

- ♦ Collaboration with local manufacturers and stores to integrate their products into the app will increase economic activity in rural areas and stimulate local businesses.

Data collection methods:

- ♦ A survey of 120 respondents from various rural areas to study their needs and problems.
- ♦ Conducting focus groups to gain a deeper understanding of barriers and expectations.
- ♦ Analysis of technical documentation of existing applications operating in regions with low IT infrastructure.

- ♦ Testing the prototype on a pilot group of 50 people to evaluate the usability and convenience of the interface.

Analysis of the obtained data:

Based on the collected information, we compared the existing applications to find out their weaknesses and strengths, and then compared them. We identified conclusions based on the identified factors, such as the in-demand features and solutions to common problems in the implementation of such applications in rural areas.

Recommendations for improvement:

The results of the analysis showed that in order to create and implement a mobile delivery application for rural areas, it is necessary to consider factors such as the needs of rural residents, optimization of a simple interface, accessibility in low-level network conditions, and adding various functions for the convenience of users [9]. The percentage of readiness to use the mobile application depends on the level of digital literacy in Table 2.

Table 2 – Correlation of digital literacy with willingness to use

The level of digital literacy	Willingness to use the app (%)
Low	25
Middle	55
High	85

In order to identify potential opportunities for adaptation in conditions of low IT infrastructure of existing mobile applications, we conducted an analysis to understand the strengths and weaknesses of the implementation of such applications.

Thanks to the analysis, we came to the conclusion that in order to successfully implement the adaptation of the application for rural residents, both technical solutions and consideration of social factors, such as access to the Internet, are required. Therefore, such future projects should focus on the integration of local features to help create sustainable and in-demand services [10].

When analyzing existing solutions, materials such as UML diagrams were used, showing the external structure and operation of a mobile application. An example can be seen below in Figure 1.

This diagram shows the server part of the project, where the request from the user interface is accepted and processing begins. At this stage, the database is accessed to obtain the necessary information or update existing data. The server checks whether the requested product is in the database. If the product is in stock, the server retrieves information about its cost, characteristics, and availability in the warehouse. If the data changes (for example, adding a product to the basket), the

server updates the corresponding records in the database. And the provision of stability of operation can be seen in Figure 2.

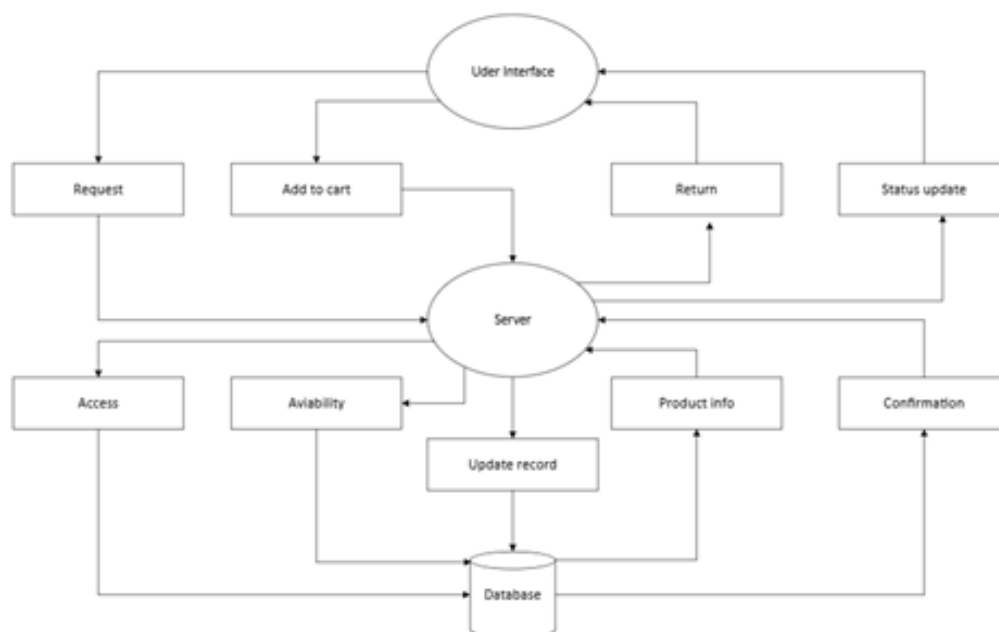


Figure 1 – Server part of the mobile application

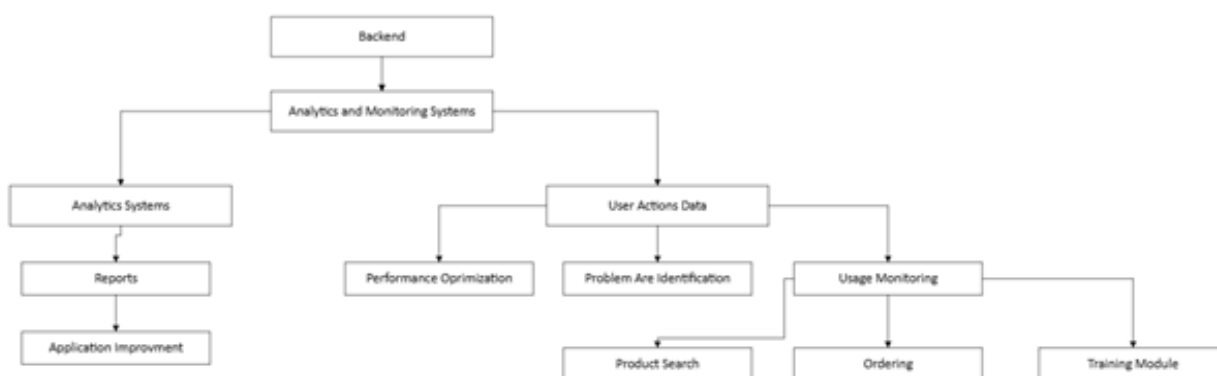


Figure 2 – Mobile application analytics and monitoring systems

The diagram demonstrates ensuring the stability of the application, where the server transmits data about the user's actions and requests to the analytics systems. This helps to control the use of functions, identify problem areas and optimize performance. Each user action (search for a product, order, completion of a training module) is recorded and analyzed. Analytics systems (for example, Firebase Analytics) generate reports that are used to improve the application.

Thus, developing a mobile application for rural areas is not an easy process, but it has great potential, since the project is aimed at improving the quality of life and developing economic and social infrastructure. The study revealed key aspects and stages of creating such an application,

including the formation of hypotheses, data collection, analysis of results and recommendations for improvement. The analysis emphasized that the successful implementation of a mobile application for rural areas requires an integrated approach that takes into account both technical and social factors. In the future, such projects can become an important step towards the digital transformation of rural areas, providing access to necessary services and promoting their sustainable development.

Results and discussion

It is convenient for users to choose from various products when they use an app for delivery. Let's take as an example the Yandex mobile app, which serves as an online store for essential goods. Using the app, one can purchase everything from snacks to gadgets right at their doorstep. This shows how well the app works in delivering all kinds of goods to people, saving them from having to go to nearby stores [11].

From the study, it was clear that most delivery services are not suited to the needs of rural areas. The situation is complicated by a number of major challenges, including sparsely populated areas without reliable roads or buildings, and the cost of delivering goods over long distances. Rural areas often face obstacles to their growth because of built-in barriers. Starting with economic problems, these relate to old-fashioned management practices and outdated basic settings of materials and technology. However, rural areas can be found to face their own set of challenges, including declining quality of life, rising unemployment, weakening social infrastructure, and deteriorating demographics [12].

It should also be kept in mind that many applications have complex layouts that are not easy for everyone to navigate, especially those who are not very tech savvy. In places far from the city, the Internet operates at the speed of a snail [13].

The survey conducted among 120 participants revealed the crucial role of digital literacy training for schoolchildren and local residents. The majority of respondents (69.2%) emphasized that this is an extremely important factor for improving the quality of life in rural areas. In addition, 16.7% of participants recognized the importance of this initiative, noting its usefulness for many users. Only 10% rated this question as having medium importance, indicating that digital literacy training is largely seen as a vital activity. Less than 5% of participants considered it insignificant, and very few completely rejected the importance of training. These results emphasize the need to introduce digital literacy training modules and illustrate their potential to increase digital awareness in the local community. The survey result on the question «How important do you think digital literacy training is for schoolchildren and local residents?» is presented below in Figure 3.

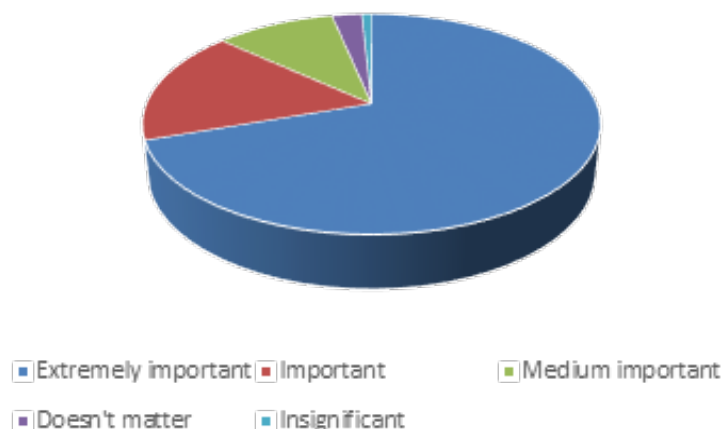


Figure 3 – Results of the survey

A survey of 120 respondents in rural areas on their use of cab, transportation and delivery services revealed some interesting trends. Some 28.3% of participants reported using these services several times a week, while 25.8% said they book or travel once a week. In addition, 15% of respondents indicated that they use these services on a daily or almost daily basis, emphasizing the significant demand for convenient travel options. On the other hand, 17.5% of participants use these services less than once a month, and 10% indicated that they never use them. This may be due to limited availability of such services in their region or lack of awareness of available options. The results for the question “How often do you have to order delivery of goods or products to your locality?” can be seen below in Figure 4.

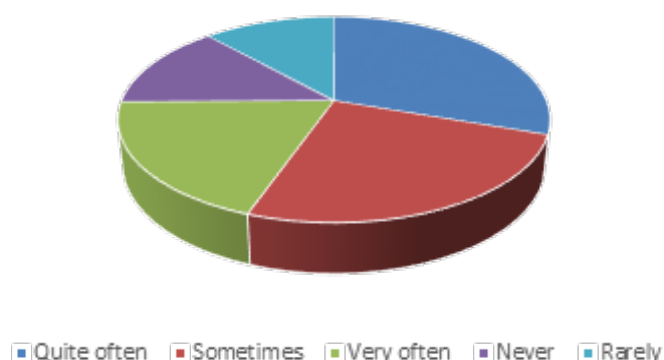


Figure 4 – Results of the survey

The Figure 4 below shows the results of a survey conducted among 120 participants on the frequency of orders for the delivery of goods or products to a locality. According to the survey data: 30% of the participants order delivery very often (several times a week), which underlines the high demand for delivery services. 25% of respondents use delivery quite often (once a week), which indicates a regular need for such services. 19.2% of the respondents' place orders 1–2 times a month, which indicates a periodic need for delivery. 11.7% of participants place orders rarely (once every few months), mostly in exceptional cases. 13.3% of respondents never order delivery, preferring other ways to purchase goods. The next result for the question “How can the availability of maps, navigation services and online taxis affect your daily life and what benefits do you expect from using them?” is presented in Figure 5 below.

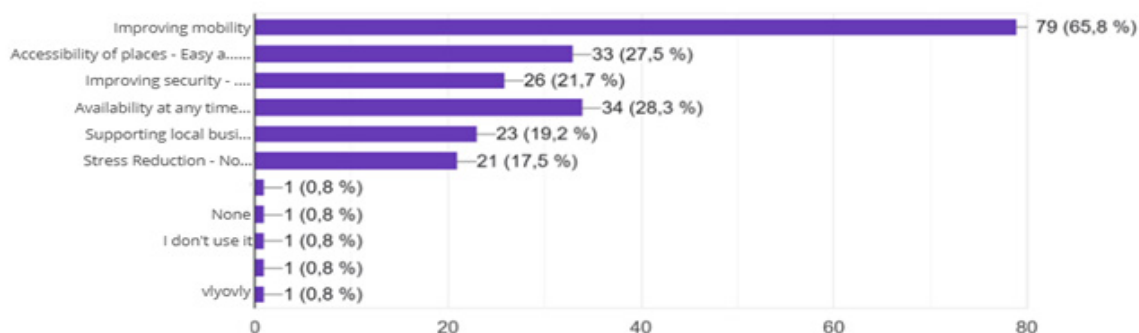


Figure 5 – Results of the survey

The survey, which was attended by 119 people (Figure 5), revealed several problems that one has to face when searching for taxis, vehicles and delivery services in rural areas. The main conclusions are as follows: Lack of affordable services: This problem was expressed by 56 participants (47.1%), who pointed to the lack of taxis or delivery services in their regions, emphasizing the need to increase the availability of services in remote areas. High cost of services: According to 58 respondents (48.7%), high prices for taxis and delivery services for regular use are a significant obstacle, indicating a demand for more cost-effective alternatives. Limited payment options: Only 9 participants (7.6%) cited the lack of cashless or convenient payment methods as a problem, indicating a smaller but important area for improvement. Lack of information: 22 respondents (18.5%) expressed difficulty tracking the order status or obtaining information about the cost of services in advance, emphasizing the need for transparency and user-friendly tracking systems. Limited coverage area: As noted by 28 participants (23.5%), this problem reflects the inability to provide services in remote or hard-to-reach places, which once again underlines the need to expand the geographical coverage of these services. These results highlight the urgent need for targeted initiatives to address these challenges, improve service quality, and improve access to vital transportation and delivery facilities in rural areas. The results confirm the importance of investing in digital infrastructure and optimizing services to address existing gaps and promote sustainable regional development. The next result for the question «What problems do you encounter when searching for and using taxis, transport and delivery?» is presented below in Figure 6.

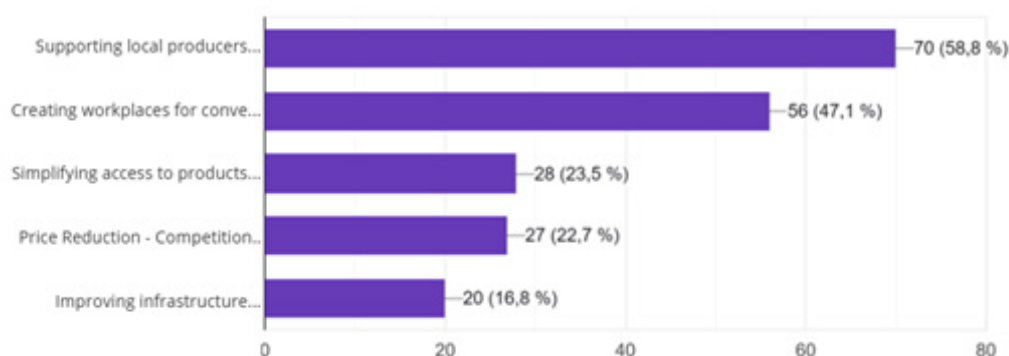


Figure 6 – Results of the survey

This chart shows the results of a survey on the potential benefits of online commerce. It visualizes the responses of respondents assessing the various positive effects that the development of online commerce could bring to the region.

Key findings:

- ♦ The most significant benefit of online commerce was identified by respondents as support for local producers. This indicates that respondents view online commerce as a tool for developing the local economy.
- ♦ The creation of new jobs was also highly rated, indicating that respondents understand that the development of online commerce can help reduce unemployment.
- ♦ Easier access to goods and lower prices were also noted as important benefits, indicating that respondents associate the development of online commerce with an improved quality of life.
- ♦ Respondents considered improved infrastructure to be a less significant benefit. This may be due to the fact that respondents believe that infrastructure development is a consequence rather than a cause of the development of online commerce [14].

All the obtained results and their significance can be seen in more detail below in Table 3.

Table 3 – The significance of the survey results

Survey Area	Significance of Results	Key Findings
Digital Literacy Training	High importance for rural development and the quality of life.	69.2% of the respondents pointed to the importance of digital literacy training. A majority consider it crucial for improving living standards in the rural setup.
Use of Transportation and Delivery Services	Demonstrates demand for services, with variable frequency of use.	28.3% of them use services several times a week, 25.8% once a week, while 15% use services almost daily. However, 10% never use them, showing the limited availability or awareness in certain regions.
Frequency of Delivery Orders	This reflects its high relevance, especially among rural areas where access to store locations is limited.	30% of order deliveries frequently, 25% on a regular basis, 19.2% do occasionally and 13.3% never. It just points to the high demand of the countryside with fewer shopping options.
Impact of Navigation and Online Taxi Services	Much better quality of life relating to improved mobility and accessibility.	65.8% of respondents mentioned improved mobility. 27.5% found it useful for accessing places, while 21.7% emphasized increased safety. This shows how important navigation and taxis are in enhancing the quality of rural life.
Problems with Taxi and Delivery Services	It pinpoints the most critical problems limiting service utilization in rural areas.	Correspondingly, 47.1% mentioned lack of affordable services, 48.7% referred to high costs, and 23.5% referred to limited coverage. These problems stress that there is a dire need for more accessible and cheap services in the remote areas.

The table below summarizes the importance of the survey results regarding the necessity of rural delivery and transportation services. It underlines important roles being played by digital literacy training, frequent demand for delivery services, and the effects of navigation and online taxi services for improving the quality of life. However, difficulties in high costs, lack of supply, and sparse service coverage remain big obstacles. The data underline the need for focused initiatives aimed at expanding access to services, improving affordability, and adapting technology to the unique needs of rural communities. All in all, the findings point to the potential role of technological innovation for sustainable rural development.

Taking into account the survey results, when developing a mobile application for delivery to rural areas, functional solutions were created for the convenience of users. For example, the integration of features such as GPS tracking, notifications, and online payment support makes the app intuitive and reliable to use [15]. The ability to track orders and interact via built-in chats minimizes risks and increases trust in the platform. A demonstration of the key modules and services of the app in code form can be seen in Figure 7.

This code snippet is an interface for choosing a fare and calling a taxi. When the user gets to this page, the fare selection screen is displayed first, where he is offered various options: “Together”, “Economy”, “Comfort” and “Minivan”. Each tariff can be selected by clicking on the corresponding button. After selecting a fare, the user can enter the departure and destination addresses, and then call a taxi by clicking on the “Call a taxi” button. When you click on the button, a message appears confirming the taxi call. If the tariff has not been selected yet, the user must first select it. If necessary,

the user can return to the previous page using the Back button. The selection of courier type and delivery procedure is shown below in Figure 8.

```

) : currentPage === 'taxi' ? (
  taxiRate ? (
    <View style={styles.taxiContainer}>
      <Text style={styles.headerTitle}>Такси {taxiRate}</Text>
      <TextInput style={styles.input} placeholder="Введите адрес отправления" placeholderTextColor="#808080" />
      <TextInput style={styles.input} placeholder="Введите адрес назначения" placeholderTextColor="#808080" />
      <TouchableOpacity style={styles.button} onPress={() => alert('Такси ' + taxiRate + ' вызван!')}>
        <Text style={styles.buttonText}>Вызвать такси</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalBackButton} onPress={() => setTaxiRate(null)}>
        <Text style={styles.minimalBackButtonText}>Назад</Text>
      </TouchableOpacity>
    </View>
  ) : (
    <View style={styles.taxiContainer}>
      <Text style={styles.headerTitle}>Выберите тариф</Text>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalButton} onPress={() => setTaxiRate('Минимум')}>
        <Text style={styles.minimalButtonText}>Минимум</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalButton} onPress={() => setTaxiRate('Эконом')}>
        <Text style={styles.minimalButtonText}>Эконом</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalButton} onPress={() => setTaxiRate('Комфорт')}>
        <Text style={styles.minimalButtonText}>Комфорт</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalButton} onPress={() => setTaxiRate('Минимум')}>
        <Text style={styles.minimalButtonText}>Минимум</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalBackButton} onPress={() => setCurrentPage('main')}>
        <Text style={styles.minimalBackButtonText}>Назад</Text>
      </TouchableOpacity>
    </View>
  )
)

```

Figure 7 – Fare selection and taxi call page

```

) : currentPage === 'delivery' ? (
  courierType ? (
    <View style={styles.deliveryContainer}>
      <Text style={styles.headerTitle}>Доставка {courierType}</Text>
      <TextInput style={styles.input} placeholder="Введите адрес отправления" placeholderTextColor="#808080" />
      <TextInput style={styles.input} placeholder="Введите адрес доставки" placeholderTextColor="#808080" />
      <TouchableOpacity style={styles.button} onPress={() => alert('Доставка оформлена!')}>
        <Text style={styles.buttonText}>Оформить доставку</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalBackButton} onPress={() => setCourierType(null)}>
        <Text style={styles.minimalBackButtonText}>Назад</Text>
      </TouchableOpacity>
    </View>
  ) : (
    <View style={styles.deliveryTypeContainer}>
      <Text style={styles.headerTitle}>Выберите тип курьера</Text>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalButton} onPress={() => setCourierType('Машина')}>
        <Text style={styles.minimalButtonText}>Машина</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalButton} onPress={() => setCourierType('Мопед/Велосипед')}>
        <Text style={styles.minimalButtonText}>Мопед/Велосипед</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalButton} onPress={() => setCourierType('Пеший')}>
        <Text style={styles.minimalButtonText}>Пеший</Text>
      </TouchableOpacity>
      <TouchableOpacity style={styles.minimalBackButton} onPress={() => setCurrentPage('main')}>
        <Text style={styles.minimalBackButtonText}>Назад</Text>
      </TouchableOpacity>
    </View>
  )
)

```

Figure 8 – Choosing the type of courier and the delivery procedure

This code creates an interface for selecting the type of courier and arranging the delivery. When going to the page, the user first selects the type of courier that will deliver: «Car», «Moped/Bike» or «On Foot». Buttons with corresponding options are available to select the type of courier. After the user has selected the desired type of courier, a form appears for entering the shipping address and delivery address. After entering the data and clicking on the «Arrange delivery» button, a message appears confirming the delivery. If the user decides to change the courier type, they can go back and choose another option. In addition, it is always possible to return to the main page via the Back button.

To sum up the code implementation, the proposed modules and services make a significant contribution to improving the quality of life in rural areas, reducing barriers to access to services and goods. The application also contributes to the development of the local community, providing people with tools for interaction, trade and training. This approach reflects a strategic focus on improving social and economic sustainability in remote communities.

The functions that are presented in the code were created in a visual version in the form of mockups, and how it should look. Also, the preferences of the survey participants, who are rural residents, were taken into account. Thanks to the survey results, a convenient design was created that meets the wishes of users.

Creating a user interface is an important part of app development, as the first impressions of users determine how they will perceive and trust the service. That is why UX is the key to creating a seamless and enjoyable user experience that can further increase the number of users many times over. At this stage, the goal was to create an intuitive interface that is accessible and convenient for rural residents with limited experience with mobile devices. To eliminate such barriers, important factors such as ease of perception of the interface and limited technical capabilities were taken into account. The application is oriented towards rural areas, and the main users are rural residents. For their convenience, the application was developed with a minimalist and clear interface, where all elements are easily distinguishable and accessible. The Figure 9 below shows the main pages that appear when entering the application.

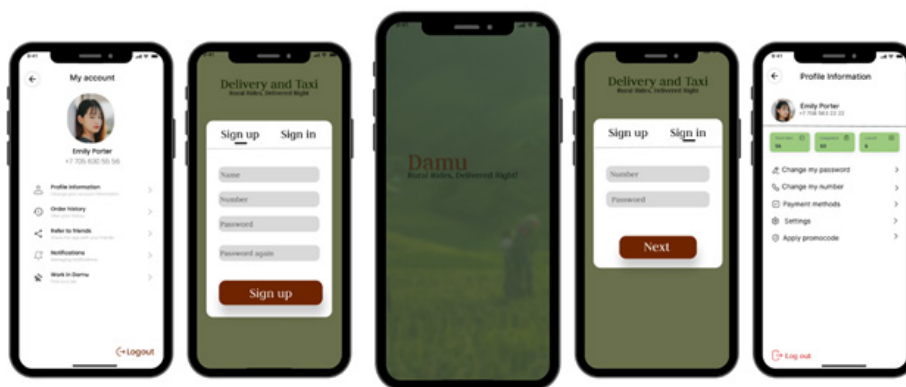


Figure 9 – Design of main pages upon entry

Figure 9 shows the main page displayed when logging into the application. In the center is the screen that users encounter when launching the application. To the right of the central layout are the registration and authorization pages, which contain fields for entering a name, phone number, and password. The interface is organized in such a way that the login process is as simple and convenient as possible, without requiring unnecessary information. Next comes the screen displaying the user account and personal data, including data such as name, phone number, order history, the ability to change the password, and other options. All pages are designed using easy-to-read and intuitive interface elements, which helps users quickly adapt to the application. Figure 10 shows the layout of the delivery module.

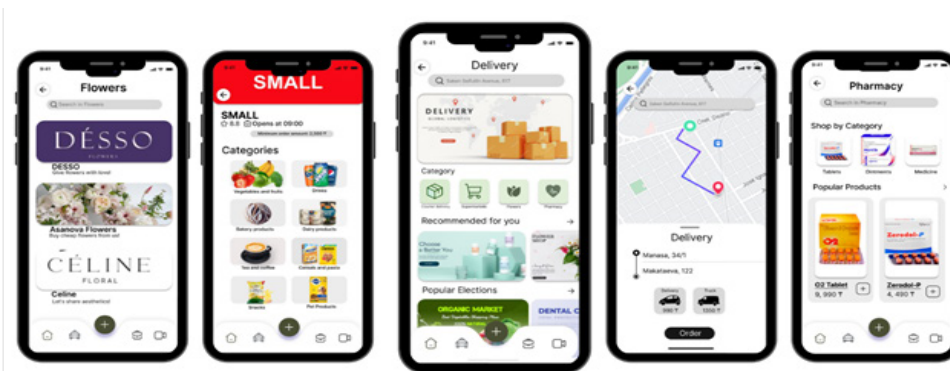


Figure 10 – Design of the Delivery module

Figure 10 shows the mobile app pages showcasing the various features and service categories in the Delivery module. The first screen displays the Flowers section, where users can browse stores offering flower products and use the convenient search bar to quickly find the desired offers. The second screen displays the Grocery category with bright and clear icons for subcategories such as vegetables, drinks and dairy products, allowing users to quickly and easily find the desired products. The third screen shows the general Delivery section, offering personalized recommendations and popular products to simplify the selection process. The fourth screen displays the delivery tracking page on a map, showing the route and the departure and destination addresses, as well as a button to confirm the order. The next screen focuses on the Pharmacy section, showcasing categories such as tablets, ointments and popular medical products with prices. All screens have a clean and minimalist design with bright and intuitive icons, which ensures a comfortable and pleasant user experience.

In conclusion, it should be noted that the development of a mobile application for the delivery of goods to rural areas is an important process for improving the quality of life and overcoming existing barriers. The results of the created study showed how significant the need for such services is among rural residents, which is confirmed by the high rates of frequency of use of delivery, as well as the importance of introducing digital education.

The proposed functional solutions, such as online payment and notifications, as well as a user-friendly interface focused on the needs of rural residents, contribute to increasing the availability and ease of use of the application. One of the most important solutions is the creation of a minimalist design that will be intuitive and easy to use for people with limited experience in mobile technologies.

Thus, the creation of a mobile application in rural areas not only helps to improve transport and trade services in rural areas, but also helps to develop local communities, providing rural residents with new opportunities for education, trade and interaction.

Conclusion

The results of this study showed that using mobile phones to improve rural livelihoods is making life easier for rural residents [16]. From this perspective, achieving sustainable rural development is not only a major challenge for rural development, but also a vision and goal for the future of rural development [17].

This study was conducted to identify key aspects that would improve the lives of rural residents. To identify these aspects, we conducted a comprehensive review of existing literature and conducted a survey among residents of rural communities. Through a rigorous review of the retrieved articles and survey results, we interpreted and analyzed solutions that could address the barriers that rural residents face every day [18].

Despite the advances that exist in the market, significant challenges remain, including low digital literacy, unreliable internet connectivity, and systemic socioeconomic limitations. Addressing these challenges requires a multifaceted approach that combines technical innovation with strategies to increase community engagement and economic participation. Developers should prioritize simplicity of design, offline functionality, and culturally inclusive features to bridge the digital divide. Looking ahead, successful rural delivery apps will need to balance technical complexity with local relevance. By developing partnerships with local businesses, leveraging new technologies like AI, and investing in community education, developers can create sustainable, scalable solutions that empower rural residents and improve their quality of life [19]. This holistic approach ensures that technological advances benefit everyone, promoting inclusion and reducing inequality between urban and rural areas.

Recommendations for further research and development

The results of the survey demonstrate that the development of mobile applications adapted to rural areas can become the basis for meeting the unique needs of their residents. Given the results of the survey, where the main desires of rural residents were identified, it is possible to create a convenient application that helps solve the problems of low availability of services, providing convenient

and cost-effective solutions for the delivery of goods and the organization of transport services. Such solutions contribute to social and economic integration, allowing residents of remote areas to actively participate in the modern digital economy. According to the survey results, it turned out that supporting local entrepreneurs through platforms for selling goods to residents of rural settlements is a good solution. In order to develop local business and expand sales markets. Improving access to goods and services not only improves the standard of living, but also helps to reduce economic inequality. The implementation and introduction of such applications helps to optimize logistics and minimize costs, which makes them sustainable and in-demand tools for long-term use [20]. Such results clearly show how important digital solutions are for the sustainable development of rural regions.

In conclusion, the creation of such applications or projects is an important step towards improving the quality of life of rural residents and their integration into the modern digital economy. The introduction of accessible and functional mobile applications in rural areas will help to reduce the significant gap between urban and rural regions. It is also a solid foundation for the further development of rural regions and increasing their competitiveness in the digital era.

REFERENCES

- 1 Simelane, P.T., Lall, M., and Kogeda, O.P. A mobile phone application for agricultural extension in marginalized rural areas of Pongola region, Zululand district, South Africa, Department of Computer Science, Tshwane University of Technology, 47(1), 2019. <https://doi.org/10.17159/2413-3221/2019/v47n1a495>.
- 2 Nazarova, E. Development of delivery applications for restaurants and stores, vc.ru, 10 April 2023. URL: <https://vc.ru/u/331647-elena-nazarova/660590-razrabotka-prilozhenii-dostavki-dlya-restoranol-i-magazinov>.
- 3 Bjerde, M. Rural Districts Face Challenges and Opportunities with Technology Access, Technology Solutions That Drive Education, 17 May 2024. URL: <https://edtechmagazine.com/k12/article/2018/01/rural-districts-face-challenges-and-opportunities-technology-access>.
- 4 Fanelli, R.M. Barriers to Adopting New Technologies within Rural Small and Medium Enterprises (SMEs), Social Sciences, 10(11), 430 (2021). <https://doi.org/10.3390/socsci10110430>.
- 5 Trendov, N.M., Varas, S., and Zeng, M., DIGITAL TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE AND RURAL AREAS, Nov. 2019. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/885161de-dccf-4589-8376-07fe37b68799/content>.
- 6 Manggat, I., Zain, R., and Jamaluddin, Z. The Impact of Infrastructure Development on Rural Communities: A Literature Review, International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, 8 (2018). <https://doi.org/10.6007/IJARBSS/v8-i1/3837>.
- 7 Siuhi, S., and Mwakalonge, J. Opportunities and Challenges of Smart Mobile Applications in Transportation, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 3, 582 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.11.001>.
- 8 Johnson, D.R., Crawford, S.P., and Palfrey, J.G., Jr. The Accountable Internet: Peer Production of Internet Governance, Virginia Journal of Law & Technology, 9, Summer 2004, University of Virginia, vol. 9, no. 9.
- 9 Buurman, B., Kamruzzaman, J., Karmakar, G., and Islam, S. Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges, IEEE Access, 8, 17179 (2020). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968057>.
- 10 Lakemond, N., and Berggren, C. Co-locating NPD? The need for combining project focus and organizational integration, Department of Management and Economics, Linköping University, SE-581 83 Linköping, Sweden.
- 11 Tavberidze, E. Big Data Opportunities on the Example of Yandex Mobile Applications, International Journal of Economic Practices and Theories, 4 (5) (2014), Special Issue on Marketing and Business Development, e-ISSN 2247–7225.
- 12 Bird, K., Hulme, D., Shepherd, A., and Moore, K. Chronic Poverty and Remote Rural Areas, SSRN Electronic Journal (2011).

13 Moss, M.L. Technology and Cities, Cityscape, 3(3), 107–127 (1998) JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/20868461>. Accessed 26 Dec. 2024.

14 Kravets, D., and Toepfl, F. Gauging Reference and Source Bias over Time: How Russia's Partially State-Controlled Search Engine Yandex Mediated an Anti-Regime Protest Event, Information Communication & Society, 25, 2207 (2021).

15 Ammattikorkeakoulu, Comparative analysis of Yandex and Google search engines. URL: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2012060611820>.

16 Mache, Z.C. Extent of use of mobile phone applications for rural development in some rural communities of Vhembe District, UnivendSpace. URL: <https://univendspace.univen.ac.za/server/api/core/bitstreams/5330f090-9dae-4d4e-a1aa-1d7b416044dc/content>.

17 Zhang, X., and Zhang, Z. How Do Smart Villages Become a Way to Achieve Sustainable Development in Rural Areas? Smart Village Planning and Practices in China, 12 Nov. 2020.

18 Mohammadzadeh, Z., Saeidnia, H.R., Lotfata, A., Hassanzadeh, M., and Ghiasi, N. Smart City Healthcare Delivery Innovations: A Systematic Review of Essential Technologies and Indicators for Developing Nations, BMC Health Services Research, 23 (2023).

19 Şahin, G. Contributions of web and mobile applications to rural development on the basis of product management: A case from GAP region, Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.

20 Dipeolu, I.O. New Approaches for Improved Service Delivery in Rural Settings, in IntechOpen eBooks, 2022.

¹Әйтiм Ә.Қ.,

магистр, ассистент-профессор, ORCID ID: 0000-0003-2982-214X,
e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz

^{1*}Төлеухан А.Е.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0006-2725-2058,
*e-mail: aneltoleuhan@icloud.com

¹Шир Ш.Р.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0007-1806-3017,
e-mail: shamsudin.shirjust@gmail.com

¹Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан

МОБИЛЬДІ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЦИФРЛЫҚ САУАТТЫЛЫҚТЫ ЖӘНЕ АУЫЛДЫҚ ЖЕРЛЕРДЕ ҚЫЗМЕТТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ

Аңдатпа

Ауылдық жерлерге жеткізуге арналған мобильді қосымша әзірлеу – қазіргі заманның маңызды міндеттерінің бірі. Ауыл тұрғындары АТ-инфрақұрылымның жоқтығынан, халықтың аздығынан және интернет сапасының төмендігінен жаңа цифрлық технологияларға бейімделуде жиі қиындықтарға тап болады. Бұл мақалада мұндай жобаны жүзеге асырудың негізгі аспектілері талқыланады, ауылдық пайдаланушылардың қажеттіліктеріне бейімделген ыңғайлы және интуитивті қосымшаны құруға ерекше назар аударылады. Зерттеу екі қиындықты да, соның ішінде инфрақұрылымдық шектеулерді және цифрлық сауаттылықтағы кемшіліктерді, сонымен қатар цифрлық инклюзияны ілгерілету және ауылдық қауымдастықтардың қажеттіліктерін қанағаттандыру сияқты мүмкіндіктерді көрсетеді. Зерттеуде навигацияны жеңілдету, қолжетімділікті қамтамасыз ету және ауылдық жерлердің әлеуметтік-экономикалық ерекшеліктерін ескеру сияқты табысты іске асырудың негізгі факторлары анықталған. Интуитивті интерфейс пен түсінікті құрылымға назар аударып, жоба ауылдық пайдаланушыларға күнделікті кездесетін кедергілерсіз заманауи жеткізу қызметтерін пайдалануға мүмкіндік беру арқылы цифрлық теңсіздікті жоюға бағытталған.

Тірек сөздер: ауылдық аймақтар, мобильді қосымшаларды әзірлеу, АТ-инфрақұрылымы, цифрлық сауаттылық, ауыл тұрғындары.

¹**Айтим А.К.,**

магистр, ассистент-профессор, ORCID ID: 0000-0003-2982-214X,

e-mail: aitim.aigerim@gmail.com

^{1*}**Толеухан А.Е.,**

бакалавр, ORCID ID: 0009-0006-2725-2058,

*e-mail: aneltoleuhan@icloud.com

¹**Шир Ш.Р.,**

бакалавр, ORCID ID: 0009-0007-1806-3017,

e-mail: shamsudin.shirjust@gmail.com

¹Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

МОБИЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ГРАМОТНОСТИ И ДОСТУПНОСТИ УСЛУГ В СЕЛЬСКИХ РЕГИОНАХ

Аннотация

Разработка мобильного приложения для доставки в сельской местности является одной из важнейших задач нашего времени. Сельские жители часто сталкиваются с трудностями в адаптации к новым цифровым технологиям из-за отсутствия ИТ-инфраструктуры, малочисленности населения и низкого качества Интернета. В этой статье рассматриваются ключевые аспекты реализации такого проекта, особое внимание уделяется созданию удобного и интуитивно понятного приложения, адаптированного под нужды сельских пользователей. В исследовании освещаются как проблемы, включая инфраструктурные ограничения и пробелы в цифровой грамотности, так и возможности, такие как содействие цифровой инклюзии и удовлетворение потребностей сельских жителей. В исследовании определяются ключевые факторы успешной реализации, такие как упрощение навигации, обеспечение доступности и учет социально-экономических характеристик сельских районов. Сосредоточившись на интуитивно понятном интерфейсе и четкой структуре, проект направлен на преодоление цифрового разрыва, позволяя сельским пользователям пользоваться современными услугами доставки без барьеров, с которыми они сталкиваются каждый день.

Ключевые слова: сельские регионы, разработка мобильных приложений, ИТ-инфраструктура, цифровая грамотность, сельские жители.

Article submission date: 27.12.2024

UDC 004.4
IRSTI 50.41.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-25-35>

¹Daineko Y.,

Associate professor, ORCID ID: 0000-0001-6581-2622,

e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

¹Mustafina A.,

Cand.Tech.Sc., ORCID ID: 0000-0002-5884-9280,

e-mail: amustafina@iitu.edu.kz

¹Mukanova M.,

Master, ORCID ID: 0000-0002-1370-271X,

e-mail: m.mukanova@iitu.edu.kz

¹Turzhanov U.,

Master, ORCID ID: 0009-0008-3891-7822,

e-mail: u.turzhanov@iitu.edu.kz

^{*1}Tsoy D.,

Master, ORCID ID: 0000-0003-0172-9760,

*e-mail: d.tsoy@iitu.edu.kz

¹Ipalakova M.,

Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852

e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

APPLICATION OF IMMERSION EXPERIENCE IN DIGITAL EDUCATIONAL INSTITUTION: METAUNIVERSITY

Abstract

The use of immersive technologies such as virtual reality (VR) and augmented reality (AR) opens vast opportunities for education by enhancing learning experiences and connecting students and teachers through the digital space. This concept is called Metauniversity. By this term the digitalized interactable copy of the learning environment is meant or a university digital twin in other words. Metauniversity reveals a great potential especially in combination with artificial intelligence technology and tools. This article explores the development of digital universities and the transformation of education and creates our own concept of Metauniversity – an innovative educational environment without borders for learning. It is shown that the concept of Metauniversity is central to this transformation, opening the way to a new era of engaging, accessible and personalized education. As technical challenges are overcome and the potential of these technologies is unleashed, the prospect of creating a global educational ecosystem that is fair, interesting and effective becomes increasingly achievable.

Keywords: Metauniversity; Immersive Technologies; Education; Analysis; Digital Education; Educational Institution.

Introduction

With advances in computing power, graphics, and sensor technologies, the capabilities of immersive systems have expanded significantly, making them more appealing to a wider audience. These are education, medicine, architecture, advertising, tourism and many other industries. Immersive technologies allow users to immerse themselves in virtual worlds or augment reality with augmented elements, creating unique and immersive experiences. Startups and large companies are actively investing in the development and promotion of immersive technologies, which contributes to

their spread and improvement [1, 2]. From an educational perspective, immersive technologies play a key role in Metauniversity's development, providing students and faculty with unique opportunities for learning, research and collaboration.

The main purpose of this article is to review, analyze and classify numerous research findings and literature related to the development of a Metauniversity using immersive technologies. A systematic review of the Metauniversity concept for the period 1997–2023 is provided. The main opportunities and limitations affecting the educational process in the present and future are considered. The own model of the IITU Metauniversity is presented.

The Agile flexible development methodology was chosen as the development methodology, as the most promising way to develop high-quality software. It is based on the use of iterative development methods with dynamic adjustment of requirements at different stages and the possibility of constant interaction between development participants. The approach will ensure high-quality software development, minimizing risks: the final result does not meet the initial requirements and delays in project completion. Primary information will be collected through surveys among users, as well as analysis of academic indicators. The data is planned to be processed using statistical methods to identify significant trends. The entire concept is implemented in the C# programming language, as well as Python. 3D models will be created using the Blender engine, scene development will be created based on the Unity 3D game engine, which allows you to develop applications for a variety of VR platforms.

Materials and methods

A Metauniversity is a concept that expands the traditional boundaries of university education through the use of digital technologies, providing a more open and accessible educational process.

Vest's work (2007) provides a comprehensive historical analysis of the American research university's evolution post-World War II, leading up to the digital age marked by the advent of the World Wide Web. He explores the dynamic interplay between governmental policies, private sector involvement, and the universities themselves, illustrating how these relationships have shaped the modern research institution. The concept of the «Metauniversity» is introduced, reflecting a transformative shift towards a more interconnected, globalized educational framework enabled by technology. This volume offers crucial insights into the forces that have molded contemporary higher education and the trajectory of university evolution in the context of societal changes and technological advancements [1].

Sheridan's work (2008) delves into the evolutionary trajectory of higher education, tracing its path from traditional university structures to the multiversity concept, and eventually to the Metauniversity framework. This progression reflects a transformative shift in educational paradigms, where the focus extends beyond conventional boundaries to embrace a more inclusive, interconnected, and technologically integrated approach. The Metauniversity concept, in particular, encapsulates a future where education transcends physical and institutional limits, fostering a global learning network that leverages digital technologies to facilitate open, collaborative, and lifelong learning opportunities. Sheridan's analysis offers a visionary outlook on the potential directions for higher education, emphasizing innovation, adaptability, and global connectivity [2].

In «The Emerging Meta University,» Vest (2008) articulates the evolution of higher education into a global, interconnected framework termed the «Metauniversity». He envisions an educational ecosystem that transcends traditional university boundaries, embracing the digital revolution to facilitate universal access to knowledge. This concept champions collaborative learning, open educational resources, and the democratization of education, leveraging technology to enable a worldwide educational exchange. Vest's insights highlight the potential of the Metauniversity to foster innovation, inclusivity, and lifelong learning, fundamentally transforming the landscape of higher education by making it more accessible, adaptive, and aligned with the digital age's demands [3].

Weber and Duderstadt's edited volume «The Globalization of Higher Education» (2012) critically examines the impact of globalization on universities worldwide. The book explores how global forces

are reshaping higher education, emphasizing the increasing interconnectedness and interdependence of academic institutions across borders. The contributors discuss various dimensions, including the mobility of students and faculty, the internationalization of curriculum, and the challenges and opportunities posed by global competition and collaboration. The text provides a multifaceted analysis of how globalization is influencing educational policies, institutional strategies, and academic practices, offering insights into the evolving landscape of higher education in a globally interconnected world [4].

Takwale (2013) presents a visionary model in «Param University: Meta University with New Education and Social Development,» proposing a framework for a Metauniversity that integrates innovative educational approaches with social development goals. This model emphasizes the role of technology in creating an adaptive, flexible learning environment that transcends traditional university boundaries, fostering a more inclusive and collaborative educational ecosystem. The concept aligns with the evolving demands of the global knowledge economy, advocating for a university structure that is responsive to societal needs, encourages lifelong learning, and leverages digital platforms to facilitate accessible, quality education for a broader community, thereby contributing to holistic social progress [5]. Kamat et al. (2013) explore the transformative potential of Massive Open Online Courses (MOOCs) in advancing higher education in India, tracing the shift from traditional university structures to the concept of a Metauniversity. Their study highlights how MOOCs can democratize education, providing widespread access to high-quality learning resources and enabling a transition towards a Metauniversity framework. This model represents an inclusive, technology-driven educational paradigm where knowledge transcends physical and institutional barriers, fostering a more collaborative, accessible, and flexible learning environment. The authors emphasize MOOCs' role in promoting lifelong learning and adapting to the changing educational landscape influenced by digital technology and global connectivity [6]. Maslovskiy and Sachenko (2015) introduce an adaptive testing system for assessing student knowledge, utilizing neural networks to tailor the difficulty of questions based on the student's performance. This innovative approach ensures that the testing process is dynamically aligned with the individual's learning pace, enhancing the assessment's accuracy and efficiency. The system's neural network algorithm analyzes response patterns to adjust the question set in real-time, providing a personalized evaluation that can more effectively gauge a student's understanding and mastery of the material. Their research represents a significant contribution to the field of educational technology, offering a sophisticated method for optimizing educational assessments through artificial intelligence [7].

The paper by Vladimirovna O.S., Stanislavovich P.G. & Maratovna N.O. presents a pioneering exploration of the metaverse's potential to revolutionize university business models [8]. Anchored in a comprehensive analysis of digital transformation trends in higher education, the authors argue that the metaverse offers an unprecedented opportunity for universities to innovate in teaching, learning, and administrative operations. Through qualitative and quantitative research methodologies, including case studies and surveys from early adopters, the study identifies key benefits such as enhanced accessibility, personalized learning experiences, and new revenue streams through virtual campus extensions. Moreover, the authors critically examine challenges such as the digital divide, privacy concerns, and the need for substantial investment in technology and training. By comparing traditional and metaverse-enhanced business models, the paper illuminates the strategic shifts necessary for universities to thrive in this emerging digital landscape. The findings suggest that while the transition to a metaverse-based model demands significant organizational change, the potential for creating more engaging, inclusive, and flexible educational environments makes it a compelling path forward for forward-thinking institutions. Suleimenova et al. (2021) present an information model designed to monitor university development effectively. This model integrates various data sources to evaluate and enhance educational quality, research output, and infrastructure growth. Its innovative framework employs computational techniques for real-time analysis, aiding decision-makers in strategic planning and operational improvements. This research contributes significantly to the enhancement of institutional assessment and the optimization of educational strategies in higher education [9]. Farber, Melton, and Alger (2020) discuss the concept of building a

Metauniversity, emphasizing a collaborative educational framework that extends beyond traditional campus boundaries. This innovative idea leverages digital technology to create a global learning network, facilitating access to diverse knowledge resources and expertise. Their vision promotes interdisciplinary integration, continuous learning, and adaptability, addressing the evolving needs of society and the global education landscape in the 21st century [10]. Ranganath (2021) introduces the concept of the Meta University as a student-centric model, emphasizing an educational framework that prioritizes the needs and experiences of students. This innovative approach advocates for a shift from traditional teaching methods to a more flexible, personalized learning environment enabled by technology. The model supports interdisciplinary studies, collaborative learning, and the integration of digital platforms, facilitating a more engaging, inclusive, and adaptable educational experience. This paradigm aims to equip students with diverse skills and knowledge, preparing them for the complexities of the modern world and fostering lifelong learning [11]. Costanza et al. (2021) propose a visionary concept of a global Metauniversity focused on steering society towards a sustainable well-being future. This innovative educational model emphasizes interdisciplinary collaboration and systemic thinking to address global challenges. It integrates diverse knowledge systems, leveraging technology to connect learners worldwide with the aim of fostering sustainable development, equity, and environmental stewardship. The authors argue that such an institution can play a pivotal role in cultivating leadership, promoting innovation, and instilling values essential for a thriving, sustainable world, thereby reshaping education to be more adaptive, inclusive, and impact-oriented [12].

Lipianina-Honcharenko et al. (2022) introduce an innovative concept for an intelligent guide system enhanced with Augmented Reality (AR) support, aiming to revolutionize user interaction in various domains such as education and tourism. This system integrates AR technology to provide real-time, contextual information, enriching the user's environmental perception and interaction. The proposed model combines AI with AR to deliver personalized, interactive experiences, facilitating deeper engagement and understanding. This research outlines the potential of combining these technologies to create advanced, user-centric systems that offer intuitive, informative, and enriched interactive experiences [13].

In «Digital Learning and Digital Institution in Higher Education,» Alenezi (2023) delves into the transformative impact of digital technologies on the higher education sector. The study, published in *Education Sciences*, volume 13, issue 1, article 88, meticulously examines the integration of digital learning environments and the evolution towards digital institutions [14]. Alenezi's research underscores the dual trajectory of digital adoption: enhancing pedagogical strategies and redefining institutional frameworks. The paper highlights how digital learning tools not only facilitate more accessible and flexible education but also demand a shift in teaching methodologies to be fully effective. Alenezi emphasizes the importance of faculty training and the development of digital competencies among educators as pivotal for maximizing the potential of digital resources. Furthermore, the study explores the concept of digital institutions, which extend beyond mere technology adoption, proposing a holistic transformation of university operations, governance, and culture to align with digital age imperatives. Alenezi's findings suggest that the successful transition to digital institutions necessitates strategic planning, investment in infrastructure, and a culture that embraces change. Despite the challenges, the potential benefits of digital learning and institutions – such as increased global accessibility, personalized learning experiences, and operational efficiencies – are highlighted as key drivers for the ongoing evolution of higher education. Through this comprehensive analysis, Alenezi contributes valuable insights into the strategic integration of digital technologies in higher education, offering a roadmap for institutions aiming to navigate the digital transformation effectively.

Shah N.U., Naeem S.B. & Bhatti R. (2023) explore the intricacies of digital data sets management within university libraries in their study published in *Global Knowledge, Memory and Communication*. The research meticulously analyzes both the hurdles and prospects that digital data management presents to academic libraries. It underscores the critical role of university libraries in navigating the digital transformation by effectively managing digital data sets, which

are pivotal for academic research and learning [15]. The study identifies key challenges in digital data management, including the need for sophisticated technical infrastructure, the development of staff competencies in data science, issues related to data privacy and security, and the complexities of data preservation and curation. Despite these challenges, Shah and colleagues also highlight the significant opportunities digital data management offers, such as enhancing research capabilities through improved data accessibility, fostering collaborative academic work, and facilitating the long-term preservation of scholarly knowledge. The authors advocate for strategic approaches to address these challenges, emphasizing the importance of investment in technology, continuous professional development for library staff, and the adoption of best practices in data governance and open access policies. Their findings contribute to a growing discourse on the evolution of university libraries in the digital age, suggesting that embracing digital data management can transform libraries into more dynamic, resource-rich environments for the academic community.

Химиця Н.О. (2023) presents a comprehensive analysis of the content of bachelor's training programs in communications at universities in the USA, as detailed in the *Вісник Харківської державної академії культури* (Bulletin of the Kharkiv State Academy of Culture), issue 64, pages 61–75. This study meticulously examines the curricular frameworks, educational strategies, and competency goals that define communications training in the US higher education context [16]. The research underscores the diverse and dynamic nature of communication studies in the US, highlighting the emphasis on practical skills, critical thinking, and digital literacy that prepare students for the rapidly evolving demands of the global job market. Химиця points out the integration of interdisciplinary approaches and the use of cutting-edge technology in teaching as key strengths of these programs. The study also addresses the challenges faced by educators in keeping the curriculum relevant to industry trends and fostering a comprehensive understanding of both traditional and digital media landscapes. Furthermore, the analysis suggests that US universities' approach to communication studies, with a focus on flexibility, innovation, and student-centered learning, serves as a model for developing effective training programs worldwide. Химиця's findings contribute valuable insights into the pedagogical practices and educational philosophies that underpin successful communications training, offering potential pathways for curriculum development and enhancement in the field of communication studies globally.

The examined literature collectively underscores the transformative potential of technology-enhanced educational models, such as Metauniversities, intelligent AR systems, and adaptive learning frameworks. These innovations are pivotal in fostering personalized, inclusive, and sustainable learning environments. They reflect a shift towards a future where education transcends traditional boundaries, embracing digital integration and global collaboration to equip learners with the skills and knowledge necessary for addressing contemporary and future challenges.

Results and discussion

The following are quantitative indicators of research in the direction of development of the concept of a Metauniversity. Figure 1 shows a chart from 2014 to 2023 with numerical values that reflect the number of studies, publications, investments, or other indicators related to Metauniversity research. The data was obtained from the Google Internet search base. We see an increase in interest or activity starting in 2014 with a value of 86,500, which peaks in 2023 with a value of 137,000. This steady increase is due to the expansion of digital technologies and increased interest in flexible and integrative educational models. Peaks in 2023 indicate an increase in research in this area and may reflect an increase in university partnerships and the introduction of Metauniversity platforms. The decline in 2022 indicates temporary difficulties, such as funding cuts or changes in education policy.

The overall increasing trend line confirms the growing relevance of Metauniversity research. Based on the diagram, it can be assumed that research in the field of Metauniversities has become more relevant and in demand over the past 10 years. The increase in indicators is associated with

the growing digitalization of education and the need to integrate resources to solve complex multidisciplinary problems.

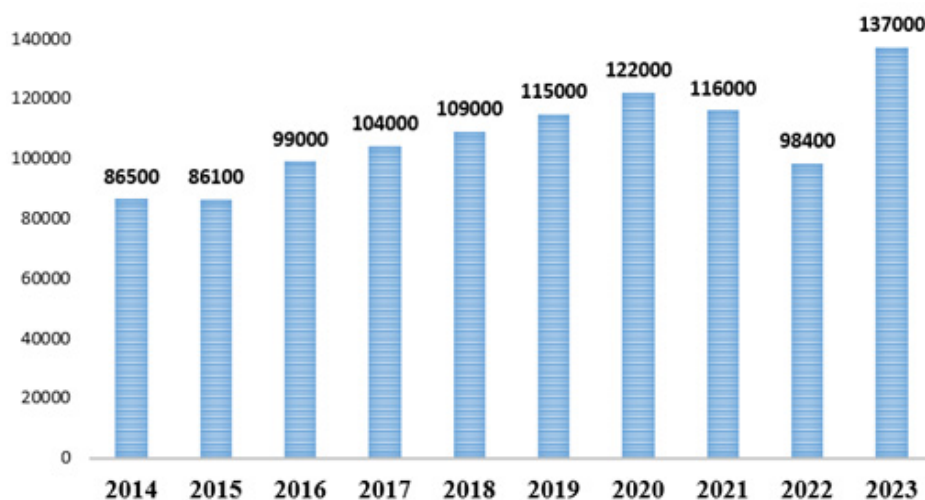


Figure 1 – Research about Metauniversity

Comparing these sources, one can see that the concept of a Metauniversity takes on different interpretations depending on the goals and context. Thus, the development of the Metauniversity concept is one of the fastest growing. Metauniversity is a new culture of learning in a virtual community. IITU, being one of the best technical universities in the Republic of Kazakhstan, offers its own model for the implementation of the Metauniversity. A Metauniversity is a university that provides advanced training of personnel through immersive learning, scientific achievements and technologies of a virtual society. The IITU Metauniversity model consists of 5 elements: technology bank, digital university, scientific knowledge base, immersive technology laboratory and immersive technology solution bank (Figure 2).



Figure 2 – Model of the IITU Metauniversity

The technology bank consists of technologies known and used at IITU, which have been studied, tested and implemented at the university. For example: virtual reality (VR), augmented reality (AR), mixed reality (MR), 360-degree video technologies and tracking and gesture technologies, artificial intelligence, blockchain technologies, etc. IITU specialists are developing instructions for the implementation and use of the technology. For example: The user is given instructions on how to immerse himself in a virtual environment using special helmets and controllers. Thus, the virtual world is accessible through VR headsets such as the Oculus Quest 2 and the Leap Motion controller provided by the Immersive Technologies Laboratory.

This image depicts a conceptual model of a Metauniversity, a university that leverages advanced technology for immersive learning, scientific achievements, and harnesses the technology of a virtual society. The model is presented as a circular flow with six main components:

- ♦ **Technology Bank:** A repository of cutting-edge technologies, including information technology, smart economy technology, green technology, and blockchain technology. For example, a blockchain-based repository that allows students and faculty to securely access cutting-edge research, such as sustainable computing platforms or IoT solutions for smart cities. IITU students are developing practical blockchain applications for tracking and managing academic credentials or optimizing energy consumption in green campus initiatives.

- ♦ **Solution Bank Immersive Technology:** This bank includes patents, articles, experiments, samples, digital doubles, and immersive technology literature. Students and researchers use immersive VR experiences to simulate surgeries, troubleshoot real-world systems, or learn about environmental disaster management scenarios.

- ♦ **Laboratory Immersive Technology (LIT):** Infrastructure that supports scientific and human resources potential within immersive technology labs. IITU has created augmented reality (AR) laboratories, called the Mixed Reality Lab, that allow students to dissect virtual organisms or create and test virtual electronic circuits.

- ♦ **Scientific Database Knowledge:** It encompasses artificial intelligence, neural networks, machine learning, as well as virtual, augmented, and augmented reality technologies, and digital footprint data. Using neural networks and machine learning, university faculty and students are creating adaptive systems to improve personalized learning and advance research in computer vision or language processing.

- ♦ **Digital University:** This component ensures the high-quality operation of all university business processes, relying on integrated IT solutions. The university aims to develop an automated student management platform that uses AI to streamline admissions, automate assessments, and provide real-time feedback via virtual assistants.

- ♦ **Meta-personnel:** Positioned centrally and depicted as a figure engaging with immersive technology, represents the human resources trained by the university in this advanced, interconnected system. Graduates trained as meta-staff are prepared to drive innovation in areas such as game development, augmented reality-based healthcare diagnostics, or AI-powered data management systems.

The model suggests an integrated, technology-focused approach to higher education, with an emphasis on cutting-edge tools and methodologies to train individuals for a digitally sophisticated world.

The Digital University is an innovative and technological educational space that promotes the development of skills necessary for the modern digital world. Each university develops its own digital university model based on its digital transformation strategy, taking into account features, goals, resources and finances. IITU its model of a digital university, consisting of control blocks, such as management of users, roles, educational content and training, reports, commercial operations, services and services.

The Metauniversity scientific knowledge base represents the accumulated body of knowledge available in the virtual world, and it can be presented in various formats. Providing access to up-to-date and reliable scientific and educational information is an important element of the Metauniversity. The first priority for IITU is the creation of an electronic repository of scientific publications, articles, books, conferences and other scientific materials from both its scientists and the world. Examples include IEEE Xplore in engineering and ACM Digital Library in computer science. Artificial intelligence will allow for quick analytical searches about scientific experiments, research results, etc.

No Metauniversity can do without its own laboratory of immersive technologies. IITU has its own Mixed Reality Laboratory, which works on projects to create virtual reality in the field of education and medicine. University guides are being created using 360-degree video technologies, providing students with the opportunity to “immerse” themselves in various places of the university without leaving their home. Virtual courses have been developed that are integrated into the Metauniversity.

The Immersive Technologies Solutions Bank is a resource or repository where IITU solutions related to the use of immersive technologies are collected and provided.

Thus, the proposed concept of the IITU Metauniversity model includes all the stages described in the literature review.

The practical significance of the Metauniversity concept is to ensure accessibility of education, personalization of the educational process, interactive interaction, development of digital competencies, flexibility and scalability of educational programs, as well as integration of virtual achievements into the real educational process. Metauniversity modernizes the educational environment, making it inclusive, relevant and oriented to the needs of modern society.

Currently, the IITU knowledge base is being updated, and a digital educational platform has been developed that allows training in a virtual format.

Conclusion

Research into the field of immersive technologies, especially considering the concept of the Metauniversity, reveals significant changes in educational approaches. This shift towards more interactive, engaging, and accessible education promises to overcome traditional barriers by offering a more personalized learning experience. By harnessing the power of virtual and augmented reality, the concept of a Metauniversity not only enriches the learning experience, but also contributes to the creation of a global educational community freed from geographical restrictions.

A systematic approach was taken to analyze studies devoted to the development of the Metauniversity using immersive technologies. The main opportunities and limitations affecting the educational process in the present and future are considered. The IITU Metauniversity’s own model is presented. The scientific novelty of the article lies in creating its own innovative educational environment without borders for learning using the latest developments in the field of artificial intelligence and digital transformation of education.

With the continuous evolution of technology, we are entering a future where the differences between the physical and digital educational spaces become increasingly blurred. The Metauniversity concept plays a key role in this revolution, promising a new era of exciting, inclusive and personalized education. As we solve technical problems and embrace the capabilities of these technologies, the prospect of creating a global educational environment that is equitable, engaging, and effective becomes increasingly real.

Information on funding

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23484442).

REFERENCES

- 1 Vest, C.M. The American research university from World War II to world wide web: Governments, the private sector, and the emerging meta-university. Vol. 1. Univ of California Press (2007).
- 2 Sheridan, E.P. From university to multiversity to meta-university (2008).
- 3 Vest, C.M. The Emerging Meta University. In: Global Strategies for Emerging Universities. Part III. pp. 217–230 (2008).
- 4 Weber, L.E., Duderstadt, J.J. (Eds.). The Globalization of Higher Education. Economica (2012).
- 5 Takwale, R. Param University: Meta University with New Education and Social Development (2013).
- 6 Kamat, R., Keleher, P., Patil, A., Pujar, S. M. Promulgation of higher education in India: From university to meta university via massive open online courses (MOOCs). In: Proc. IETEC'13 Conference (2013).
- 7 Maslovskiy, S., Sachenko, A. Adaptive test system of student knowledge based on neural networks. In: IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Warsaw, Poland, pp. 940–944 (2015). <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2015.7341442>.
- 8 Vladimirovna, O.S., Stanislavovich, P.G., Maratovna, N.O. Metaverse as a new university business model. In: Ufa Humanitarian Scientific Forum. p. 68 (2020).
- 9 Suleimenova, L., Rakhmetullina, S., Denisova, N., Krak, I., Aitmukhanbetova, E. Information Model for Monitoring the Development of the University. International Journal of Computing, 20 (2), 201–210 (2021). <https://doi.org/10.47839/ijc.20.2.2167>.
- 10 Farber, D.L., Melton, D., Alger, M. Building a Meta-University. Bridge, 16, 1–16 (2020).
- 11 Ranganath, H.A. Meta University: a student-centric model. CURRENT SCIENCE, 121 (7), 882–888 (2021).
- 12 Costanza, R., Kubiszewski, I., Kompas, T., Sutton, P. C. A global metauniversity to lead by design to a sustainable well-being future. Frontiers in Sustainability, 2, art. 653721 (2021).
- 13 Lipianina-Honcharenko, K., Savchyshyn, R., Sachenko, A., Chaban, A., Kit, I., Lendiuk, T. Concept of the Intelligent Guide with AR Support. International Journal of Computing, 21 (2), 271–277 (2022). <https://doi.org/10.47839/ijc.21.2.2596>.
- 14 Alenezi, M. Digital learning and digital institution in higher education. Education Sciences, 13 (1), art. 88 (2023).
- 15 Shah, N.U., Naeem, S.B., Bhatti, R. Digital data sets management in university libraries: challenges and opportunities. Global Knowledge, Memory and Communication (2023).
- 16 Khimitsa, N. O. Analysis of the Content of Bachelors' Training in Communications at the Universities of the USA. Visnyk Kharkivskoi derzhavnoi akademii kultury, 64, 61–75 (2023).

¹**Дайнеко Е.,**
қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0001-6581-2622,
e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz

¹**Мустафина А.,**
т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-5884-9280,
e-mail: amustafina@iitu.edu.kz

¹**Муканова М.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0002-1370-271X,
e-mail: m.mukanova@iitu.edu.kz

¹**Туржанов Ю.,**
магистр, ORCID ID: 0009-0008-3891-7822,
e-mail: u.turzhanov@iitu.edu.kz

^{*}¹**Цой Д.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0003-0172-9760,
^{*}e-mail: d.tsoy@iitu.edu.kz

¹**Ипалакова М.,**
қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852
e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы қ., Қазақстан

ЦИФРЛЫҚ БІЛІМ БЕРУ МЕКЕМЕСІНДЕ ИММЕРСИОНДЫҚ ТӘЖІРИБЕНІ ҚОЛДАНУ: МЕТАУНИВЕРСИТЕТ

Аңдатпа

Виртуалды шындық (VR) және толықтырылған шындық (AR) сияқты иммерсивті технологияларды пайдалану оқу тәжірибесін жетілдіруге және студенттер мен оқытушыларды цифрлық кеңістік арқылы өзара байланыстыруға мүмкіндік береді. Бұл тұжырымдама Метауниверситет деп аталады. Бұл термин оқу ортасының цифрлық, интерактивті көшірмесін немесе университеттің «цифрлық егізін» білдіреді. Мақалада цифрлық университеттердің дамуы мен білім берудің трансформациясы қарастырылып, шекарасыз оқу мүмкіндігін ұсынатын инновациялық білім беру ортасы – Метауниверситет тұжырымдамасы жасалған. Метауниверситет тұжырымдамасы тартымды, қолжетімді және дербестендірілген білім берудің жаңа дәуіріне жол ашатын осы трансформацияның өзегіне айналады. Техникалық қиындықтарды жеңіп, осы технологиялардың әлеуетін іске асырған сайын, әділ, тартымды және тиімді білім берудің жаһандық экожүйесін құру көзқарасы барған сайын қолжетімді бола түседі.

Тірек сөздер: Метауниверситет, иммерсивті технологиялар, білім, талдау, сандық білім беру, білім беру мекемесі.

¹Дайнеко Е.,
ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0001-6581-2622,
e-mail: y.daineko@iitu.edu.kz
¹Мустафина А.,
к.т.н., ORCID ID: 0000-0002-5884-9280,
e-mail: amustafina@iitu.edu.kz
¹Муканова М.,
магистр, ORCID ID: 0000-0002-1370-271X,
e-mail: m.mukanova@iitu.edu.kz
¹Туржанов Ю.,
магистр, ORCID ID: 0009-0008-3891-7822,
e-mail: u.turzhanov@iitu.edu.kz
*¹Цой Д.,
магистр, ORCID ID: 0000-0003-0172-9760,
*e-mail: d.tsoy@iitu.edu.kz
¹Ипалакова М.,
ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-8700-1852,
e-mail: m.ipalakova@iitu.edu.kz

¹Международный университет информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЫТА ПОГРУЖЕНИЯ В ЦИФРОВОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ УЧРЕЖДЕНИИ: МЕТАУНИВЕРСИТЕТ

Аннотация

Использование иммерсивных технологий, таких как виртуальная реальность (VR) и дополненная реальность (AR), открывает огромные возможности для образования, улучшая учебный опыт и соединяя студентов и преподавателей через цифровое пространство. Эта концепция называется Метауниверситетом. Под этим термином подразумевается цифровая интерактивная копия среды обучения или, другими словами, цифровой двойник университета. В статье рассматривается развитие цифровых университетов и трансформация образования, а также создается собственная концепция Метауниверситета – инновационной образовательной среды без границ для обучения. Показано, что концепция Метауниверситета занимает центральное место в этой трансформации, открывая путь к новой эре увлекательного, доступного и персонализированного образования. По мере преодоления технических проблем и раскрытия потенциала этих технологий перспектива создания глобальной образовательной экосистемы, которая будет справедливой, интересной и эффективной, становится все более достижимой.

Ключевые слова: Метауниверситет, иммерсивные технологии, образование, анализ, цифровое образование, образовательное учреждение.

Article submission date: 21.05.2024

УДК 004.896
МРНТИ 28.23.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-36-48>

¹Самигулин Т.И.,
PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0001-9963-6719,
e-mail: t.samigulin@kbtu.kz
^{1*}Маратұлы Т.,
магистрант, ORCID ID: 0009-0001-3850-6221,
*e-mail: t.maratuly@kbtu.kz

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА СБОРКИ И ОЧИСТКИ КИСЛОЙ ВОДЫ

Аннотация

В нефтегазовой отрасли сбор и очистка кислой воды при дистилляции сырого газа является важным технологическим процессом. Оптимальное управление данным процессом позволит повысить эффективность производства, снизить экологические выбросы кислот и углекислого газа в окружающую среду и рациональнее использовать природные ресурсы на фоне растущих потребностей нефтегазовой индустрии. Данная работа посвящена проектированию цифрового двойника с использованием программного обеспечения компании Honeywell Unisim Design. Основное внимание уделено разработке и внедрению системы управления с разделением диапазона (англ. split-range control) в рамках динамической модели. Произведен анализ разработанной модели с историческими данными, где проверена достоверность модели. Разработана стратегия управления для промышленного контроллера С300 и HMI-интерфейс для операторов с целью интеграции цифрового двойника с распределенной системой управления Experion PKS. Цифровой двойник открывает новые возможности для создания и проверки новых схем управления, оптимизации параметров и настройки системы безопасности. По результатам опросов клиентов компании Honeywell внедрение цифровых двойников позволяет сократить капитальные затраты на проектирование более чем на 10%, сократить время разработки на 10% и увеличить производительность завода на 3–8 %.

Ключевые слова: цифровой двойник, нефтяная промышленность, управление с разделением диапазона, сложный объект, моделирование, Unisim Design, распределенная система управления, Experion PKS.

Введение

На сегодняшний день нефтегазовая отрасль является одной из самых сложных и опасных сфер, связанных с высоким риском для жизни сотрудников [1]. Дистилляция является одним из основных технологических процессов в нефтегазовой промышленности [2] и используется для разделения природного или попутного газа на его основные компоненты [3]. Процесс перегонки газа основан на разделении углеводородов на фракции при нагреве, так как каждые компоненты имеют свою температуру кипения [3]. Он широко используется в нефтегазовой промышленности для очистки газа от таких примесей, как сероводород (H_2S) и углекислый газ (CO_2) [4], которые токсичны для живых организмов и вызывают коррозию трубопроводов, оборудования и технологических установок [5]. Под кислой водой понимают поток жидкости, который содержит кислые газы H_2S и CO_2 , полученный на разных этапах, начиная от добычи и заканчивая очисткой сырой нефти [6]. Для контроля за процессом по сбору и очистке кислой воды требуется высокая точность и оперативное реагирование на любые изменения параметров, чтобы предотвратить и избежать аварийных ситуаций, обеспечив безопасность. В статье рассматривается проектирование цифрового двойника технологического процесса сбора и очистки кислой воды с использованием программного обеспечения компании Honeywell Unisim® Design (Honeywell, США) и внедрением системы раздельного управления и подклю-

чения модели к распределенной системе управления Honeywell Experion Process Knowledge System® (PKS).

Под фразой «цифровой двойник» подразумевается виртуальная копия или модель любого реального физического объекта или процесса, который получает данные в реальном времени с промышленного оборудования [7].

Цифровое проектирование используется для оптимизации предприятий, получения данных с технологического процесса и предсказания поведения объектов. Статьи [8, 9] посвящены моделированию и симуляции химических процессов с применением программного продукта «Honeywell Unisim Design R451». В первой работе рассматривается производство серной кислоты с использованием технологии двойной абсорбции. Авторы создали двойник технологического процесса получения серной кислоты с учетом термодинамических свойств и тепловых потерь. Результаты моделирования цифровой модели были проверены на основе реальных данных завода, а точность вычисления составила 97%, что делает эти данные пригодными для использования в других работах. Как итог данная модель показала высокую эффективность, где выбросы SO_2 составили 140 частей на миллион (англ. ppm), а большая часть энергии от реакций была восстановлена с помощью теплообменников и использована для повышения энергоэффективности.

В работе [9] было проведено моделирование процесса газификации древесной биомассы для получения синтезированного газа. Целью исследования было разработать такую модель газификации, которая снизит содержание тяжелых соединений, таких как смолы, и оптимизировать энергетические затраты. В качестве объекта исследования авторы выбрали древесную биомассу трех видов (Cooktown Ironwood, Melville Island Bloodwood, Darwin Stringybark) из региона Западной Австралии. В результате была разработана новая конфигурация процесса газификации, в которой тепло от высокотемпературной стадии используется для поддержания низкотемпературной стадии, минимизируя внешние энергетические затраты. Отдельным вкладом считается использование возобновляемых источников энергии, таких как древесная биомасса, для регионов с высокой стоимостью электроэнергии. Результатом исследования было получено, что максимальная молярная доля CO достигала 13,2% при 1200 °C, а H_2 – 35,2% при 600 °C, что является хорошим результатом.

Помимо программного продукта «Unisim Design», существуют и другие решения для цифрового моделирования сложных объектов. Так, в работах [10–14] в качестве программного продукта для симуляции химических процессов был использован «Aspen HYSYS». В научной статье [10] рассматривается разработка модели отрицательных выбросов CO_2 на электростанции, которая использует газифицированный осадок сточных вод в качестве основного топлива. Программные продукты «Aspen Plus», «Aspen HYSYS» и «Ebsilon» были применены для моделирования и сравнения термодинамических характеристик системы. Общий КПД системы составил от 43% до 55% в зависимости от используемого топлива и программного обеспечения. Работа демонстрирует интеграцию биотоплива и CCS для достижения отрицательных выбросов CO_2 , что является относительно новой концепцией в сфере энергетики. Недостатком звеном данной работы является отсутствие экспериментальных данных для валидации моделей.

В научной работе [11] смоделирован и оптимизирован процесс аминного улавливания CO_2 на основе данных из мусоросжигательной установки «Fortum» в Норвегии, изучены такие параметры, как эффективность абсорбции, минимальная разница температур в теплообменнике и высота упаковки в абсорбере. Методы «Enhanced Detailed Factor» (EDF) и «Power Law» были использованы для оценки затрат на оборудование и эксплуатацию, основанные на зависимостях между стоимостью и производительностью оборудования. Авторами была выявлена оптимальная минимальная температура в 15 °C при которой минимальная стоимость улавливания CO_2 составила около 36.7 евро, оптимальная высота упаковки рассчитана в 19 метров, а эффективность улавливания – 87%. Из ключевых объектов были смоделированы: абсорбер, десорбер, теплообменники, насосы и вентиляторы.

В отличие от улавливания углекислого газа, в статье [12] исследуется процесс производства метилхлорида, его безопасность, энергетическая и экологическая эффективность на базе модели «Aspen HYSYS». Была разработана симуляционная модель производства метилхлорида посредством хлорирования метанола, проведен анализ энергопотребления с добавлением в проект двух теплообменников, которые позволили снизить потребление энергии на 36%. Была сокращена стоимость продукции на \$2.78 за тонну с периодом окупаемости 0.63 года. С экологической точки зрения было выделено уменьшение выбросов парниковых газов на 26% и соответствующего углеродного налога на него. Новизной данной работы является интеграция «Aspen HYSYS» и «ALOHA» в одну платформу для создания безопасных, энергоэффективных и экономичных химических процессов.

В исследовательской работе [13] программное обеспечение «Aspen Hysys» использовалось для поиска оптимального отношения пара к биомассе и рабочей температуры газификатора с кипящим слоем для получения синтезированного газа высшего качества. Были получены приемлемые настройки температуры (700–800 °C и соотношение пара/биомассы (0,2–0,3)). Данное исследование впервые выполнено для исследования переработки сельскохозяйственных отходов.

Статья [14] посвящена исследованию трехфазного горизонтального сепаратора в программном обеспечении «Aspen Hysys» с целью поиска взаимосвязей основных параметров объекта управления. Во время исследования авторы смоделировали процесс разделения углеводородной смеси на примере резервуарных жидкостей, характерных для нигерийских месторождений. Для расчетов было использовано уравнение состояния Пенга-Робинсона, а результаты были сравнены с такими продуктами, как «CHEMCAD» и «Unisim». В итоге были выявлены следующие взаимосвязи: с увеличением давления снижается молярный поток газа и увеличивается молярный поток нефти, а повышение температуры приводит к росту молярного потока газа, однако снижается молярный поток нефти. Найдены оптимальное рабочее давление 8000 кПа и температура 43 °C, обеспечивающие максимальную эффективность сепарации.

Авторы статьи [15] занимались разработкой и улучшением процесса дегидрирования изопропилового спирта в ацетон с использованием программы для симуляции химических процессов «CHEMCAD». Были смоделированы реакторы, теплообменники, компрессоры, внесены изменения в условия работы танка, что снизило потери ацетона и позволило дополнительно использовать полученный водород. Преимуществом данного процесса является его экологичность. Производство ацетона получается без выбросов химических отходов, путем снижения потери продуктов и повышения КПД посредством оптимизации основных технологических параметров.

Цифровой двойник также может быть использован для тестирования. Так, в работе [16] была проведена разработка и проектирование оборудования с использованием цифрового двойника и виртуального пуска для тестирования оборудования перед его физической реализацией. Работы были проведены в сотрудничестве с Siemens PLM/Factory Automation и производителем машиностроительного оборудования на реальном бизнес-кейсе. Согласно результатам исследования, предложенный метод проектирования способен сократить время разработки на 75% и улучшить общее качество продукта до 47%, хотя эти показатели могут варьироваться в зависимости от сложности машины. Использование виртуального пуска позволило значительно сократить время на тестирование и настройку машины, а внедрение цифрового двойника повысило качество и точность проектирования, позволив избежать ряда ошибок до физического производства.

Материалы и методы

Процесс сбора и очистки кислой воды является промежуточным этапом в дистилляции сырого газа на нефтеперерабатывающих заводах. Он состоит из трех основных технологических установок: трехфазного горизонтального сепаратора, абсорбера и резервуара. Зна-

чально поток топливного газа высокого давления, поток кислой воды с жидкими углеводородными примесями поступает в трехфазный сепаратор. Из-за разности плотностей разделенная нефть поднимается на поверхность воды, затем переливается через перегородку и выходит из сепаратора по трубопроводу. Разделенная от углеводородов кислая вода направляется на следующую установку абсорбера. Давление внутри сепаратора поддерживается с помощью двух клапанов PV-001 и PV-002, которые регулируют расход газа на входе и выходе с установки. Первый клапан отвечает за регулирование потока топливного газа высокого давления в сепаратор, увеличивая давление в установке. Второй клапан устанавливается на выходной трубопровод и уменьшает давление в установке. Уровень воды в сепараторе контролируется с помощью уровнемера и клапана LV-001.

Изолированная кислая вода со дна главного отсека через клапан LV-001 поступает в верхнюю секцию отдувочной колонны, содержащей 25 ситчатых тарелок. Кислая вода подвергается отдувке, подавая топливный газ низкого давления в нижнюю часть колонны, поглощая кислые компоненты. Процент содержания воды в колонне растет по мере прохождения жидкости по каждой тарелке. На данном этапе вода разделяется на два компонента: очищенная вода и отдувочный газ. Первый компонент направляется в танкер, а второй направляется в другую отдувочную колонну. Так как работа связана с очисткой воды, описание и реализация обработки отдувочного газа отсутствуют.

Очищенная вода поступает в горизонтальный резервуар для скапливания и удаления остаточных газов. Уровень воды в танкере измеряется уровнемером и поддерживается благодаря управляющему клапану LV-003 на выходе. Давление в сепараторе контролируется индикатором давления. Газ выводится с помощью эжектора. Процент содержания воды в итоге должен составлять более 98%. Рисунок 1 демонстрирует блок-диаграмму технологического процесса.

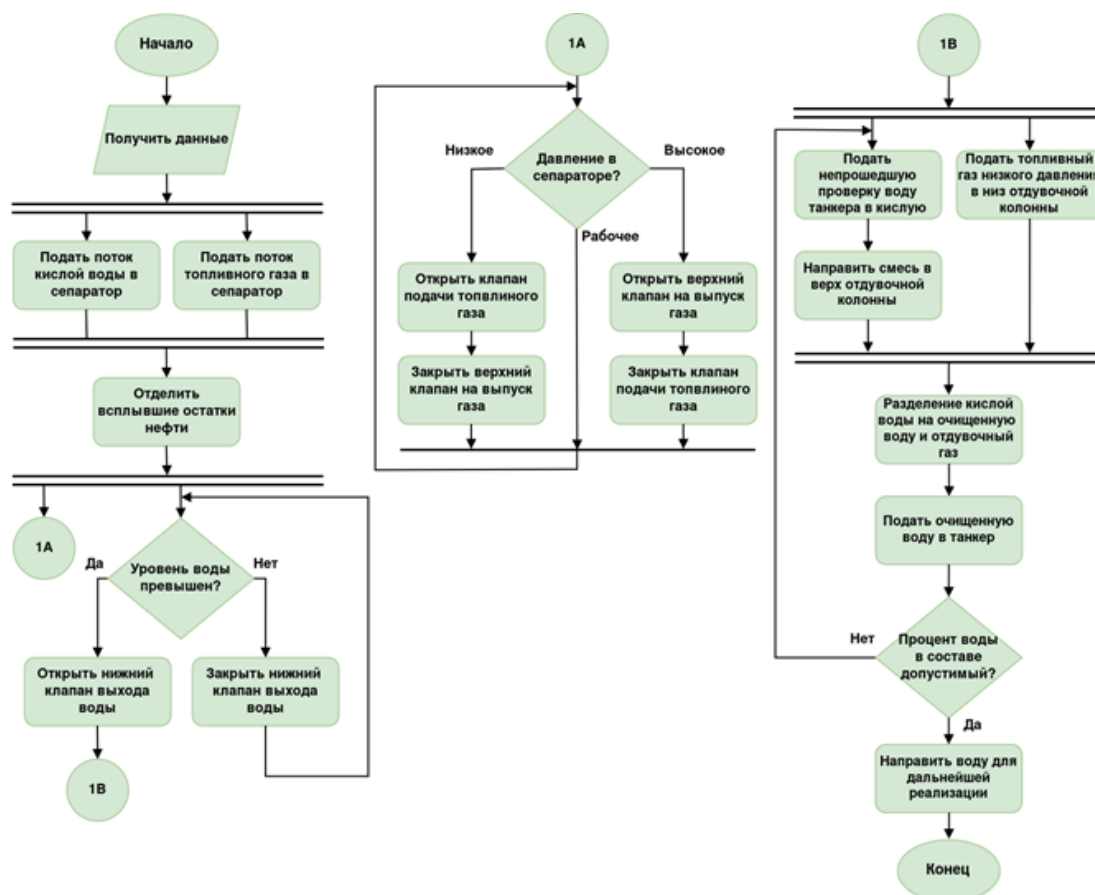


Рисунок 1 – Блок-диаграмма сбора и очистки кислой воды

Реализация раздельного управления

Управление с разделением диапазона (с англ. Split-range control) – это метод управления, согласно которому один регулятор управляет несколькими исполнительными механизмами [17, 18], например, несколькими клапанами, заслонками, двигателями и т.д. Как правило, на вход регулятора в качестве желаемого значения (с англ. SP, Setpoint) и текущего значения (с англ. PV, Process Value) подается одна переменная, а выходное значение (с англ. OP, Output) регулятора разделено на диапазоны по установленному правилу, где каждый диапазон используется для управления конкретным исполнительным механизмом. Рисунок 2 демонстрирует применение раздельного управления для контроля давления в сепараторе.

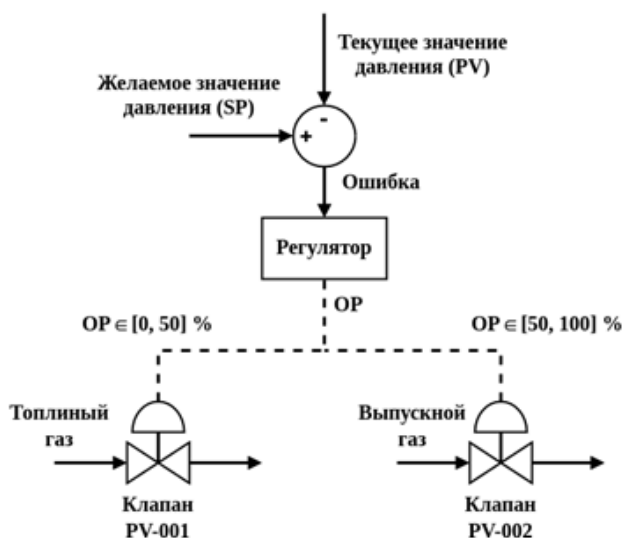


Рисунок 2 – Раздельное управление для поддержания давления в сепараторе

Разница между текущим значением (PV) и желаемым значением (SP) давления в сепараторе направляется в регулятор в виде ошибки рассогласования. На основе ошибки высчитывается выходное значение регулятора (OP). Далее, на основе выходного значения регулятора происходит управление двух клапанов (PV-001 и PV-002). Значение регулятора в интервале от 0 до 50% управляет положением клапана на подачу топливного газа высокого давления (PV-001) в сепаратор, в то время как значение от 50 до 100% задает поведение клапана на выпуск газа с сепаратора (PV-002). Рисунок 3 детально описывает поведение каждого из клапанов.

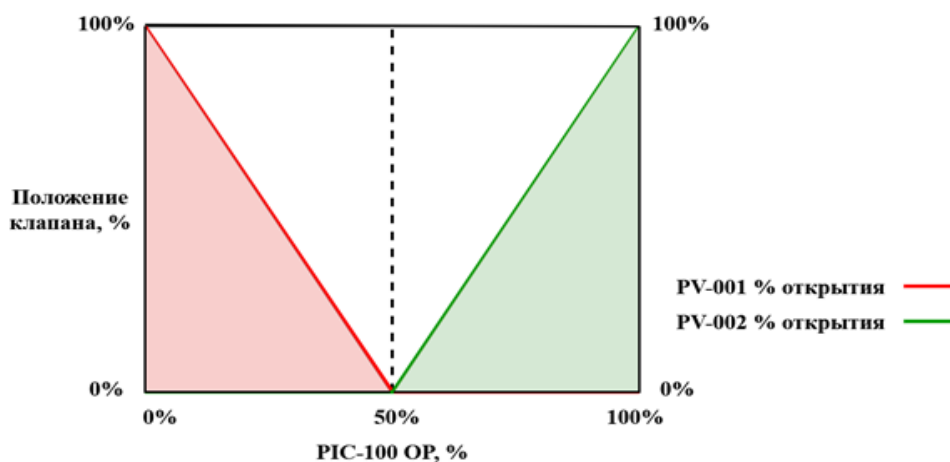


Рисунок 3 – Положение клапанов на основе значения регулятора PIC-100

Выходное значение регулятора PIC-100 влияет на положение клапанов PV-001 и PV-002. Если значение регулятора на выходе составляет 0%, то клапан на подачу топливного газа должен быть полностью открыт, в то время как 50% ОР приводит клапан к полному закрытию. Клапан на выпуск газов из сепаратора PV-002 работает по следующему правилу: 50% значения регулятора соответствует полному закрытию, а 100% означает, что клапан должен быть полностью открыт. Режим работы регулятора «прямой», потому что текущее значение давления PV должно напрямую менять значение ОР регулятора. Низкое значение ОР говорит о том, что давление в сепараторе низкое и нужно его увеличить, открыв клапан на подачу топлива высокого давления, а если давление высокое, т. е. значение ОР больше 50%, то нужно закрыть клапан на подачу топлива и открыть клапан на выпуск газов из системы. Математически поведение двух клапанов от параметра регулятора ОР можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} PV-001_{OP \in [0, 50]} &= -2 \cdot OP + 100 \\ PV-002_{OP \in [50, 100]} &= 2 \cdot OP - 100, \end{aligned}$$

где ОР – выходное значение регулятора, %,

PV-001 – положение клапана подачи топлива высокого давления, %,

PV-002 – положение клапана выпуска газа, %.

Стандартное управление регулятором и управление с разделением диапазона для регулирования параметров сложных объектов реализовано в двух разных ситуациях: напрямую в «Honeywell Unisim Design» и в распределенной системе управления «Honeywell Experion PKS». Experion Process Knowledge System (PKS) – это интеллектуальная платформа управления производственными процессами, разработанная компанией «Honeywell», объединяющая распределенную систему управления и систему диспетчерского контроля [19].

Моделирование цифрового двойника процесса очистки кислой воды

В «Unisim Design» для расчета термодинамических и транспортных свойств веществ используются два понятия: пакет свойств (от англ. Property package) и пакет жидкости (от англ. Fluid package). Пакет свойств – это модель, которая описывает, как будут вычисляться свойства веществ [20]. Пакет жидкости, или жидкостный пакет – это пакет, который хранит информацию о компонентах, которые будут использоваться в проекте, их свойства и методы для расчета фазового равновесия [21]. При моделировании цифрового двойника использованы следующие компоненты входного потока сырого газа: метан (CH_4), этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), диоксид углерода (CO_2), вода (H_2O), изобутан (C_4H_{10}), изопентан (C_5H_{12}), сероводород (H_2S), азот (N). Спроектирован технологический процесс, включающий в себя следующие объекты: трехфазный горизонтальный сепаратор, абсорбер, танкер и клапаны. Трехфазный горизонтальный сепаратор – это горизонтальная установка, используемая для сбора кислой воды и разделения на газовую, жидкую фазы [22]. Абсорбер – это объект, который используется для поглощения и разделения компонентов газовой смеси жидким абсорбентом [23]. Физико-геометрические параметры установок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические спецификации оборудования

Физический параметр оборудования	Значение
Абсорбер	
Высота	17.9 м
Диаметр	150 см
Объем	31.7 м ³
Количество тарелок	25
Тип тарелок	Ситчатые

Продолжение таблицы 1

Рабочее давление	4–6 бар
Температура	25–30 °C
Резервуар	
Диаметр	3 м
Длина	15 м
Объем	106 м ³
Давление	0.01 бар
Температура	20–25 °C
Трехфазный горизонтальный сепаратор	
Длина	15 м
Диаметр	360 см
Объем	152 м ³
Давление	4–6 бар
Температура	25–30 °C

При моделировании цифрового двойника необходимо настроить параметры пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора для достижения заданного желаемого значения давления в сепараторе. Формула закона управления давления трехфазного сепаратора ПИД-регулятора с заданными коэффициентами представлена в следующем виде:

$$U(t) = 2.18 \cdot E(t) + 681.25 \int_0^t E(\tau) d\tau,$$

где $E(t)$ – разница между желаемым значением и текущим в момент времени t , kPa,

$U(t)$ – выходное значение регулятора в момент времени t , %.

На вход трехфазного сепаратора поступает два потока: поток кислой воды и топливный газ высокого давления. В сепараторе из-за разности плотностей смесь разделяется на извлеченный газ и кислую воду, отделенную от углеводородов. Данные потоков исходного сырья представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика потоков исходного сырья

Материальный поток	Параметр	Ед. измерения	Значение
Кислая вода	Диоксид углерода	мольный %	0.25
	Вода	мольный %	0.5
	Сероводород	мольный %	0.25
	Температура	°C	30
	Давление	kPa	600
	Расход	м ³ /ч	23
Топливный газ	Метан	мольный %	0.798
	Этан	мольный %	0.135
	Пропан	мольный %	0.041
	Изобутан	мольный %	0.007
	Изопентан	мольный %	0.001
	Азот	мольный %	0.018
	Расход	м ³ /ч	16

Все основные объекты управления, а именно трехфазный сепаратор, абсорбер и резервуар, смоделированы согласно регламенту технологического процесса на существующем предприятии. Смоделированный технологический процесс в динамическом режиме изображен на рисунке 4.

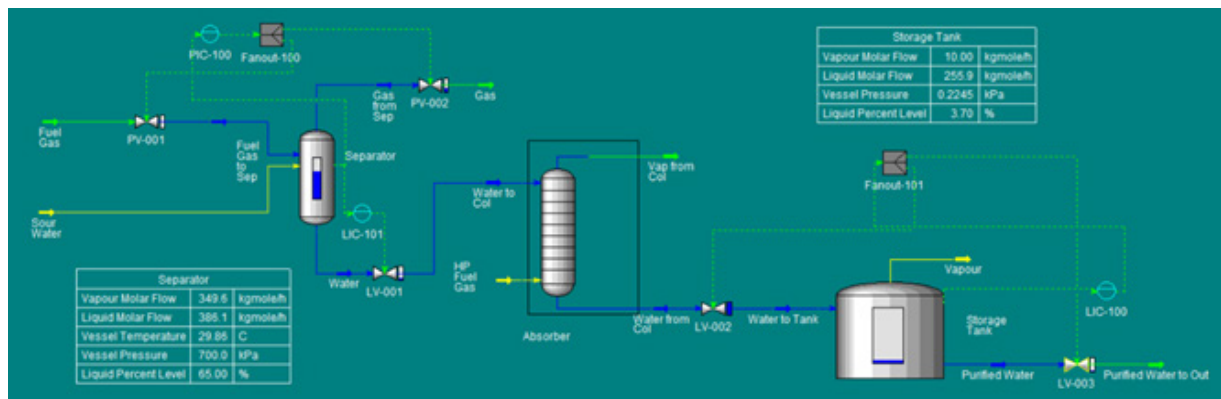


Рисунок 4 – Технологический процесс в динамическом режиме в Unisim Design

Модель представлена в двух вариантах – как в статическом (от англ. Steady-State), так и в динамическом (от англ. Dynamic) режимах. Это позволяет учитывать поведение системы при переходных процессах, аварийных ситуациях, а также изменение и контроль параметров (температура, давление, уровень жидкости и т. д.) в настоящем времени.

Реализация управления с помощью Honeywell Experion PKS

Для управления объектами в Unisim Design с помощью Experion PKS выбраны следующие параметры, влияющие на поведение системы:

Таблица 3 – Информация о параметрах, передаваемых с PCY в цифровой двойник

Имя параметра	Ед. измерения	Объект управления	Исполнительный механизм для управления
Давление	кПа	Трехфазный сепаратор	Положение клапана подачи топливного газа высокого давления в сепаратор (PV-001)
			Положение клапана выпуска извлеченного газа с сепаратора (PV-002)
Уровень жидкости	%	Трехфазный сепаратор	Положение клапана выпуска кислой воды с сепаратора (LV-001)
Уровень жидкости	%	Резервуар	Положение клапана подачи очищенной воды в резервуар (LV-002)
			Положение клапана выпуска очищенной воды из резервуара (LV-003)

На стороне Experion PKS разработан модуль управления на языке СМ, что является аналогом языка FBD по стандарту МЭК 61131-3 [24]. Рисунок 5 демонстрирует управление клапанами PV-001 и PV-002 с разделением диапазонов для поддержания давления в трехфазном сепараторе с Experion PKS.

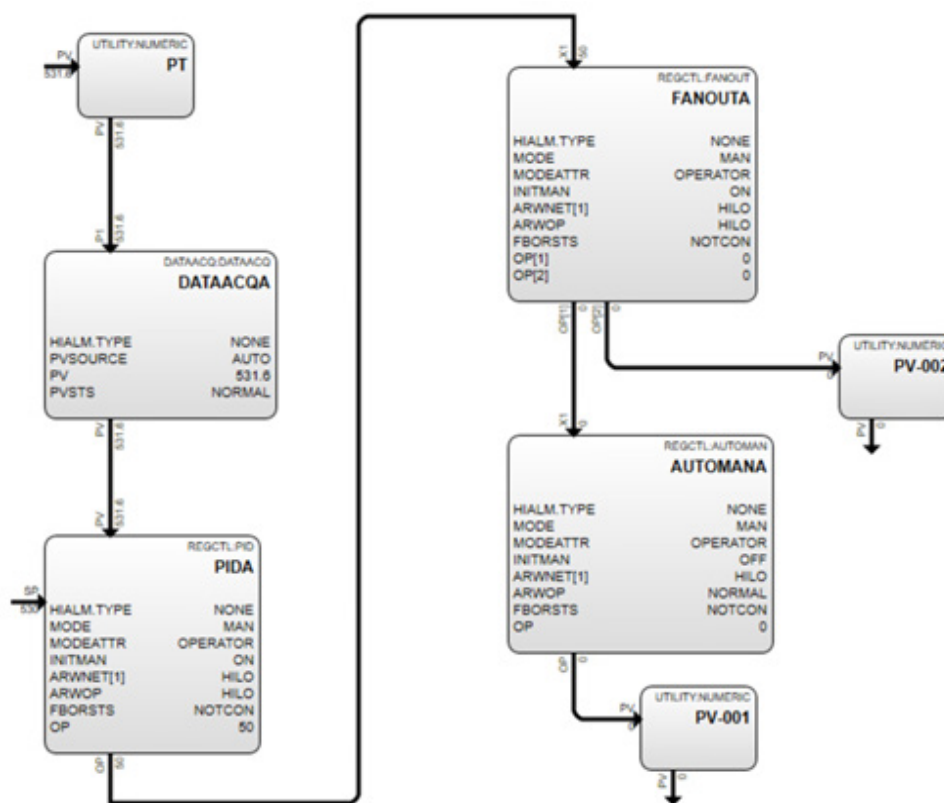


Рисунок 5 – Управление клапанами PV-001 и PV-002 с разделением диапазонов для поддержания давления в Experion PKS

Информация о текущем давлении приходит на блок «PT», который переадресовывает свое значение на «DATAACQ» для дополнительной обработки. Далее значение сигнала идет на блок ПИД-регулятора. В Experion PKS ПИД-регулятор может быть настроен под другие типы регуляторов. В данном случае нужен ПИ-регулятор, поэтому дифференцируемый коэффициент был равен нулю. Пропорциональный коэффициент и время интегрирования были получены с помощью «Autotune» в Unisim Design, сняв показания с объектов. «OP» регулятора затем разбивается на два значения в блоке «FANOUT» по правилу, описанному в формулах 1 и 2. Результат параметра «OP1» – положение клапана для подачи топливного газа для увеличения давления, а параметра «OP2» – клапана для выпуска избыточного газа из трехфазного сепаратора. Эти значения затем отправляются назад в Unisim Design по OPC.

Результаты и обсуждение

В данной секции представлены результаты выполненного моделирования, а также проблемы и дальнейшая модернизация цифрового двойника в рамках данного технологического процесса. Согласно результатам моделирования, на выходе очищенная вода состоит на 99.9998 % из воды и на 0.002 % из азота, что говорит об успешной очистке от кислых компонентов. Таблица 4 содержит данные о потоках отдувочного газа и очищенной воды с абсорбера.

Управление как в самом Unisim Design, так и в Experion PKS успешно поддерживает давление и уровень жидкости в трехфазном сепараторе, а также уровень жидкости в резервуаре в желаемых значениях, согласно данным с таблиц, описанных выше. Рисунок 6 изображает человеко-машинный интерфейс (HMI) процесса сбора и очистки кислой воды на станции Experion.

Таблица 4 – Характеристика потоков на выходе абсорбера

Поток	Параметр	Ед. Измерения	Значение
Очищенная вода	Вода	мольный %	0.999998
	Азот	мольный %	0.000002
Отдувочный газ	Метан	мольный %	0.786329
	Этан	мольный %	0.133026
	Пропан	мольный %	0.040400
	Диоксид углерода	мольный %	0.002370
	Вода	мольный %	0.005925
	Изобутан	мольный %	0.006898
	Изопентан	мольный %	0.000985
	Сероводород	мольный %	0.006331
	Азот	мольный %	0.017735

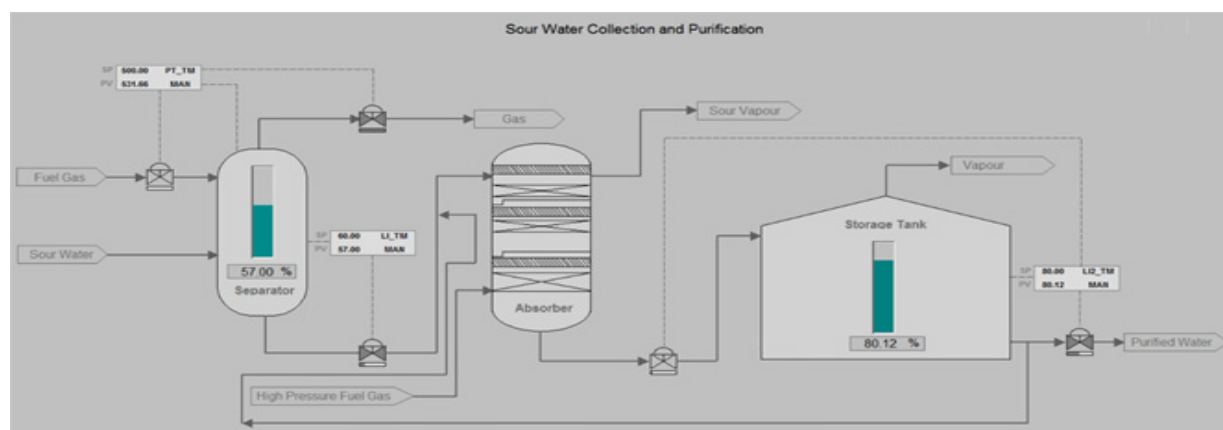


Рисунок 6 – Операторский интерфейс процесса сбора и очистки кислой воды

В оригинальном технологическом процессе присутствует еще одна колонна, в которую направляется поток кислого газа после абсорбера, чтобы выделить дополнительно остатки чистой воды, однако в целом на очистку кислой воды это не оказывает никакого влияния, поэтому эта установка была пропущена. Однако для дальнейшего расширения цифрового двойника предлагается промоделировать весь процесс.

Из дальнейших улучшений, вместо стандартного регулирования с помощью ПИД-регулятора предполагается использовать контроллеры с нечеткой логикой, чье поведение будет разработано на основе экспертных знаний инженеров, тем самым обеспечивая более гибкую адаптацию системы к изменениям технологических параметров, повышая точность управления и снижая влияние внешних возмущений на процесс.

Заключение

Эффективное управление процессом сбора и очистки кислой воды способствует повышению эффективности, а также сокращению выбросов кислот и углекислого газа в окружающую среду. В данной статье рассматривается разработка цифрового двойника этого процесса в статическом и динамическом режимах, что позволяет провести его детальный анализ и автоматизировать управление, снижая необходимость прямого вмешательства оператора. Весь

технологический процесс детально был описан согласно документам на существующем предприятии Казахстана. Было уделено большое внимание управлению с разделением диапазона, рассмотрено управление как внутри самого Unisim Design, так и с помощью распределенной системы управления Experion PKS. По результатам моделирования процент содержания компонента воды составил 99.9998%, а автоматическое управление успешно поддерживает заданные параметры установок в рабочих диапазонах, гарантируя высокую точность.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Benson, C., Dimopoulos, C., Argyropoulos, C.D., Varianou Mikellidou, C., and G. Boustras. Assessing the common occupational health hazards and their health risks among oil and gas workers, *Safety Science*, 140, 105284 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105284>.
- 2 Nalinakshan, S., Sivasubramanian, V., Ravi, V., Vasudevan, A., Sankar, M.R., and K. Arunachalam. Progressive crude oil distillation: An energy-efficient alternative to conventional distillation process, *Fuel*, 239, 1331–1337 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.033>.
- 3 Kinsara, R.A. and A. Demirbas. Upgrading of crude oil via distillation processes, *Petroleum Science and Technology*, 34 (14), 1300–1306 (2016). <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1200080>.
- 4 Tengku Hassan, T.N.A., Shariff, A.M., Mohd Pauzi, M.M., Khidzir, M.S., and A. Surmi. Insights on Cryogenic Distillation Technology for Simultaneous CO₂ and H₂S Removal for Sour Gas Fields, *Molecules*, 27(4) (2022). <https://doi.org/10.3390/molecules27041424>.
- 5 Farhadian, A., Go, W., Yun, S., Rahimi, A., Reza Nabid, M., Iravani, D., and Y. Seo. Efficient dual-function inhibitors for prevention of gas hydrate formation and CO₂/H₂S corrosion inside oil and gas pipelines, *Chemical Engineering Journal*, 431, 134098 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134098>.
- 6 De Farias Soares, A., Delloso Penteado, E., Ramalho Diniz, A.A., and A. Komesu. Influence of operational parameters in sour water stripping process in effluents treatment, *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102012 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102012>.
- 7 Daniel, A., Sriramulu, S., Partheeban, N., and S. Jayagopalan, *Digital Twin Technology and Applications*, (New York, 2024), 400 p. <https://doi.org/10.1201/9781003469612>.
- 8 Mounaam, A., Harmen, Y., Chhiti, Y., Souissi, A., Salouhi, M. and M. El Khouakhi, Unisim-Design Simulation and Analysis of a Sulphuric Acid Manufacturing Plant with Double Absorption Process, in *Proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications – SIMULTECH, IN-STICC*. SciTePress, 2020, pp. 91–100. <https://doi.org/10.5220/0009832300910100>.
- 9 Usmani, S., Gonzalez Quiroga, A., Vasquez Padilla, R., Palmer, G., and M. Lake, Simulation model of the characteristics of syngas from hardwood biomass for thermally integrated gasification using unisim design tool, *Energy*, 211, 118658 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118658>.
- 10 Zi'olkowski, P., Madejski, P., Amiri, M., Ku's, T., Stasiak, K., Subramanian, N., Pawlak-Kruczek, H., Badur, J., Nied'zwiecki, and D. Mikieliewicz. Thermodynamic Analysis of Negative CO₂ Emission Power Plant Using Aspen Plus, Aspen Hysys, and Ebsilon Software, *Energies*, 14(19) (2021). <https://doi.org/10.3390/en14196304>.
- 11 Shirdel, S., Valand, S., Fazli, F., Winther-Sørensen, B., Aromada, S.A., Karunarathne, S., and L. E. Øi. Sensitivity Analysis and Cost Estimation of a CO₂ Capture Plant in Aspen HYSYS, *ChemEngineering*, 6(2) (2022). <https://doi.org/10.3390/chemengineering6020028>.
- 12 Yandrapu, V.P., and N.R. Kanidarapu. Energy, economic, environment assessment and process safety of methylchloride plant using Aspen HYSYS simulation model, *Digital Chemical Engineering*, 3, 100019 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100019>.
- 13 Kartal, F. and U. Özveren. A comparative study for biomass gasification in bubbling bed gasifier using Aspen HYSYS, *Bioresource Technology Reports*, 13, 100615 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100615>.
- 14 Olugbenga, A.G., Al-Mhanna, N.M., Yahya, M.D., Afolabi, E.A., and M.K. Ola. Validation of the Molar Flow Rates of Oil and Gas in Three-Phase Separators Using Aspen Hysys, *Processes*, 9 (2) (2021). <https://doi.org/10.3390/pr9020327>.
- 15 Kˆokdemir, B., and N. Acaralı. A novel study on CHEMCAD simulation of isopropyl alcohol dehydrogenation process development, *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(3), 100035 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100035>.

16 De Oliveira Hansen, J.P., da Silva, E.R., Bilberg, A., and C. Bro. Design and development of Automation Equipment based on Digital Twins and Virtual Commissioning, *Procedia CIRP*, 104, 1167–1172 (2021) 54th CIRP CMS 2021 - Towards Digitalized Manufacturing 4.0. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.196>.

17 Reyes-L'ua, A., Zotic'a, C., Forsman, K., and S. Skogestad. Systematic Design of Split Range Controllers, *IFAC-PapersOnLine*, 52(1), 898–903 (2019) 12th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems DYCOPS 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.06.176>.

18 Machado, D.O., S'anchez, A.J. , Gallego, A.J., de Andrade, G.A., Normey-Rico, J.E., Bordons, C., and E.F. Camacho. Split-range control for improved operation of solar absorption cooling plants, *Renewable Energy*, 192, 361–372 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.064>.

19 Samigulina, G.A., Samigulina, Z.I., and Zh.S. Lukmanova. Cognitive smart-technology of distance learning of Experion PKS distributed control system for oil and gas industry using ontological approach, *News of the Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 1, 23–30 (2020). <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.3>.

20 Haydary, J. *Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications*, (John Wiley & Sons, Incorporated, 2019).

21 Liu, Z. and I. Karimi. Simulation of a combined cycle gas turbine power plant in Aspen HYSYS, *Energy Procedia*, 158, 3620–3625 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.901>.

22 Basyouny, A. Experimental validation of numerical two-phase flow in a horizontal separator, *Results in Engineering*, 15, 100476 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100476>.

23 Otitoju, O., Oko, E., and M. Wang. Modelling, scale-up and techno-economic assessment of rotating packed bed absorber for CO₂ capture from a 250 MWe combined cycle gas turbine power plant, *Applied Energy*, 335, 120747 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120747>.

24 Commission, I.E. et al. *Programmable controllers-part 3: Programming languages*, IEC 61131-3 (Ed. 2.0), 2002.

¹Самигулин Т.И.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID: 0000-0001-9963-6719,

e-mail: t. samigulin@kbtu.kz

^{1*}Маратұлы Т.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0001-3850-6221,

*e-mail: t.maratuly@kbtu.kz

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ҚЫШҚЫЛ СУДЫ ЖИНАУ ЖӘНЕ ТАЗАРТУ ПРОЦЕСІНІҢ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа

Мұнай-газ саласында шикі газды айдау барысында қышқыл суды жинау және тазарту – маңызды технологиялық үдеріс. Аталған үдерісті оңтайлы басқару өндірістің тиімділігін арттыруға, қоршаған ортаға қышқыл қосындылар мен көмірқышқыл газының шығарылуын азайтуға, сондай-ақ мұнай-газ индустриясының өсіп келе жатқан қажеттіліктері аясында табиғи ресурстарды ұтымды пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл зерттеу Honeywell Unisim Design бағдарламалық жасақтамасын пайдалана отырып, цифрлық егізді жобалауға арналған. Негізгі назар динамикалық модель аясында диапазонды бөлу (ағылш. split-range control) басқару жүйесін әзірлеу мен енгізуге бағытталады. Жасалған модель тарихи деректер негізінде талданып, оның дәлдігі тексерілді. Цифрлық егізді Experion PKS таратылған басқару жүйесіне біріктіру мақсатында C300 өнеркәсіптік контроллер үшін басқару стратегиясы мен операторларға арналған HMI-интерфейс әзірленді. Ұсынылған цифрлық егіз жаңа басқару схемаларын құру және сынақтан өткізу, параметрлерді оңтайландыру, сондай-ақ қауіпсіздік жүйесін баптау үшін жаңа мүмкіндіктер ұсынады. Honeywell компаниясы жүргізген тұтынушылық сауалнамаға сәйкес, цифрлық егіздерді енгізу жобалауға жұмсалатын күрделі шығындарды 10%-дан астам қысқартуға, әзірлеу уақытының 10%-ға азаюына және зауыт өнімділігінің 3–8%-ға артуына мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: цифрлық егіз, мұнай-газ өнеркәсібі, диапазонды бөлуді басқару, күрделі нысан, модельдеу, Unisim Design, таратылған басқару жүйесі, Experion PKS.

¹Samigulin T.I.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-9963-6719,

e-mail: t.samigulin@kbtu.kz

^{1*}Maratuly T.,

Master's student, ORCID ID: 0009-0001-3850-6221,

*e-mail: t.maratuly@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN FOR THE SOUR WATER COLLECTION AND PURIFICATION PROCESS

Abstract

In the oil and gas industry, the collection and purification of sour water during crude gas distillation is a crucial technological process. Optimal control of this process can increase production efficiency, reduce environmental emissions of acids and carbon dioxide, and enable more rational use of natural resources amid the growing demands of the oil and gas industry. This study focuses on the design of a digital twin using Honeywell Unisim Design software. Special attention is given to the development and implementation of a split-range control system within a dynamic model. The developed model has been analyzed using historical data to verify its accuracy. A control strategy has been designed for the C300 industrial controller, along with an HMI interface for operators to integrate the digital twin with the Experion PKS distributed control system. The digital twin unlocks new opportunities for developing and testing control schemes, optimizing parameters, and fine-tuning safety systems. According to customer surveys conducted by Honeywell, the implementation of digital twins can reduce significant expenses for design by more than 10%, shorten development time by 10%, and increase plant productivity by 3–8%.

Keywords: digital twin, oil and gas industry, split-range control, complex object, simulation, Unisim Design, distributed control system, Experion PKS.

Дата поступления статьи в редакцию: 28.02.2025

UDC 004.9, 378.1
IRSTI 28.01.21

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-49-58>

^{1*}**Artykbayeva A.A.,**

PhD student, ORCID ID: 0009-0001-2233-092X

*e-mail: Asel_aidarbekowna@mail.ru

¹**Salykova O.S.,**

Cand. Tech. Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-8681-4552

e-mail: Solga0603@mail.ru

²**Nurmagambetova L.I.,**

Cand. Econ. Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0009-0002-4459-5010

e-mail: Leila0205@mail.ru

¹Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynov, Kostanay, Kazakhstan

²Kostanay Engineering and Economics University named after M. Dulatov, Kostanay, Kazakhstan

NEURAL NETWORK ALGORITHMS FOR INTELLIGENT PROCESSING OF STUDENTS' REVIEWS

Abstract

This article is devoted to the problem of using neural network algorithms for automated analysis of student reviews. In the modern conditions of multidisciplinary educational institutions and online learning platforms, student performance becomes an important indicator of the quality of the educational process and serves as a basis for further adjustments. Classical approaches, such as manual processing and descriptive statistics, are not always able to answer the question of how deeply students' opinions can be understood and analyzed. Neural network algorithms, in comparison with traditional text processing methods, include Recurrent Neural Networks (RNN), BERT and transformers, which have a larger volume of text information and can use more effective logical approaches to the study of hidden patterns. The article considers approaches to processing and analyzing reviews, stages of developing neural network algorithms and their possible impact on education. The potential of more advanced neural network methods is discussed, including a method of learning on a large amount of data, contextual understanding, as well as a smaller number of data units. The study of the neural network approach also indicates that it is important to pay attention to ethics and explanation. The article, in subsequent parts, came to the conclusion that the use of neural network algorithms helps to optimize the management of educational courses and increase the level of their demand among students and raises the question of further research on this topic.

Keywords: neural network algorithms, feedback processing, educational platforms, recurrent neural networks (RNN), BERT models, model interpretability.

Introduction

In modern educational areas, interaction with students has become an important tool along with others for diagnosing the quality of educational services and planning work to improve them. In recent years, there has been an increasing number of educational platforms and programs. In this regard, it is especially important to conduct systemic analyses of student opinions and feedback. Feedback will not only allow tracking the level of student satisfaction, but also for administrators and teachers who seek to improve them as a result of increasing the effectiveness of teaching.

General systemic thinking allows you to highlight both positive and negative aspects in the educational process, revealed through focus groups. Studying students' opinions about the course, teaching methods and a full set of educational materials can both adapt and improve the quality of educational services. In the context of increasing competition between educational institutions, the speed of response to output data and changes made begins where systems are accustomed to being built in.

However, the use of renewable resources for optimizing feedback analysis based on manual processing and elementary statistics most often does not achieve the set results in a comparative understanding among students. To help with this, neural network algorithms are capable of processing large volumes of text information with the ability to identify patterns in the data environment. This article will focus on the development of suitable algorithms for automating the process of analyzing reviews, thus being at a point where the level of the educational process can rise.

The purpose of this article is to consider in detail the creation of synergetic algorithms capable of processing student reviews of an educational course. We want to highlight the ways in which modern technologies can be integrated into the educational system to improve its functioning and quality.

Objectives of the article:

- ♦ Review of review analysis methods. Study of classical opinion analysis techniques and identification of their shortcomings.
- ♦ Description of algorithms based on neural networks. Providing some details on how neural networks work and their role in text processing.
- ♦ Algorithm design processes. Refinement of the design processes, including data collection, text preprocessing, model training and model testing.
- ♦ Possible implications for the educational system. Assessing the impact of neural network algorithms on feedback analysis, program quality and student satisfaction.
- ♦ Prospects for further research. Research into promising areas in the study and development of feedback analysis based on neural network technologies.

In recent years, text data analysis, particularly review data, has become an important area of research. There are several categories of methods and approaches to text processing and review analysis, including:

1) Traditional text mining methods.

- ♦ Rule-based methods. They require significant effort and may be ineffective [2];
- ♦ Statistical methods. They are applicable when analyzing quantitative data, but may be difficult given the specific context of the text being processed [3].

2) Machine learning methods. These methods are more advanced and include the following options:

- ♦ Vector classification, which uses vector representations of words. This method takes into account word frequency and context [4];
 - ♦ Random forest or decision tree. Classify text based on various features [5].
- 3) Neural network approaches. Relatively recent and widely used approaches:
- ♦ Recurrent neural networks (RNN). Applicable to sequential data [6];
 - ♦ Transformers. Applicable to natural language processing and deep text understanding [7].

Institutional review analysis is an important area of research because it can provide important information about the value of learning and student satisfaction. Many studies have been conducted in recent years

1. Review analysis methods. Some studies also focus on review analysis methods. For example, Mahesh Batta's study used machine learning algorithms to classify student reviews of courses and lecturers to identify factors that affect student satisfaction [8].

2. Thematic analysis. In other studies, thematic analysis has been applied to identify the main themes of reviews. Researchers conducted an analysis of reviews of higher education institutions [9]. The main categories of reviews were found to be about teaching, infrastructure, and student support.

3. Impact on reputation. Some studies also discuss the impact of reviews on the reputation of institutions. For example, a study by Magdalena Garvanova showed that positive reviews significantly improve the reputation of higher education institutions, while negative reviews can significantly worsen their image [10].

Materials and methods

The methodology includes the following steps:

1. Data collection. The first and most important step in developing feedback analysis algorithms is collecting the necessary data. To do this, specialists can use various methods, such as:

- ♦ student surveys. Developing questionnaires and conducting questionnaires among students to obtain their own opinions on the quality of education. Surveys can be anonymous or identified depending on the objectives of the study;
- ♦ collecting feedback from educational platforms. The method allows collecting student feedback from university websites, educational forums and social networks, where they share their opinions on courses and teachers.

2. Data processing. Just like in the first case, the collected feedback must be processed. To do this, pre-processing includes the following steps:

- ♦ cleaning. Removing HTML tags, special characters, extra spaces, etc. Only the text is left;
- ♦ normalization. Converting the text into a single format, converting all characters to lowercase and correcting typos;
- ♦ tokenization. Dividing the text into words, which facilitates the analysis of the review content.

3. Selecting metrics for assessing the quality of reviews. For further assessment of the quality of the collected reviews, the following key metrics are selected:

- ♦ mood. In this context, we are talking about the emotional coloring of reviews: positive, negative and neutral. The mood is determined using sentiment analysis methods;
- ♦ key topics and categories. The main topics of the subcategories mentioned in the review are determined using topic modeling and other text analysis methods.

These steps provide a solid foundation for the development of review analysis algorithms and their application in education.

Results and discussions

Neural networks have become a popular tool for text analysis and natural language processing, including learning feedback. There are several key reasons why neural networks work best for this task [11].

1. They can handle large amounts of data. Deep neural networks can effectively analyze information from large amounts of text. This allows them to find seemingly invisible patterns and dependencies that may not be obvious using traditional methods.

2. They can use context. The current generation of neural networks, which take into account the context of example words like BERT and GPT, are able to understand the context of words in the same sentence. This allows them to find the tone and meaning of the text much better.

3. They are adaptive. Many models can be used for both text classification and text generation. This allows scientists to customize the models for the needs of the review study.

4. They perform better. Numerous studies have shown that neural network algorithms are better than Naive Bayes or SVM at processing text. When creating a neural network algorithm for learning feedback analysis, it is necessary to consider some of the existing ones on modern architectures. Table 1 below summarizes the key features of these researched architectures.

Each architecture supports unique capabilities and advantages, making them effective in learning feedback analysis. To evaluate the effectiveness of the architectures in the field of learning feedback analysis, a comparative analysis of their performance on several critical tasks was performed on the solutions. These tasks included sentiment classification, information extraction, and topic modeling.

Table 1 – Main characteristics and features of architectures [12–14]

Architecture	Description	Characteristic	Application
LSTM (Long Short-Term Memory)	A type of recurrent neural network, helps to solve the vanishing gradient problem.	- Long-term memory; - Ability to store and forget information to better adapt to context; - Includes input, output, and forget gates aimed at efficient information management.	- Sentiment analysis. - Text generation. - Processing of serial data.
BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)	The Transformer model was developed to understand the context of words in the same sentence.	- Ability to process text in both directions; - Pre-training on large amounts of data and re-training on specific tasks; - Ability to consider each word in the context of a sentence.	- Sentiment analysis. - Information extraction. - Text classification. - Answering questions.
Transformer	The paper “Attention is All You Need” shows the developed architecture, which has become the basis for many modern NLP models.	- Focus on different parts of the text; - Text processing occurs in parallel; - Adapted for text classification and generation.	- Text classification. - Text generation. - Translation. - Processing large amounts of data.

Table 2 – Results of the comparative analysis

Neural network architecture	Advantages	Disadvantages	Results
Tonality classification			
LSTM	Works well with sequential data and can take into account the context of words in a sentence. Effective in tasks where it is important to match the order of words.	May have long-term dependency issues and require significant computational power to train on large datasets.	On average, it achieves around 80-85% accuracy on common datasets like IMDb.
BERT	Uses bidirectional attention for better understanding of context. Training is carried out on a large amount of data, so the trained model generalizes information better.	Requires more computational power and time to train than LSTM.	Achieves over 90% accuracy on the same datasets, ranking among the best sentiment classification solutions.
Transformer	The ability to process data in parallel during training, due to which training is fast.	Can be difficult to tune and resource-intensive.	Accuracy metrics are similar to BERT, reaching 90% or higher, especially on tasks that require contextual understanding.
Extracting information			
LSTM	When extracting information from text, it is able to identify sequential dependencies.	Lacks ability to handle large amounts of data.	Competitively efficient, but often lags behind modern architectures.

Continuation of Table 2

BERT	Using contextual representation of words when searching for information.	High resource requirements.	Excels exceptionally well on information extraction tasks, often outperforming LSTM and traditional approaches.
Transformer	High speed and the ability to process data in parallel.	Difficult to tune.	Extraction speed is comparable to BERT, but can be implementation-dependent.
Topic modeling			
LSTM	Used to identify topics when working with sequential data.	Inefficient for large amounts of text.	Fair, but may still have low accuracy.
BERT	Using the context of a word allows you to identify a complex topic.	High computational cost.	Generally performs better in topic modeling than LSTM
Transformer	Efficient when working with large amounts of data.	Difficult to tune and train.	Comparable performance to BERT in tasks that require fine-grained text understanding.

In most cases, BERT and Transformer show significantly better results than LSTM in review analysis, especially in sentiment recognition and information extraction. At the same time, the choice of architecture is still a matter of means and ends, in relation to a specific task, available resources and data volumes. Neural networks have gained popularity and application in tasks such as review analysis, natural language processing and others. Here are some examples where the achievements of neural networks are much more effective in the real world:

1. Product Review Analysis

Agbonifo O., Olutayo V. and Oluyede O. conducted a study where they used machine learning algorithms such as LSTM and BERT to analyze product comments on marketplaces [15]. The results showed that BERT-based models significantly improved the accuracy of sentiment classification in reviews, which in turn helps companies better adapt their strategies and track customer opinions.

2. Course Feedback Analysis

In the study the BERT model was used to analyze courses from a university that students study [16]. The model identified the main reasons that affect the level of student satisfaction, which enabled administrators to improve the educational services provided.

3. Social Media Review Processing

The study analyzed how the BERT model is applicable to analyzing company comments on social networks [17]. The model showed good results in the distribution of emotions in reviews, which allows companies to quickly respond to negative comments and thereby improve their reputation.

4. Movie Review Analysis

In the analysis of movie reviews, a study used a recurrent neural network (RNN) [18]. The model was able to create a highly accurate sentiment detection for reviews, which allowed the development of a recommendation system.

Despite the advances in language processing and sentiment analysis, there are still issues associated with artificial neural network approaches that systematically affect their performance and interpretability [19]. Most of the main issues and limitations of these algorithms are shown in Figure 1 for the use of neural networks in review analysis.

The need for large amounts of data

- Neural network models, especially deep ones, require significant amounts of training data to achieve high accuracy and reliability. Insufficient data can lead to overfitting of the model, where it performs well on the training set but generalizes poorly to new data. This can be especially problematic in the context of review analysis, where the available data may be limited.

Computing resources

- Training neural network models requires significant computational resources, including powerful graphics processing units (GPUs) or task-specific processing units (TPUs). This can be a limiting factor for educational institutions with limited budgets or insufficient infrastructure to handle large amounts of data.

Time of training

- The process of training neural networks can take a significant amount of time, especially when working with large data sets and complex architectures. This can slow down the process of developing and implementing review analysis algorithms, which in turn can lead to delays in obtaining results and their application in practice.

Limitations in the interpretability of models

- Neural network models are often treated as "black boxes," making it difficult to understand their inner workings and decision making. This can be problematic when it comes to explaining why a model made a certain decision, especially in educational contexts where it is important to understand the reasons for changes.

Difficulty in explaining decisions

- A related issue is that the explanations for the decisions made by neural network models can be complex and unintuitive. This can make it difficult for model developers to communicate with end users, such as teachers or administrators who need to make decisions based on feedback analysis.

Figure 1 – Problems and limitations

While exploring the main challenges and limitations of neural network-based approaches in review data analysis, one should also consider the ethical issues that may arise when working with the data. These issues include privacy concerns, model bias, and impact on users. The main ethical issues that need to be considered when designing and implementing neural network algorithms in the educational process are summarized in Figure 2 [20].

There are many promising avenues for advancing research in the field of neural network-based review analysis. One such gap involves developing more efficient models that can work with smaller amounts of data while maintaining the quality of the analysis. This may involve the use of active learning methods, where the model is trained on a small initial dataset and then actively queries additional data to improve its performance.

Another significant gap is related to improving the explainability of neural network models. Research can be aimed at developing explanations that allow us to understand the reasons behind the models' decisions, which is especially important in review analysis, as the results can affect the reputation of educational institutions.

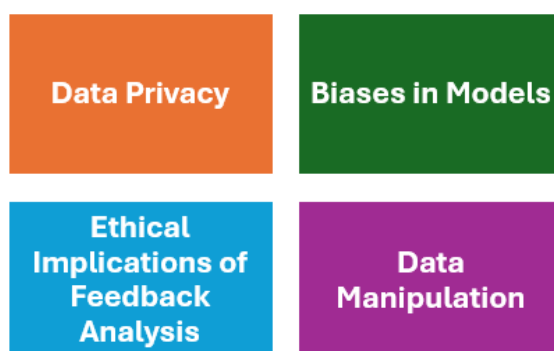


Figure 2 – Ethical aspects

There is also a need to combine neural network-based methods with other analytical techniques, such as sentiment analysis and topic modeling, to create advanced review analysis systems. This can improve the detection of not only sentiment, but also the main topics and issues discussed in reviews.

For educational institutions that plan to implement neural network algorithms in review analysis, the authors offer several practical recommendations:

- ♦ Identifying the best models. It is not recommended to use complex models like BERT right away. You can use simpler but already mastered LSTM at first. It is necessary to remember the specifics of the data and the task in order to choose the most appropriate architecture.
- ♦ Data collection and preprocessing. The best review analysis starts with a prepared and high-quality collected data set. Educational institutions should develop a data collection policy, including anonymous surveys, as well as data from social networks.
- ♦ Training and testing models. One of the most expensive resources are the most powerful and highly loaded computing resources. To train the model and test it, it is necessary to allocate them in portions, and also conduct experimental selections by performance on real data.
- ♦ Interpretation and ethics. It is necessary to consider the ways of interpretability of the model and take into account ethical aspects when collecting data. The educational institution must justify the results of the analysis and ensure the privacy of students.
- ♦ Improvement. It is necessary to regularly update the models and analysis methods based on updated data to ensure their relevance and effectiveness.

Thus, neural network algorithms are powerful tools for feedback analysis. Educational institutions with their help get the opportunity to know the opinions of students and significantly more effectively adapt their programs. Despite existing problems and limitations, such as the need for large amounts of data and computing resources, as well as ethical issues related to bias and privacy, the potential for using these technologies to improve the quality of education is significant. For pedagogical research, the practical recommended research methodologies will help in further development of neural network approaches, which in turn will facilitate feedback analysis and educational processes.

Conclusions

This article shows the importance of analyzing student feedback on the educational process and the role of neural network algorithms in this process.

Student feedback provides important data necessary for educational institutions to evaluate the quality of the services they provide. In order to further improve them. Understanding student sentiment, educational institutions can adapt educational programs and will be able to improve their effectiveness in a timely manner.

Some neural networks: LSTM, BERT transformers have a significant advantage over traditional methods of working with texts, analysis and feedback, they take into account the context, associated factors and complex interactions between parameters.

Performing such tasks as data collection, text cleaning, data preparation, model creation, debugging minor problems and subsequent testing forms the entire process of algorithm development. Achieving neural network methods requires attention at each stage to achieve the required highest quality of feedback.

Implementation of neural network algorithms in feedback analysis can improve the quality of educational programs and increase student satisfaction. This, in turn, increases the competitive advantages of educational institutions. There are many areas for exploration, such as developing more efficient models, increasing the interpretability of neural network approaches, and combining different data analysis methods. These studies can lead to more sophisticated feedback systems that offer deeper insights into students' perceptions and their impact on educational processes. Thus, a neural network-based feedback analysis system can fundamentally improve educational services and satisfaction levels among students. It is imperative to continue developing and refining these technologies to fully realize their potential in education.

REFERENCES

- 1 Samaraskera, D., Ping, Y., Hoon, T. Obtaining Impactful Feedback from Students: A Continuous Quality Improvement Approach to Enhance the Quality of Students' Feedback. *South East Asian Journal of Medical Education*, 8, 2–9 (2014). <https://doi.org/10.4038/seajme.v8i1.118>.
- 2 Manning, C.D., Raghavan, P., Schütze, H. *An Introduction to Information Retrieval*. London: MIT Press, 2009, 562 p.
- 3 Bishop, C.M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer Science Business Media, 2006, 746 p.
- 4 Salton, G., McGill, M. J. *Introduction to Modern Information Retrieval*. 2018. URL: https://sigir.org/files/museum/introduction_to_modern_information_retrieval/frontmatter.pdf
- 5 Breiman, L. Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32 (2001).
- 6 Aman's AI Journal • NLP • Neural Architectures. URL: <https://aman.ai/primers/ai/architectures/>
- 7 Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Kaiser, Ł., Polosukhin, I. Attention is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1706.03762>.
- 8 Mahesh, B. Machine Learning Algorithms – A Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 9 (2019). <https://doi.org/10.21275/ART20203995>.
- 9 Braun, V., Clarke, V. Thematic analysis. URL: https://www.researchgate.net/publication/269930410_Thematic_analysis.
- 10 Garvanova, M. The Significance of Reputation in Choosing and Recommendation a University. *Test Engineering and Management*, 83, 8545–8553 (2023).
- 11 Wang, Y., Li, Z., Deng, Zh., Song, H., Yang, J. *Deep Learning for Natural Language Processing* (2023). <https://doi.org/10.5772/intechopen.112550>.
- 12 What is LSTM – Long Short Term Memory? – GeeksforGeeks. 2025. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning-introduction-to-long-short-term-memory/>
- 13 BERT. URL: https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/bert
- 14 Attention is all you need - The Transformer. URL: <https://raviteja-ganta.github.io/attention-is-all-you-need-transformers>.
- 15 Agbonifo, O., Olutayo, V., Oluyede, O. Machine learning-based sentiment analysis of product reviews. *Journal of Trends and Challenges in Artificial Intelligence*, 2, 257–264 (2025).
- 16 Pinheiro, A., Ferreira, R., Gasevic, D., Freitas, F. Towards Explainable Prediction Feedback Messages Using BERT. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 34 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40593-023-00375-w>.
- 17 Sayeed, Md Sh., Roji, V., Anbananthen, K. BERT: A Review of Applications in Sentiment Analysis. *HighTech and Innovation Journal*, 4, 453–462 (2023). <https://doi.org/10.28991/HIJ-2023-04-02-015>.

18 Hegde, S., Madhunandana, H., Mohana. Sentiment Analysis with LSTM Recurrent Neural Network Approach for Movie Reviews using Deep Learning. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICIMIA60377.2023.10426266>.

19 Shad, R., Gracias, A. Natural Language Processing (NLP) for Sentiment Analysis: A Comparative Study of Machine Learning Algorithms. 2024. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.2338.v1>.

20 Nguyen, A., Ngo, H., Hong, Y., Dang, B., Nguyen Bich-Phuong. Ethical principles for artificial intelligence in education. Education and Information Technologies, 28 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11316-w>.

¹*Артыкбаева А.А.,

докторант, ORCID ID: 0009-0001-2233-092X

*e-mail: Asel_aidarbekowna@mail.ru

¹Салыкова О.С.,

т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-8681-4552

e-mail: Solga0603@mail.ru

²Нурмагамбетова Л.И.,

э.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0009-0002-4459-5010

e-mail: Leila0205@mail.ru

¹Ахмет Байтұрсынов атындағы Қостанай өңірлік университеті,
Қостанай қ., Қазақстан

²М. Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті,
Қостанай қ., Қазақстан

СТУДЕНТТЕРДІҢ ПІКІРЛЕРІН ЗИЯТКЕРЛІК ӨНДЕУГЕ АРНАЛҒАН НЕЙРОЖЕЛІ АЛГОРИТМДЕРІ

Аңдатпа

Бұл мақала студенттердің пікірлерін автоматтандырылған түрде талдау үшін нейрондық желі алгоритмдерін қолдану мәселесіне арналған. Көпсалалы білім беру мекемелері мен онлайн оқыту платформаларының қазіргі жағдайында студенттердің үлгерімі білім беру үдерісінің сапасының маңызды көрсеткішіне айналып, оны әрі қарай жетілдіру үшін негіз бола алады. Қолмен өңдеу және сипаттамалық статистика сияқты дәстүрлі тәсілдер студенттердің пікірлерін қаншалықты терең түсініп, тиімді талдауға болатынына әрдайым толық жауап бере алмайды. Нейрондық желі алгоритмдері мәтінді өңдеудің дәстүрлі әдістерімен салыстырғанда қайталанатын нейрондық желілерді (RNN), BERT модельдерін және мәтіндік ақпараттың үлкен көлемін өңдеп, жасырын заңдылықтарды үйренуде тиімді трансформаторлық тәсілдерді қолдана алады. Мақалада шолуларды өңдеу және талдау әдістері, нейрондық желі алгоритмдерін әзірлеу кезеңдері және олардың білім беру үдерісіне ықтимал әсері қарастырылады. Жетілдірілген нейрондық желі әдістерінің әлеуеті, соның ішінде үлкен деректерді үйрету, контексті түсіну және шағын деректер бірліктерімен жұмыс істеу мәселелері талқыланады. Нейрондық желі әдістерін зерттеу кезінде этикалық мәселелер мен нәтижелерді түсіндірудің маңыздылығы да атап өтіледі. Мақаланың келесі бөлімдерінде нейрондық желі алгоритмдерін пайдалану білім беру курстарын басқаруды оңтайландыруға, сондай-ақ студенттер арасында бұл курстардың сұранысын арттыруға ықпал ететіні жөнінде қорытынды жасалады. Сонымен қатар, осы тақырыпты одан әрі зерттеу қажеттілігі туралы мәселе көтеріледі.

Тірек сөздер: нейрондық желі алгоритмдері, кері байланысты өңдеу, білім беру платформалары, қайталанатын нейрондық желілер (RNN), BERT модельдері, модельді интерпретациялау.

^{1*}**Артыкбаева А.А.,**
докторант, ORCID ID: 0009-0001-2233-092X,
*e-mail: Asel_aidarbekowna@mail.ru
¹**Салыкова О.С.,**
к.т.н., ассоциированный профессор,
ORCID ID: 0000-0002-8681-4552,
e-mail: Solga0603@mail.ru
²**Нурмагамбетова Л.И.,**
к.э.н., ассоциированный профессор,
ORCID ID: 0009-0002-4459-5010,
e-mail: Leila0205@mail.ru

¹Костанайский региональный университет им. Ахмета Байтурсынова,
г. Костанай, Казахстан

²Костанайский инженерно-экономический университет им. Мыржакыпа Дулатова,
г. Костанай, Казахстан

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ОТЗЫВОВ СТУДЕНТОВ

Аннотация

Данная статья посвящена проблеме использования нейросетевых алгоритмов для автоматизированного анализа отзывов студентов. В современных условиях многопрофильных учебных заведений и платформ онлайн-обучения успеваемость студентов становится важным показателем качества образовательного процесса и служит основой для дальнейших корректировок. Классические подходы, такие как ручная обработка и описательная статистика, не всегда способны ответить на вопрос, насколько глубоко можно понять и проанализировать мнения студентов. К нейросетевым алгоритмам, в сравнении с традиционными методами обработки текста, относятся рекуррентные нейронные сети (RNN), BERT и трансформаторы, которые имеют большой объем текстовой информации и могут использовать более эффективные логические подходы к изучению скрытых закономерностей. В статье рассматриваются подходы к обработке и анализу отзывов, этапы разработки нейросетевых алгоритмов и их возможное влияние на образование. Обсуждается потенциал более продвинутых нейросетевых методов, включая метод обучения на большом объеме данных, контекстное понимание, а также меньшее количество единиц данных. Исследование нейросетевого подхода также свидетельствует о том, что важно уделять внимание этике и объяснению. В статье в последующих частях сделан вывод о том, что использование нейросетевых алгоритмов способствует оптимизации управления образовательными курсами и повышению уровня их востребованности среди студентов, а также ставится вопрос о дальнейших исследованиях данной темы.

Ключевые слова: нейросетевые алгоритмы, обработка отзывов, образовательные платформы, рекуррентные нейронные сети (RNN), модели BERT, интерпретируемость моделей.

Article submission date: 04.04.2025

UDC 004.891.2
IRSTI 28.23.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-59-74>

^{1*}**Assymkhan N.,**

Master's student, ORCID ID: 0009-0002-0398-5645,

*e-mail: anb.asymhan@gmail.com

¹**Momynkul N.,**

Master's student, ORCID ID: 0009-0009-0555-3636,

e-mail: n_momynkul@kbtu.kz

¹**Kartbayev A.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0003-0592-5865,

e-mail: a.kartbayev@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

OPTIMIZING INDOOR THERMAL COMFORT PREDICTION USING MACHINE LEARNING MODELS

Abstract

Predicting thermal comfort in indoor environments is important for improving residents' well-being, productivity, and energy efficiency. This study explores machine learning approaches, specifically Support Vector Machines (SVM) and Random Forest (RF), to improve thermal comfort prediction. Traditional methods rely on subjective assessments, whereas our approach leverages data-driven models trained on large thermal comfort datasets. The dataset underwent rigorous preprocessing, with 80% used for training and 20% for testing. The integration of the Internet of Things (IoT) further enhances predictive accuracy by enabling adaptive control in smart building systems. A comparative analysis of SVM and RF reveals that while both models effectively capture the complex interactions between environmental parameters and resident comfort, RF demonstrates greater stability and higher accuracy in most scenarios. The paper proposes potential strategies for integrating additional predictive features to further enhance model accuracy, demonstrating the advancement of machine learning in optimizing indoor comfort.

Keywords: heating systems, energy management, thermal comfort, support vector machine, random forest, machine learning

Introduction

Optimizing indoor environments for human habitation is essential for ensuring comfort, health, and productivity. Thermal comfort, a key aspect of indoor environmental quality, is significantly influenced by climate change, which has led to more frequent and severe extreme weather events. The ability to predict and manage thermal conditions effectively has become increasingly important as it directly impacts human well-being. Poor indoor thermal conditions, whether excessively hot or cold, can cause discomfort, fatigue, and health issues, ultimately reducing productivity in workplaces, educational institutions, and homes.

Beyond individual well-being, the economic impact of inadequate thermal comfort is substantial. When indoor conditions are not optimized, occupants rely more on heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems to maintain comfort, leading to increased energy consumption and higher utility costs. This, in turn, contributes to environmental degradation due to higher carbon emissions. Consequently, there is an urgent need for advanced predictive models capable of accurately forecasting occupants' thermal comfort preferences in diverse environmental conditions and architectural settings. These models must integrate multiple factors, including ambient temperature, humidity, clothing insulation, metabolic rate, and personal preferences, to provide precise thermal comfort assessments.

Developing reliable predictive models requires collaboration across multiple disciplines, including architecture, engineering, psychology, and data science. By combining insights from environmental science, human physiology, and behavioral psychology, researchers can create more effective models. Advances in sensor technology, data analytics, and machine learning have made it possible to generate real-time insights into thermal comfort, allowing building managers and occupants to adjust indoor environments dynamically. This not only improves occupant well-being but also contributes to energy efficiency and sustainability.

To understand the real-world impact of thermal comfort, consider a simple scenario. Suppose a student is studying in a closed room during a hot summer day. The student shuts the door to minimize noise and closes the window to block out the heat. However, this leads to a buildup of carbon dioxide, reducing oxygen levels and increasing the temperature inside the room. As a result, the student experiences discomfort, distraction, and fatigue. The simple act of opening the door to improve ventilation can significantly enhance comfort. This example highlights the importance of managing thermal comfort effectively to maintain productivity and overall well-being.

Predicting thermal comfort involves analyzing multiple factors, including air temperature, humidity, air velocity, and clothing insulation. Traditional methods rely on human comfort models, such as the Predicted Mean Vote (PMV), but these approaches can be subjective and time-consuming. Recent advancements in machine learning have provided new opportunities to develop more accurate predictive models. The goal of this study investigates the use of Support Vector Machines (SVM) and Random Forest (RF) algorithms for thermal comfort prediction, comparing their performance across various conditions.

By following this structured approach, we aim to validate these goals and assess the effectiveness of SVM and RF in predicting thermal comfort. These findings could offer valuable insights for building designers and facility managers to optimize indoor environments. Both SVM and RF are supervised learning algorithms that can be trained on datasets containing thermal comfort parameters alongside human feedback, allowing them to predict thermal comfort levels in new conditions.

The Internet of Things (IoT) is transforming building management systems (BMS), with projections indicating that the number of connected devices will reach 125 billion by 2030. Despite these advancements, current BMS solutions remain limited in flexibility, particularly in feedback control mechanisms. To address these limitations, researchers have explored adaptive control algorithms and modular architecture. One proposed solution, the “Semantically-Enhanced IoT-enabled Intelligent Control System” (SEMIoTICS), leverages redundancy in control system capabilities and dynamically adjust configurations based on quality-of-service criteria [1]. Additionally, Model Predictive Control (MPC) has gained popularity in optimizing HVAC systems for energy efficiency and occupant comfort. However, the computational complexity of nonlinear MPC models has driven researchers to investigate linear controllers using Jacobian linearization. A bilinear model for nonlinear MPC was proposed to minimize energy costs while maintaining comfort, but its high computational demands present challenges for real-time implementation [2].

To further optimize HVAC systems, reinforcement learning (RL)-based approaches have been developed. One study implemented Deep Deterministic Policy Gradients (DDPG) within the Transactive Energy Simulation Platform (TESP) to achieve intelligent and granular HVAC control. The approach optimizes a cost function that balances electricity expenses with occupant dissatisfaction, incorporating a market price prediction model using Artificial Neural Networks (ANN) and a DDPG-based RL control algorithm [3]. Another study presented a simulation model integrating both high- and low-level controllers for a vehicle’s air conditioning system, focusing on occupant thermal comfort while ensuring system efficiency. The study also introduced an Eco-Cooling Strategy using MPC to optimize cooling performance while minimizing energy consumption [4].

Fuzzy logic-based models have also been explored for variable-speed air conditioning load control, allowing for energy-efficient HVAC operation while improving thermal comfort. These controllers, implemented in microcontrollers, VLSI chips, and EDA tools, precisely regulate temperature and humidity levels. By integrating fuzzy logic with other control methods, system performance and energy efficiency can be significantly improved [5]. Another study examined classical HVAC

control strategies, such as PID controllers, and more advanced approaches like MPC. The research introduced the LAMDA controller, designed to enhance real-time responsiveness and dynamically adjust parameters based on contextual information [6].

Increasing energy consumption in commercial buildings, particularly HVAC systems, has driven research into energy optimization. Although HVAC technologies have improved Demand Response (DR) programs, challenges remain in implementing model predictive control strategies. Machine learning techniques such as Reinforcement Learning and Supervised Learning have been investigated for their potential in improving HVAC efficiency [7]. Research on DR in Building Energy Management (BEM) has primarily focused on optimizing HVAC operations through various methods, including dynamic demand response controllers, mixed-integer nonlinear optimization models, and occupancy-based controllers. Additional strategies, such as event-based control, mutual information frameworks, and MPC, have also been explored [8]. A recent study proposed a three-layered model for optimizing energy consumption in smart homes, incorporating data collection, prediction, and optimization stages. The model uses an Alpha Beta filter for noise reduction, DELM for dynamic parameter prediction, and fuzzy controllers for refined control decisions, ultimately improving both energy efficiency and occupant comfort [9].

In the field of thermal comfort assessment, a novel model has been introduced that excludes demographic factors such as gender and age. Instead, it considers six key thermal variables: air temperature, mean radiant temperature, relative humidity, air speed, clothing insulation, and metabolic rate. This model was developed using supervised machine learning and applied in a commercial building setting [10]. Another study conducted in Bilbao, Spain, utilized the KUBIK energy efficiency research facility to analyze human thermal perception in response to external temperatures, aiming to enhance indoor comfort while reducing energy consumption [11]. Additional research has applied the Fanger method and ASHRAE Standard 55 to evaluate indoor thermal comfort under real-world conditions, with a focus on improving well-being, productivity, and energy conservation [12].

A separate study introduced a model that predicts group thermal comfort by integrating individual preferences with environmental parameters. The model segments occupants based on Body Mass Index (BMI), predict their individual comfort zones, and makes adjustments to maximize group satisfaction [13]. In general, optimizing thermal comfort in buildings is essential for occupant well-being, productivity, and energy efficiency. Standard assessment models take into account factors such as air temperature, humidity, radiant temperature, and air velocity, with ASHRAE 55 standards providing guidelines for acceptable conditions. Alternative predictive models, including ANN, hybrid ANN-fuzzy models, SVM, decision trees, fuzzy logic, and Bayesian networks, have demonstrated improved flexibility and accuracy in thermal comfort prediction [14].

Thermal comfort models are typically categorized into static, adaptive, and data-driven models. Static models, such as the Predicted Mean Vote (PMV), integrate environmental and personal factors but lack adaptability to individual responses. Adaptive models consider psychological and behavioral influences, making them more responsive to changes in occupant preferences. Data-driven models leverage real-time sensor data for dynamic and adaptive thermal comfort assessments [15]. One study developed a building thermal model utilizing low-resolution data from smart thermostats, significantly improving model accuracy across different seasons. This data-driven approach replaces traditional empirical models with surrogate features that approximate internal heat gains. The model can be deployed on edge devices or cloud infrastructure, enhancing its scalability for real-world applications [16].

Research on innovative cooling technologies has also expanded, with studies exploring Thermoelectric Air Duct systems. Neural networks have demonstrated high accuracy in predicting comfort parameters within dynamic environments, highlighting the complex relationships between climatic variables, occupant comfort, and HVAC system performance [17]. More broadly, predicting thermal comfort and optimizing energy use in buildings is essential for ensuring occupant satisfaction and sustainability. Key factors influencing comfort include metabolic rate, clothing insulation, and air temperature. Deep feedforward neural networks and reinforcement learning models have been applied to thermal comfort prediction, with promising results in improving energy efficiency and indoor climate management [18].

A novel methodology has been introduced to develop predictive models for Combined Heat, Cooling, and Power (CHCP) systems using machine learning, data mining, and statistical techniques. This methodology consists of four stages: data preparation, data engineering, model building, and model evaluation. The first stage involves retrieving failure events, labeling instances, and compiling a comprehensive dataset. The data engineering stage improves data representation through feature extraction and selection. Machine learning algorithms are then used for classification and regression tasks, while the final evaluation step assesses model performance based on time to failure (TTF) and other relevant metrics [19].

Another study proposed a new approach to analyzing thermal comfort in indoor environments using Relative Thermal Sensation (RTS). Unlike traditional models, which rely on discrete thermal sensation scales, RTS represents thermal perception as a continuous function over time, allowing for a more detailed understanding of human comfort. The researchers introduced a 3-point Relative Thermal Sensation Scale (RTSS) to collect real-time data, capturing subtle changes in thermal perception that conventional methods might overlook. Furthermore, the study integrated RTS data with Absolute Thermal Sensation measurements from a modified version of the ASHRAE 7-point scale, enhancing the overall predictive power of the thermal comfort model [20].

Interpretable thermal comfort systems are also being explored to improve both energy efficiency and occupant satisfaction in smart buildings. Traditional models, such as PMV, often lack interpretability, making it difficult for building operators to understand the key drivers of thermal comfort. To address this issue, researchers have proposed interpretable machine learning models using techniques such as Partial Dependence Plots (PDP) and SHAP values. These methods provide insight into how environmental conditions affect human comfort and help operators identify the most influential features under different scenarios. Additionally, interpretable machine learning algorithms are being developed to create surrogate models that replicate and potentially improve upon existing comfort models, making them more accessible for building management applications [21].

This paper focuses on the use of Support Vector Machines (SVM) and Random Forest (RF) algorithms for predicting thermal comfort in buildings. The study aims to evaluate their strengths and weaknesses and compare their performance under different experimental conditions. The ultimate goal is to provide a comprehensive understanding of how machine learning can contribute to optimizing indoor environments and improving occupant comfort. To guide the research, we propose the following hypotheses:

1. Data Preparation: Removing NaN values and setting a threshold for feature selection based on data availability will improve model accuracy.
2. Feature Encoding: Comparing different encoding strategies (OneHotEncoder, LabelEncoder, and Word2Vec) will help determine the most effective method for handling categorical variables.
3. Feature Selection: Applying the SelectKBest model will identify the most relevant features for predicting thermal comfort, streamlining the modeling process.
4. Feature Variants: Testing different feature combinations after filtering will improve temperature prediction accuracy.

Through these hypotheses, we aim to validate the potential of SVM and RF models in thermal comfort prediction, as shown in Fig.1. The findings will contribute to a better understanding of how machine learning can support smart building management, leading to enhanced indoor comfort and energy efficiency.



Figure 1 – Overview of the methodology

Materials and methods

The dataset, sourced from the ASHRAE and available on Kaggle [22], comprises 70 columns and 107,583 rows, containing data collected globally from 1995 to 2015. Initially, an examination of the dataset description led to a filtering process. This revealed that some columns contained sparse data. Consequently, a threshold was set at 60,000 rows; data points below this limit were discarded. Additionally, it was necessary to address missing values. Despite starting with 107,583 rows, the removal of rows with NaN values was essential to ensure data integrity. Another analytical approach considered was the use of the Interquartile Range (IQR) method to identify and eliminate outliers, further refining the dataset's quality (See Fig.2).

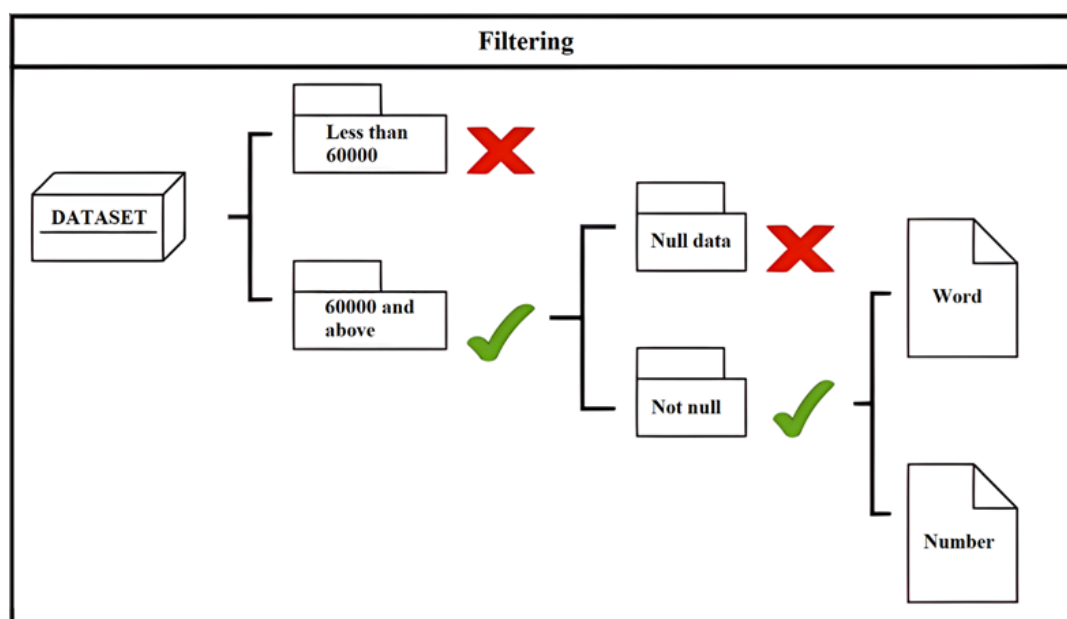


Figure 2 – Data filtering scheme

Regarding the conversion of text data to numeric form, as shown in Fig.3, two encoding options were evaluated: LabelEncoder and OneHotEncoder. The decision to proceed with OneHotEncoder was based on its superior performance in preliminary results, effectively transforming categorical text data into a usable format for machine learning models.

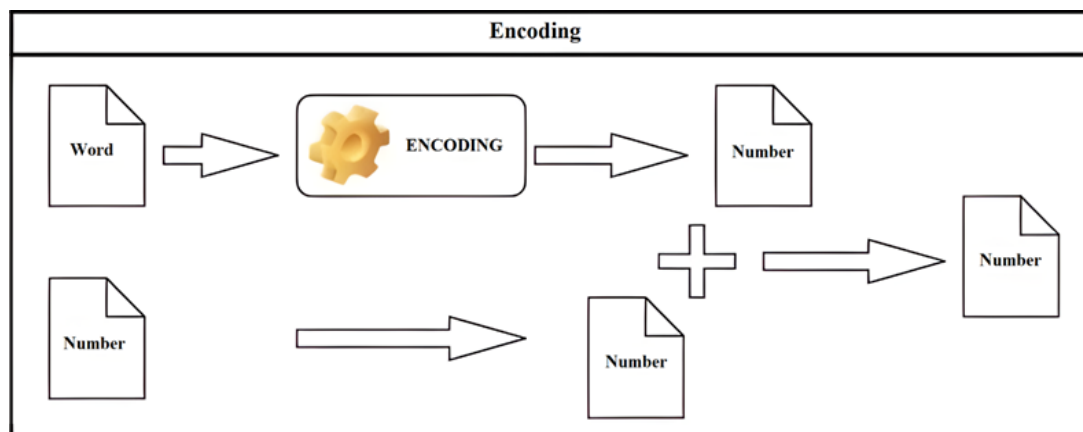


Figure 3 – Encoding scheme for the conversion of text data to numeric form

In the feature selection process, as shown in Fig.4, two methods were considered: using the SelectBest library or selecting based on correlation with a predefined threshold. The chosen method was to use correlations, specifically setting a boundary above 50% to determine relevant features. The final set of features selected includes Age, Clothing insulation (Clo), Sex, Metabolic rate (Met), Thermal preference, Year, Season, Köppen climate classification, Cooling strategy at the building level, City, Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), Air temperature (C), Outdoor monthly air temperature (C), Relative humidity (%), and Air velocity (m/s). This selection represents the culmination of extensive testing with various combinations of features, all of which will be detailed in the Experiments section of our study.

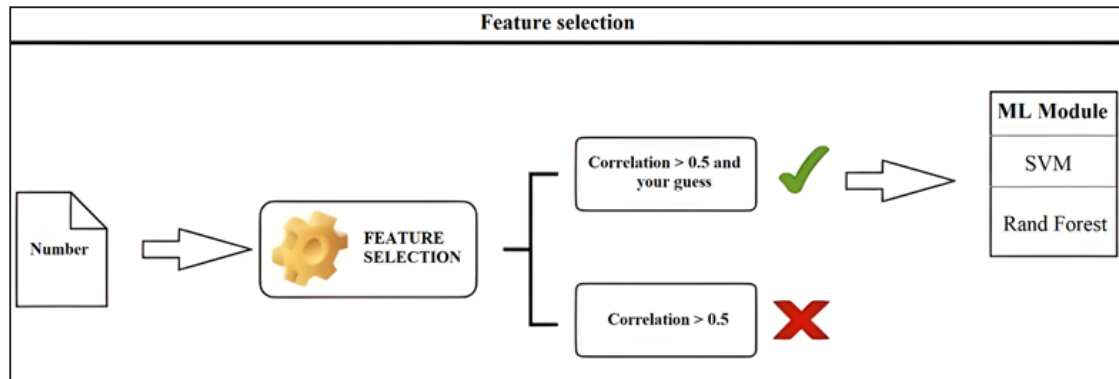


Figure 4 – Feature selection

These features were instrumental in enhancing the predictive accuracy of our models. For the experimental setup, the dataset was divided into 80% for training and 20% for testing. Typically, thermal comfort ratings in the dataset ranged from 1 to 6. Another hypothesis tested was the conversion of these label values into integers. By reducing the range of thermal comfort ratings from six to three distinct categories, we observed a significant improvement in model accuracy. This transformation simplifies the model's classification task, enabling more precise predictions.

Inter Quartile Range (IQR). The Interquartile Range (IQR) is a measure of statistical dispersion that is calculated as the difference between the third quartile (Q3) and the first quartile (Q1) of a dataset. Mathematically, it is defined as:

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (1)$$

where Q1 is the median of the lower half of the dataset and Q3 is the median of the upper half of the dataset. It is particularly useful in identifying and dealing with outliers, which are data points that significantly differ from the rest of the dataset. Here's how the IQR is calculated and how it can be used to remove outliers:

1) Calculation of IQR:

- ♦ Firstly, you need to arrange your dataset in ascending order.
- ♦ Then, find the median of the dataset, which is the middle value when the data is sorted. If the dataset has an odd number of observations, the median is the middle value. If it has an even number of observations, the median is the average of the two middle values.
- ♦ Divide the dataset into two halves at the median. The lower half contains all the values less than or equal to the median, and the upper half contains all the values greater than or equal to the median.
- ♦ Find the median of each half. This gives you the first quartile (Q1) and the third quartile (Q3) of the dataset, respectively.

The IQR is then calculated as the difference between Q3 and Q1: $IQR = Q3 - Q1$.

2) Identifying outliers using IQR:

- ♦ Outliers can be detected using the IQR method by considering values that lie below $Q1 - 1.5 \times IQR$ or above $Q3 + 1.5 \times IQR$. These values are considered to be significantly different from the rest of the dataset.

- ♦ Values below $Q1 - 1.5 \times IQR$ or above $Q3 + 1.5 \times IQR$ are commonly referred to as lower and upper bounds, respectively.

- ♦ Any data points falling outside these bounds can be considered outliers.

3) Removing outliers using IQR:

- ♦ Once outliers are identified using the IQR method, you can choose to remove them from the dataset to improve the robustness of your analysis or model.

- ♦ Outliers can be removed by filtering the dataset to exclude any observations that fall outside the lower and upper bounds defined by $Q1 - 1.5 \times IQR$ and $Q3 + 1.5 \times IQR$, respectively.

- ♦ After removing outliers, the dataset may be more representative of the underlying distribution and less influenced by extreme values.

4) Considerations:

- ♦ While the IQR method is effective in identifying and removing outliers, it's important to exercise caution and consider the context of the data.

- ♦ Outliers may sometimes carry valuable information or be indicative of rare but important events. Therefore, the decision to remove outliers should be made judiciously based on the specific goals of the analysis or model.

- ♦ Additionally, the choice of the multiplier (1.5 in the conventional method) used to define the bounds can be adjusted depending on the desired level of sensitivity to outliers.

In summary, the IQR is a useful statistical measure for assessing the spread of a dataset and identifying outliers. By calculating the IQR and defining bounds based on it, outliers can be effectively detected and removed, leading to a more robust analysis or model.

Applied methods. SVM is a supervised machine learning algorithm well-suited for both classification and regression tasks. In thermal comfort prediction, SVM is employed to delineate the complex interrelationships between various environmental factors—like temperature, humidity, and air velocity—and human thermal comfort responses. The algorithm focuses on maximizing the margin between classes in classification tasks or minimizing errors in regression, all while effectively controlling for overfitting, as shown in Fig. 5. By training on labeled datasets that encapsulate corresponding thermal comfort ratings, SVM learns to accurately predict thermal comfort levels based on specific environmental inputs.

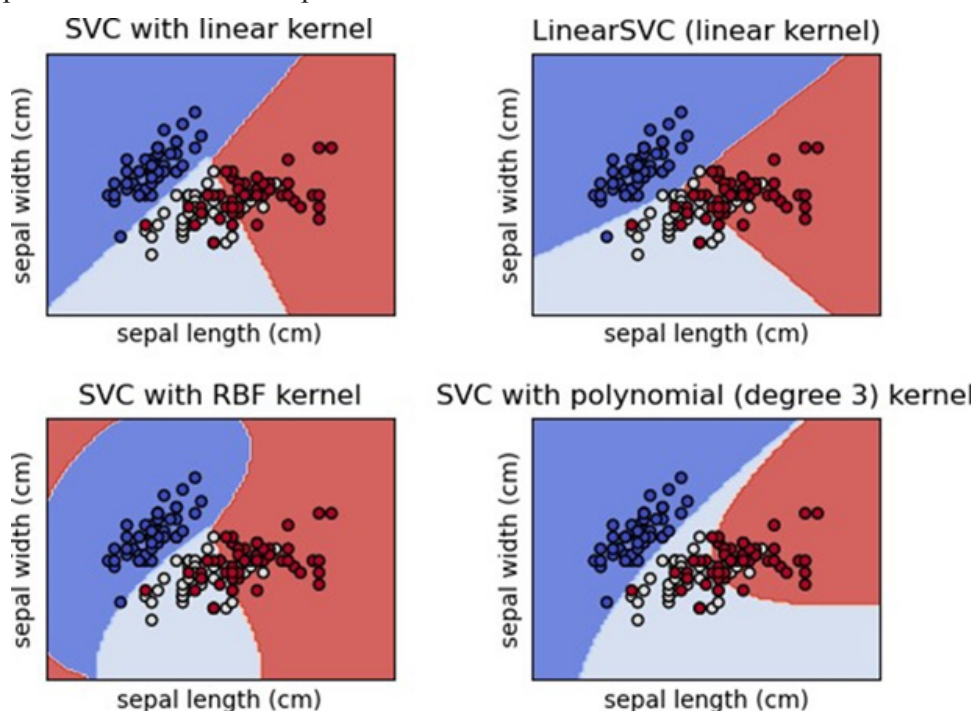


Figure 5 – Support Vector Machine (SVM)

Random Forest is a machine learning algorithm capable of handling classification and regression tasks. It follows an ensemble learning approach, using multiple decision trees to improve accuracy and robustness, as shown in Fig. 6. The process involves data cleaning, handling missing values, and applying transformations. Random sampling selects subsets for training, recursive partitioning creates decision trees, and a voting mechanism aggregates predictions. This method effectively models nonlinear relationships and interactions between environmental variables, making it suitable for predicting thermal comfort.

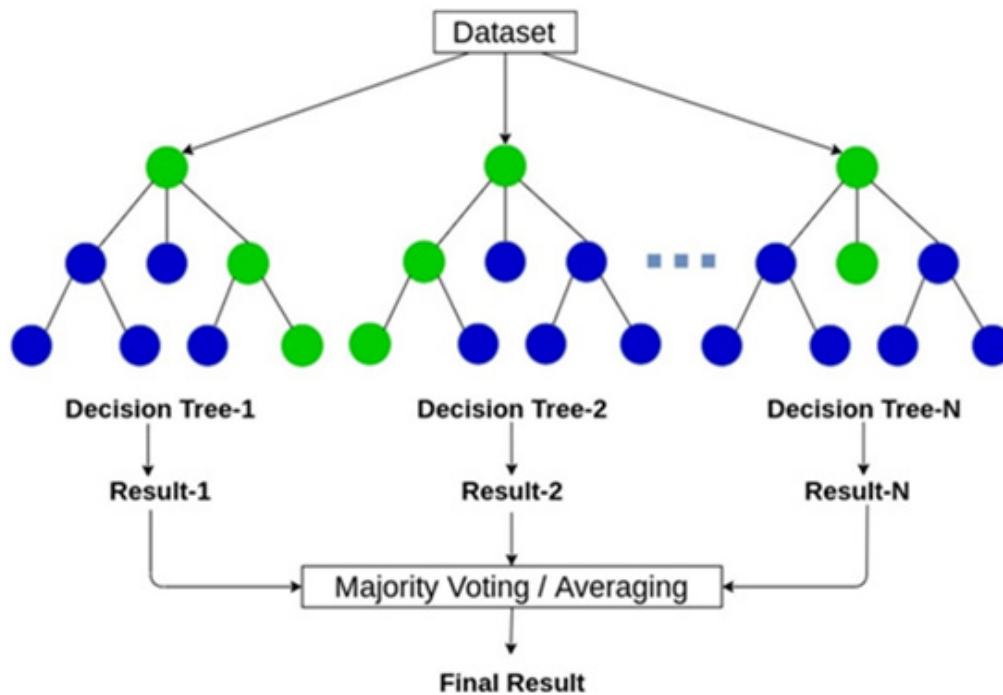


Figure 6 – Multiple decision trees of the Random Forest

Both SVM and Random Forest capture complex relationships between environmental factors and thermal responses, ensuring reliable predictions across different conditions. While SVM provides clear decision boundaries for easier interpretation, Random Forest highlights feature importance through its ensemble structure, despite being less interpretable at the individual tree level. Their flexibility allows integration with various environmental sensors and monitoring systems. A novel approach involves using the ‘Thermal preference’ column as a predictive variable instead of the traditional ‘Thermal comfort’ scale. By simplifying comfort classification from six levels to three, the prediction process becomes more streamlined, potentially enhancing model accuracy.

Integration with IoT. The IoT component of the system is integral to enhancing building management by deploying a comprehensive network of sensors throughout the facility. These sensors are designed to monitor a variety of environmental conditions in real-time, including temperature, humidity, CO₂ levels, and occupancy rates. The data collected by these IoT sensors is then transmitted to a central server, where it is stored and analyzed. For efficient and reliable data transfer, wireless communication protocols such as Wi-Fi, Bluetooth, or LoRaWAN are utilized.

The AI models within the system leverage this real-time data to continuously refine their predictions and immediately adjust the building’s HVAC system to achieve optimal thermal comfort. A key feature of this setup is its feedback loop mechanism, which plays a critical role in maintaining desired thermal conditions. The AI actively processes the incoming data from the IoT sensors and either make recommendations or directly control the HVAC system’s operations, as shown in Fig. 7.

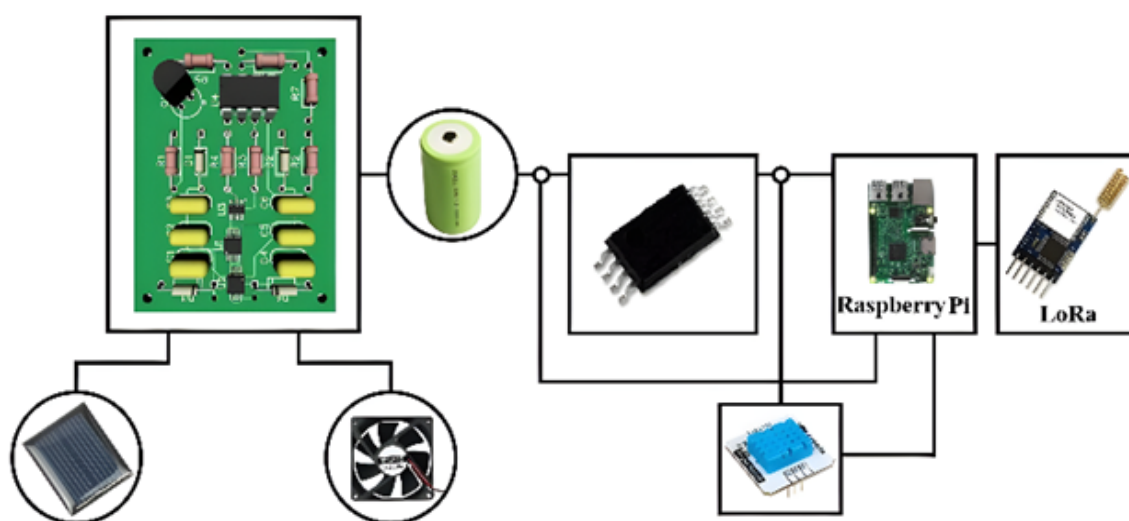


Figure 7 – General design of the IoT

The device, powered by a rechargeable battery (referred to as the “sensor node” in our model), collects data from sensors and transmits it to the central device. In this setup, temperature and humidity sensors monitor environmental conditions to support specific tasks. The only requirement for this topology is that all sensor nodes must be within 100 meters of the central device.

This model’s topology ensures that each sensor node communicates only with the central device, preventing unreliable direct communication between nodes. The central device, in turn, connects to the global network, structuring and forwarding the data to a database. If deviations from comfort levels are detected, the system dynamically adjusts temperature, humidity, or airflow, ensuring continuous thermal comfort by responding to environmental changes and occupancy patterns.

A Raspberry Pi with a LoRa module functions as the central device, while sensor nodes consist of a microcontroller, LoRa module, and sensors, all powered by a rechargeable battery. An integrated analog-to-digital converter facilitates sensor data collection, and a fully charged battery can sustain operation for up to 30 days.

Results

After an initial filtering process, our dataset was reduced from 70 to 21 columns. We continued to refine our feature selection by using correlations and deliberately avoided incorporating Fanger’s features. Further filtration using both correlation analysis and the SelectKbest model, which assists in identifying the most impactful features, led us to define three distinct sets of features:

- ♦ First Set (17 features): Age, Sex, Metabolic rate (Met), Thermal preference, Thermal sensation, Clothing insulation (Clo), Subject’s height (cm), Subject’s weight (kg), Year, Season, Köppen climate classification, Building type, Cooling strategy at building level, Air temperature (C), Outdoor monthly air temperature (C), Relative humidity (%), and Air velocity (m/s).

- ♦ Second Set (9 features): Age, Sex, Met, Clo, Year, Season, Air temperature (C), Relative humidity (%), Air velocity (m/s).

- ♦ Third Set (15 features): Age, Clo, Sex, Met, Thermal preference, Year, Season, Köppen climate classification, Cooling strategy at building level, City, Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), Air temperature (C), Outdoor monthly air temperature (C), Relative humidity (%), Air velocity (m/s).

Following feature selection, our dataset contained 17 columns and 6,765 rows. Initially, using all 17 features yielded unsatisfactory results. Testing with 9 and then 15 features also failed to significantly improve accuracy. These iterations helped validate our hypotheses; notably, the IQR method improved accuracy by 3–4%, while reducing label values increased accuracy by 20–23%.

Parameter tuning further enhanced model performance. The optimal settings for the SVM model were an RBF kernel with $\gamma = 0.001$ and $C = 3$. For the Random Forest model, the best configuration included 300 estimators and a maximum depth of 15. These settings provided the highest accuracy.

A comparison between LabelEncoder and OneHotEncoder revealed a performance difference of 2–4%, leading us to favor OneHotEncoder. Data standardization, using StandardScaler and MinMaxScaler, had minimal impact on accuracy. Tables 1, 2, and 3 present the initial prediction results, illustrating performance across different feature sets and modeling approaches.

Table 1 – Iteration of 17 features

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.509	0.451	0.509	0.436
RF	0.543	0.505	0.543	0.5

Table 2 – Iteration of 9 features

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.507	0.461	0.507	0.438
RF	0.526	0.513	0.526	0.49

Table 3 – Iteration of 15 features

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.533	0.448	0.533	0.433
RF	0.54	0.475	0.539	0.482

Based on the initial results, we further pursued enhancing model accuracy by employing the hypotheses formulated earlier in our study. The implementation of the IQR method was a particular focus, aimed at refining the data by removing outliers, which are often a source of prediction error. Tables 4, 5, and 6 below display the outcomes of applying the IQR method. These tables illustrate the effect of this technique on the overall performance of the models:

Table 4 – Iteration of 17 features with IQR

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.522	0.44	0.522	0.441
RF	0.548	0.517	0.548	0.504

Table 5 – Iteration of 9 features with IQR

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.507	0.44	0.383	0.424
RF	0.52	0.501	0.52	0.479

Table 6 – Iteration of 15 features with IQR

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.563	0.539	0.563	0.425
RF	0.57	0.494	0.57	0.5

Building on the improvements, which enhanced model accuracy by approximately 2–5%, our next step involves reducing label values to further increase the accuracy. This simplifies the output space of the model, potentially making it easier for the algorithms to distinguish between different states of thermal comfort. Tables 7–9 show the result of this approach:

Table 7 – Iteration of 17 features with reducing labels

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.715	0.644	0.715	0.614
RF	0.744	0.708	0.744	0.704

Table 8 – Iteration of 9 features with reducing labels

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.688	0.598	0.688	0.569
RF	0.699	0.657	0.699	0.645

Table 9 – Iteration of 15 features with reducing labels

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.78	0.608	0.78	0.683
RF	0.78	0.719	0.78	0.727

We utilized Random sampling to select subsets of the dataset for training individual decision trees within our Random Forest model. By integrating strategies such as feature reduction, IQR, and Random sampling, we have enhanced the construction and performance of our decision trees. The process is further refined through selective feature selection, which concentrates on the most impactful variables. This allows the model to focus on the data elements that are most predictive of the outcomes, significantly enhancing the overall performance of the model. These integrations contribute to a more efficient predictive tool, suitable for complex scenarios in smart building environments. After incorporating the feature-reduced model, further simplifying the feature space, we observed the following results, as in Tables 10–12:

Table 10 – Iteration of 17 feature-reduced labels and IQR

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.726	0.598	0.726	0.621
RF	0.733	0.678	0.733	0.688

Table 11 – Iteration of 9 feature-reduced labels and IQR

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.706	0.498	0.706	0.584
RF	0.717	0.668	0.717	0.653

Table 12 – Iteration of 15 feature-reduced labels and IQR

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1 score
SVM	0.835	0.697	0.835	0.76
RF	0.821	0.738	0.821	0.766

The implications of these findings are significant, especially in the context of predictive accuracy in environmental modeling for predicting thermal comfort levels in smart building systems. The Receiver Operating Characteristic (ROC) curves graph, presented in Fig. 8, provides a visual comparison of the performance of two machine learning models: SVM and Random Forest (RF). These curves are essential tools in evaluating the models by plotting the True Positive Rate (sensitivity) against the False Positive Rate (1-specificity) at various threshold settings. The area under the curve (AUC) serves as a summary measure of the model's ability to discriminate between positive and negative classes.

In this analysis, the SVM model demonstrates an AUC of 0.72, while the RF model exhibits a slightly superior AUC of 0.84. This suggests that the RF model has a better overall performance in distinguishing between the classes under study, likely due to its ensemble nature, which typically provides a more robust prediction by averaging multiple decision processes.

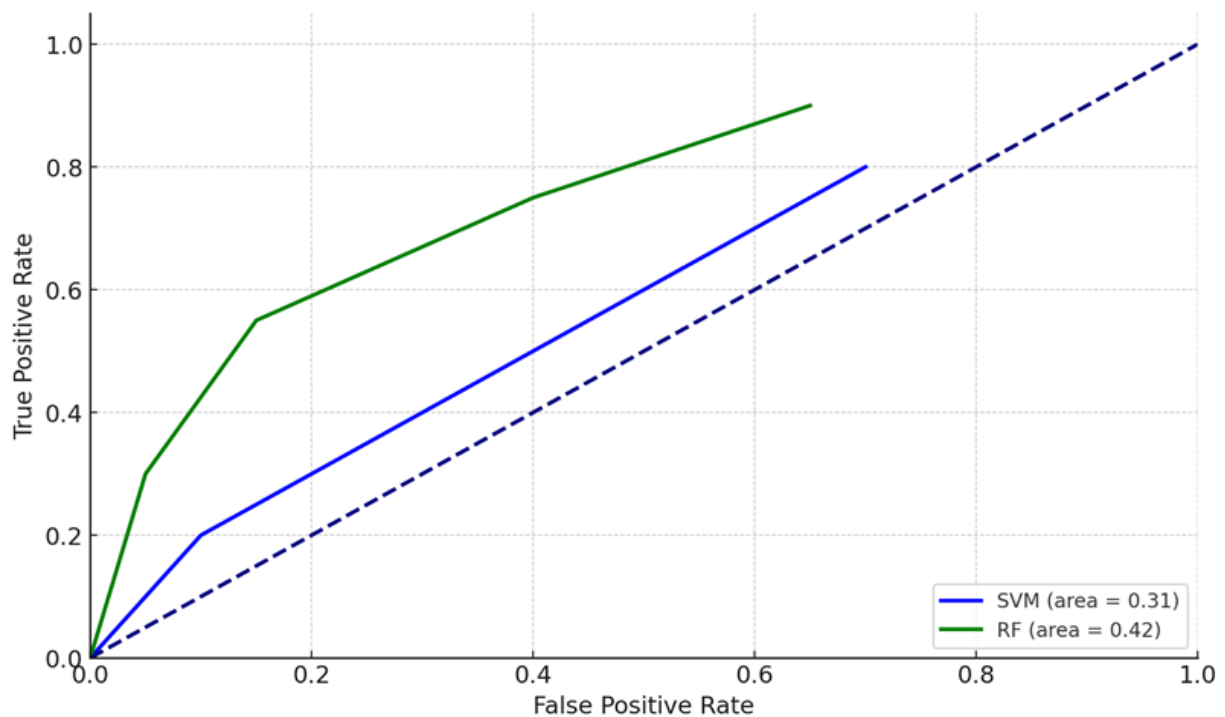


Figure 8 – ROC comparison for the SVM and RF

Discussion

This research evaluates the effectiveness of Random Forest and SVM models in predicting thermal comfort and thermal preference across different feature sets. Our study introduced eight new features while retaining seven features used in prior research. Comparing predictions for Thermal Comfort and Thermal Preference, we found only a 1–3% performance gap, with Random Forest demonstrating greater stability.

Initial tests using feature sets with 9 and 15 variables showed alternative models leading in performance. However, a major shift occurred when we simplified the prediction scale from six to three Thermal Comfort levels. This refinement improved the model's ability to differentiate comfort levels more effectively. While this simplification enhanced classification accuracy, some researchers argue that reducing the scale may obscure subtle nuances in human comfort perception. A more granular scale could potentially provide richer insights into individual experiences.

The implementation of the IQR method improved model accuracy by approximately 3–4%, primarily by filtering out extreme values. However, this approach may also remove valid outliers, limiting insights into environmental conditions' full impact on thermal comfort. The more substantial improvement came from reducing label values, which increased accuracy by 20–23%. While this demonstrates the impact of statistical methods on predictive performance, it also raises concerns about whether reducing labels compromises data depth and nuance.

The system architecture, designed for efficient data transmission, relies on sensor nodes communicating with a central device, typically a Raspberry Pi, over distances up to 100 meters [23]. While this setup ensures reliable data management, some experts question its scalability in large buildings. Additionally, concerns exist over Raspberry Pi's processing power, which may be insufficient for high-demand real-time processing. Balancing user control with automated efficiency remains a critical consideration. While direct user interaction with building systems enhances customization, excessive manual adjustments may reduce energy efficiency. This study contributes to the future of smart building management by integrating advanced computational techniques with IoT applications.

Conclusion

This study has demonstrated the effectiveness of Random Forest and SVM algorithms in predicting thermal comfort and thermal preference, leveraging a refined feature set that combines both newly introduced variables and established factors from prior research. The results indicate that the difference in predictive performance between thermal comfort and thermal preference is minimal, typically within 1–3%, with Random Forest consistently exhibiting superior stability across various feature sets. A key finding is that reducing the thermal comfort scale from six to three levels significantly enhanced the models' discriminative capabilities, simplifying the classification process while maintaining high predictive accuracy.

Despite these improvements, some challenges remain. The reduction of the thermal comfort scale, while beneficial for prediction accuracy, raises concerns about oversimplifying human thermal perception, potentially overlooking subtle variations in comfort levels. Similarly, the IQR method improved model accuracy by removing outliers, but its tendency to exclude extreme yet valid data points may limit insights into the full range of environmental influences on comfort. The substantial increase in accuracy from label reduction further highlights the significance of statistical techniques in predictive modeling, though questions remain about their impact on data granularity.

Future research will explore additional predictive variables, such as Heart Rate Variability (HRV), to assess physiological responses to thermal conditions. Furthermore, deep learning approaches, including CNNs, LSTM networks, and DBNs, will be investigated to enhance the predictive power of thermal comfort models. By integrating these advanced techniques, this research aims to further refine smart building management systems, ensuring they continue to evolve to meet both current and future demands.

REFERENCES

- 1 Milis G.M., Panayiotou C.G., and M.M. Polycarpou. IoT-Enabled Automatic Synthesis of Distributed Feedback Control Schemes in Smart Buildings. *IEEE Internet of Things Journal* 8 (4), 2615–2626 (2021). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3019662>.
- 2 Khather S.I., Ibrahim M.A., and A. I. Abdullah. Review and Performance Analysis of Nonlinear Model Predictive Control – Current Prospects, Challenges and Future Directions. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 56 (4), 593–603 (2023). <https://doi.org/10.18280/jesa.560409>.
- 3 Liu B., Akcakaya M., and T. E. Mcdermott. Automated Control of Transactive HVACs in Energy Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12 (3), 2462–2471 (2021). <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3042498>.
- 4 Wang H., Amini M.R., Hu Q., Kolmanovsky I., and J. Sun. Eco-Cooling Control Strategy for Automotive Air-Conditioning System: Design and Experimental Validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29 (6), 2339–2350 (November 2021). <https://doi.org/10.1109/TCST.2020.3038746>.
- 5 Shah Z.A., Sindi H.F., Ul-Haq A., and M.A. Ali. Fuzzy Logic-Based Direct Load Control Scheme for Air Conditioning Load to Reduce Energy Consumption. *IEEE Access*, 8, 117413–117427 (2020). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3005054>.
- 6 Morales Escobar L., Aguilar J., Garcés-Jiménez A., Gutierrez De Mesa J.A., and J.M. Gomez-Pulido. Advanced Fuzzy-Logic-Based Context-Driven Control for HVAC Management Systems in Buildings. *IEEE Access*, 8, 16111–16126 (2020). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966545>.
- 7 Azuatalam D., Lee W.-L., de Nijs F., and A. Liebman. Reinforcement Learning for Whole-Building HVAC Control and Demand Response. *Energy and AI*, 2 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2020.100020>.
- 8 Mansy H., and S. Kwon. Optimal HVAC Control for Demand Response via Chance-Constrained Two-Stage Stochastic Program. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12, no. 3, 2188–2200 (May 2021). <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3037668>.
- 9 Rabinowitz A., Araghi F.M., Gaikwad T., Asher Z.D., and T.H. Bradley. Development and Evaluation of Velocity Predictive Optimal Energy Management Strategies in Intelligent and Connected Hybrid Electric Vehicles. *Energies*, 14 (5713) (2021). <https://doi.org/10.3390/en14185713>.
- 10 Mohamed Salleh F.H., Saripuddin M.B., and R.B. Omar. Predicting Thermal Comfort of HVAC Building Using 6 Thermal Factors. 2020 8th International Conference on Information Technology and Multimedia (ICIMU) (Selangor, Malaysia, 2020), pp. 170–176. <https://doi.org/10.1109/ICIMU49871.2020.9243466>.
- 11 Morresi N., et al. Sensing Physiological and Environmental Quantities to Measure Human Thermal Comfort Through Machine Learning Techniques. *IEEE Sensors Journal*, 21 (10), 12322–12337 (May 15, 2021). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3064707>.
- 12 Widiastuti R., Zaini J., Caesarendra W., Shona Laila D., and J. Candra Kurnia. Prediction on the Indoor Thermal Comfort of Occupied Room Based on IoT Climate Measurement Open Datasets. 2020 International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System (ICIMCIS) (Jakarta, Indonesia, 2020), pp. 40–45. <https://doi.org/10.1109/ICIMCIS51567.2020.9354277>.
- 13 Zhang Z., Lin B., Geng Y., Zhou H., Wu X., and C. Zhang. The Effect of Group Perception Feedbacks on Thermal Comfort. *Energy and Buildings*, 254 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111603>.
- 14 Mohamed Salleh F.H., and M.B. Saripuddin. Monitoring Thermal Comfort Level of Commercial Buildings' Occupants in a Hot-Humid Climate Country Using K-Nearest Neighbors Model. 2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (Shanghai, China, 2020), pp. 209–215. <https://doi.org/10.1109/ICPRE51194.2020.9233145>.
- 15 Khalil M., Esseghir M., and L. Merghem-Boulahia. An IoT Environment for Estimating Occupants' Thermal Comfort. 2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (London, UK, 2020), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PIMRC48278.2020.9217157>.
- 16 Zhang X., Pipattanasomporn M., Chen T., and S. Rahman. An IoT-Based Thermal Model Learning Framework for Smart Buildings. *IEEE Internet of Things Journal*, 7 (1), 518–527 (January 2020). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2951106>.
- 17 Irshad K., Khan A.I., Irfan S.A., Alam M.M., Almalawi A., and M.H. Zahir. Utilizing Artificial Neural Network for Prediction of Occupants Thermal Comfort: A Case Study of a Test Room Fitted With

a Thermoelectric Air-Conditioning System. IEEE Access, 8, 99709–99728 (2020). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985036>.

18 Gao G., Li J., and Y. Wen. DeepComfort: Energy-Efficient Thermal Comfort Control in Buildings Via Reinforcement Learning. IEEE Internet of Things Journal, 7 (9), 8472–8484 (September 2020). <https://doi.org/10.1109/IJOT.2020.2992117>.

19 Coutinho Demetrios A.M., D. De Sensi, Lorenzon A.F., Georgiou K., Nunez-Yanez J., Eder K., and S. Xavier-de-Souza. Performance and Energy Trade-Offs for Parallel Applications on Heterogeneous Multi-Processing Systems. Energies, 13 (2409) (2020). <https://doi.org/10.3390/en13092409>.

20 Wang Z., Onodera H., and R. Matsushashi. Proposal of Relative Thermal Sensation: Another Dimension of Thermal Comfort and Its Investigation. IEEE Access, 9, 36266–36281 (2021). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3062393>.

21 Cibir N., Tibo A., Golmohamadi H., Skou A., and M. Albano. Machine Learning-Based Algorithms to Estimate Thermal Dynamics of Residential Buildings with Energy Flexibility. Journal of Building Engineering, 65 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105683>.

22 Miller C., Picchetti B., Fu C., and J. Pantelic. Limitations of Machine Learning for Building Energy Prediction: ASHRAE Great Energy Predictor III Kaggle Competition Error Analysis. Science and Technology for the Built Environment, 28 (5), 610–627 (2022). <https://doi.org/10.1080/23744731.2022.2067466>.

23 Chuang S.-Y., Sahoo N., Lin H.-W., and Y.-H. Chang. Predictive Maintenance with Sensor Data Analytics on a Raspberry Pi-Based Experimental Platform. Sensors, 19 (3884) (2019). <https://doi.org/10.3390/s19183884>.

^{1*}Асымхан Н.Б.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-0398-5645,

*e-mail: anb.asymhan@gmail.com

¹Момынкул Н.У.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0009-0555-3636,

e-mail: n_momynkul@kbtu.kz

¹Картбаев А. Ж.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-0592-5865,

e-mail: a.kartbayev@kbtu.kz

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ МОДЕЛЬДЕРІН ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ КЕҢІСТІКТЕРДЕГІ ЖЫЛУЛЫҚ-ЖАЙЛЫЛЫҚТЫ БОЛЖАУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа

Кеңістіктердегі жылулық-жайлылықты болжау – адамдардың әл-ауқатын, өнімділігін және энергия тиімділігін арттыру үшін маңызды. Бұл зерттеуде термиялық жайлылықты болжауды жетілдіру мақсатында машиналық оқыту тәсілдері, атап айтқанда, тірек векторлық машиналар (SVM) мен кездейсоқ орман (RF) әдістері қарастырылады. Дәстүрлі әдістер көбінесе субъективті бағалауларға сүйенсе, ұсынылып отырған тәсіл – ауқымды жылулық-жайлылық деректер жинақтарында оқытылған мәліметтерге негізделген модельдерді қолдануға бағытталған. Деректер жинағы мұқият алдын ала өңделіп, 80%-ы оқытуға, ал 20%-ы тестілеуге пайдаланылды. Интернет заттарының (IoT) интеграциясы болжау дәлдігін одан әрі арттырып, ақылды құрылыс жүйелерінде бейімделетін басқаруға жол ашады. SVM мен RF модельдерінің салыстырмалы талдауы қоршаған орта параметрлері мен жолаушылар жайлылығы арасындағы күрделі өзара әрекеттесуді тиімді бейнелейтінін көрсетті, алайда RF моделі көптеген сценарийлерде жоғары тұрақтылық пен дәлдік көрсетті. Бұл мақалада модельдердің дәлдігін арттыру үшін қосымша болжау айнымалыларын енгізудің ықтимал стратегиялары ұсынылады және үй ішіндегі жайлылықты оңтайландырудағы машиналық оқытудың әлеуеті көрсетіледі.

Тірек сөздер: жылыту жүйелері, энергияны басқару, жылулық-жайлылық, тірек векторлық машина, кездейсоқ орман, машиналық оқыту.

¹*Асымхан Н.Б.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-0398-5645,

*e-mail: anb.asymhan@gmail.com

¹Момынкул Н.У.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0009-0555-3636,

e-mail: n_momynkul@kbtu.kz

¹Картбаев А.Ж.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-0592-5865,

e-mail: a.kartbayev@kbtu.kz

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОвого КОМФОРТА В ПОМЕЩЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация

Прогнозирование теплового комфорта в помещениях важно для улучшения самочувствия людей, повышения производительности и энергоэффективности. В данном исследовании рассматриваются подходы машинного обучения, в частности машины опорных векторов (SVM) и случайный лес (RF), для улучшения прогнозирования теплового комфорта. Традиционные методы опираются на субъективные оценки, в то время как наш подход использует модели, основанные на данных, обученные на больших наборах данных по тепловому комфорту. Наборы данных прошли тщательную предварительную обработку, 80% использовались для обучения и 20% – для тестирования. Интеграция Интернета вещей (IoT) еще больше повышает точность прогнозирования, обеспечивая адаптивное управление в системах интеллектуальных зданий. Сравнительный анализ SVM и RF показывает, что хотя обе модели эффективно отражают сложное взаимодействие между параметрами окружающей среды и комфортом жильцов, RF демонстрирует большую стабильность и более высокую точность в большинстве сценариев. В статье предлагаются возможные стратегии интеграции дополнительных прогностических функций для дальнейшего повышения точности модели, что демонстрирует прогресс машинного обучения в оптимизации комфорта в помещениях.

Ключевые слова: системы отопления, управление энергопотреблением, тепловой комфорт, метод опорных векторов, случайный лес, машинное обучение.

Article submission date: 26.04.2024

УДК 004.82
МРНТИ 28.23.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-75-84>

¹**Капалова Н.А.,**

к.т.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0001-9743-9981,

e-mail: nkapalova@mail.ru

^{2*}**Абишева А.Ж.,**

докторант, ORCID ID: 0000-0002-6557-3067,

*e-mail: ak_maral@mail.ru

¹Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК,
г. Алматы, Казахстан,

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби,
г. Алматы, Казахстан

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ КРИПТОГРАФИЧЕСКИМИ КЛЮЧАМИ И ПРИМЕНЕНИЮ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ

Аннотация

В данной работе рассматривается проблема управления криптографическими ключами и подчеркивается важность разработки эффективных протоколов, обеспечивающих безопасность и аутентичность обмена ключами между участниками криптографической системы. В качестве одного из результативных и практических методов проверки подлинности подписи рассматривается схема Шнорра, обладающая свойствами, такими как целостность, невозможность отказа от подписи и защита от повторной передачи сообщений. Также описана модификация данной схемы и процесс формирования непозиционной полиномиальной системы счисления, а также вычисление значений с использованием выбранных оснований. Применение непозиционной полиномиальной системы счисления при разработке нетрадиционных алгоритмов для электронной цифровой подписи и управления ключами в криптографических системах может существенно повысить их надежность и эффективность. Кроме того, рассматривается возможность повышения устойчивости предложенной схемы к квантовым атакам.

Ключевые слова: криптография, управление криптографическими ключами, непозиционные полиномиальные системы счисления, цифровая подпись, схема Шнорра.

Введение

В условиях современной цифровой трансформации, охватывающей все сферы жизнедеятельности, вопросы информационной безопасности становятся особенно важными. Организации сталкиваются с необходимостью защиты своих данных и обеспечения безопасности цифровых процессов, и в этом контексте криптографические ключи играют ключевую роль в обеспечении безопасности шифрования, цифровых подписей и аутентификации. Однако эффективное использование криптографических ключей требует не только внедрения современных криптографических алгоритмов, но и внимательного подхода к их управлению. Для обеспечения надежной защиты конфиденциальной информации и систем организациям необходимо уделять особое внимание правильному управлению ключами. В этой статье рассматриваются основные вопросы и проблемы управления ключами, где алгоритмы шифрования известные, но используемые ключи должны быть или секретными, или открытыми, оставаясь при этом неотъемлемой частью криптографических технологий.

Часто в криптографических приложениях наиболее уязвимым звеном является, как правило, управление ключами. Так как использование криптографии при безопасном хранении, об-

мене ключами и применении между пользователями представляет сложность. Это доказывает, что даже надежные системы защиты могут быть скомпрометированы по причине уязвимого управления ключами, ведь вся безопасность находится в самих ключах [1].

Эффективная система управления криптографическими ключами в сочетании с современными методами шифрования позволяет обеспечить надежную защиту информационных систем организаций. Процесс управления ключами включает в себя такие этапы, как их генерация, распространение, обновление, отзыв, хранение, резервное копирование и восстановление, импорт и экспорт, контроль использования, установление срока действия и уничтожение. Подходы к управлению ключами зависят от их типа – симметричного или асимметричного. В настоящее время исследования в этой области сосредоточены на стандартизации и обеспечении совместимости систем управления ключами [2].

Актуальность управления ключами в криптографических системах сегодня обусловлена ростом киберугроз, утечек данных и сложностью современных атак, что требует надежных методов защиты конфиденциальной информации. Развитие технологий, таких как облачные вычисления и Интернет вещей, наряду с увеличением числа пользователей и алгоритмов шифрования порождает необходимость в эффективных протоколах аутентификации и безопасного обмена ключами, а ужесточение нормативных требований обязывает организации соответствовать высоким стандартам криптографической безопасности.

Таким образом, в современном мире, где безопасность данных и конфиденциальность информации имеют первостепенное значение, управление ключами в криптографических системах остается одной из главных областей исследований и практики. Оно обеспечивает основу для создания надежных механизмов защиты в условиях постоянно усложняющихся угроз.

Основные проблемы управления криптографическими ключами включают зависимость от надежности центров распределения (KDC), где компрометация может привести к утечке ключей, и вопросы масштабируемости, поскольку физическая доставка ключей не подходит для больших сетей, что часто требует использования доверенных посредников. Дополнительно частые изменения ключей для ограничения потенциального ущерба и необходимость разделения мастер-ключей и сеансовых ключей добавляют сложности, так как неправильное управление может создать уязвимости даже при использовании надежных алгоритмов шифрования.

Одной из основных задач в асимметричной криптографии, в том числе системы электронной цифровой подписи, является управление открытыми ключами. Так как открытый ключ доступен абсолютно всем пользователям, необходимо подтверждение принадлежности идентификатору и его подлинности. Для этого необходимо предоставить доступ к настоящим открытым ключам, обеспечить защиту и предотвратить возможность подмены их злоумышленниками и наладить процесс отзыва в случае небезопасного хранения ключей.

Защита открытых ключей от подмены обеспечивается посредством использования сертификатов, которые предоставляют достоверность информации открытого ключа владельца с помощью цифровой подписи доверенного лица. Существуют централизованные системы сертификации и децентрализованные системы сертификации. В децентрализованных системах пользователи формируют сеть доверия, подписывая сертификаты знакомых и проверенных лиц, в то время как централизованные системы полагаются на специализированные центры сертификации (CA), принадлежащие авторитетным организациям.

Центр сертификации отвечает за создание закрытого ключа, выпуск собственного сертификата, генерацию сертификатов для конечных пользователей с последующим заверением цифровой подписью, а также управляет процессом отзыва устаревших или скомпрометированных сертификатов и ведет реестр активных и отозванных ключей. Пользователи могут обращаться в такие центры для получения личного сертификата, проверки сертификатов других пользователей или уточнения информации о статусе ключей.

Материалы и методы

Существует множество зарубежных исследований в области управления сертификатами ключей в криптографических системах, где ключевое место занимает инфраструктура открытых ключей (PKI), обеспечивающая эффективное управление цифровыми сертификатами и открытыми ключами. Для полного понимания принципов работы систем PKI необходимо ознакомиться с основами криптографии с открытым ключом, поскольку эти системы не только используют этот подход, но и строят свою функциональность на его базе. Несмотря на разнообразие криптографических алгоритмов, для понимания работы PKI достаточно рассмотреть два основных процесса: цифровую подпись и шифрование.

Зарубежные исследования сосредоточены на управлении жизненным циклом сертификатов, где автоматизация процессов выпуска, обновления, отзыва и хранения позволяет повысить безопасность и эффективность системы. Изучаются модели доверия и иерархии сертификации, что включает анализ как иерархических, так и сетевых структур, а также методы управления доверительными отношениями между различными удостоверяющими центрами. Разрабатываются эффективные механизмы отзыва сертификатов, включая использование списков отозванных сертификатов (CRL) и протоколов OCSP, для своевременного исключения скомпрометированных или устаревших сертификатов. Кроме того, исследователи уделяют внимание безопасности и защите PKI, выявляя уязвимости систем и разрабатывая методы их устранения, а также обеспечивая целостность и конфиденциальность сертификатов.

В зарубежной работе [3] рассматриваются протоколы управления сертификатами в рамках инфраструктуры открытых ключей (PKI), включая процессы регистрации, обновления и отзыва сертификатов. Отмечается, что удостоверяющие центры (CA) сталкиваются с проблемами масштабируемости по мере роста числа пользователей и сертификатов, а процедура обновления в крупных системах требует значительных ресурсов. Несмотря на общее описание процессов управления сертификатами, вопросы масштабируемости в условиях глобальных развертываний остаются нерешенными.

Документ [4] содержит профиль использования сертификатов X.509 и списков отозванных сертификатов (CRL) в интернет-среде, а также определяет требования к процессу управления сертификатами. Одной из ключевых проблем, обозначенных в работе, является увеличение размера CRL, что замедляет процесс проверки их актуальности. Хотя обсуждаются механизмы CRL и OCSP, эффективные решения для масштабируемых сетевых инфраструктур не предлагаются. Также альтернативы, такие как использование короткоживущих сертификатов, пока не получили широкого распространения.

В исследовании [5] анализируются политики сертификации и подходы к управлению сертификатами в PKI, а также их влияние на безопасность систем. Несмотря на предложенную стратегию управления сертификатами, не учитываются современные вызовы, связанные с облачными и IoT-средами, где особенно важна поддержка динамического обновления сертификатов без прерывания работы сервисов. Несмотря на достижения в области управления ключевой информацией, остается ряд нерешенных задач, включая дальнейшую стандартизацию PKI, обеспечение масштабируемости, ускорение отзыва сертификатов, интеграцию с новыми технологиями (такими как IoT, облачные платформы и блокчейн), а также усиление защиты удостоверяющих центров.

В данной работе [6] рассматриваются вопросы управления сертификатами и ключами электронных подписей (ЭЦП) в рамках специализированных информационных систем (ИСС), с особым акцентом на системы электронного документооборота (СППЭД). Описывается их роль в обеспечении безопасности и целостности информации, а также основные функции, такие как юридическая значимость электронных сообщений, установление достоверного времени создания, определение авторства документов, централизованный контроль доступа и управление ключами ЭЦП. Особое внимание уделяется методам защиты от компрометации ключей, надежной идентификации и регистрации пользователей, а также процедурам выпу-

ска, отзыва и проверки статуса сертификатов. Автор подчеркивает важность ЭЦП для предотвращения подделок электронных документов, что способствует созданию доверительной цифровой среды для участников документооборота. Однако остаются открытыми вопросы, связанные с полнотой и гибкостью методов защиты от новых угроз, а также с необходимостью практического тестирования предложенных схем, что открывает новые возможности для будущих исследований в области криптографии и защиты информации.

В диссертации [7] рассматривается разработка метода и создание протокола утверждаемой групповой электронной цифровой подписи (ЭЦП), а также протокола коллективной ЭЦП, обладающего улучшенной безопасностью и не требующего использования вспомогательных открытых ключей. Предложен метод для построения протоколов комбинированной коллективной ЭЦП, основанный на вычислениях по простому модулю и отличающийся выполнением дополнительной операции возведения в целочисленную степень по трудно разложимому модулю. Особое внимание уделяется маскировке открытых ключей участников, которые представляют собой значения однонаправленной функции, зависящей от открытых ключей подписантов и секретного ключа руководителя группы. Это обеспечивает повышение уровня безопасности, который предоставляет данный протокол.

Электронная цифровая подпись (ЭЦП) представляет собой дополнительный элемент, прикрепляемый к электронному документу или сообщению, который может быть сформирован исключительно владельцем закрытого ключа – секретной информации. С помощью специального алгоритма можно установить соответствие между данной подписью и закрытым ключом подписывающего, что подтверждает ее подлинность. Под ЭЦП также понимается комплекс криптографических алгоритмов и правил, предназначенных для создания и проверки цифровых подписей [8].

Рассмотрим одну из известных схем электронной цифровой подписи – протокол Шнорра, который был создан криптографом Клаусом Шнорром в 1989 г. [9] и используется для обеспечения аутентификации сообщений и цифровых подписей. Цифровые подписи – это математические алгоритмы, используемые для проверки целостности и подлинности цифровых сообщений, которые доказывают, что они отправлены именно тем пользователем и не было компрометации при передаче.

Нужно отметить, что схема Шнорра имеет ряд преимуществ перед другими протоколами цифровой подписи, а именно: она обеспечивает высокую устойчивость к атакам и исключает возможность подмены сообщений, так как основана на неразрешимости проблем дискретного логарифмирования. Короткие цифровые подписи, создаваемые по схеме Шнорра, способствуют эффективной передаче данных, в отличие от более громоздких подписей, а используемые случайные числа при создании подписи делают взлом методом перебора сложным. При этом следует избегать как повторного использования случайного значения r , чтобы не возник взлом секретного ключа. Данное требование располагает известную теорему сравнений о существовании обратного элемента. Схему Шнорра можно использовать в распределенных сетях для проверки аутентификации нескольких пользователей в системах безопасности коллективной подписи. Для уникальности идентификаторов сообщений схема Шнорра использует криптографические хеш-функции, чтобы защитить данные от подделки и обеспечить целостность [10].

Важно отметить, что квантовые вычисления представляют угрозу безопасности для схемы Шнорра, которая основана на задаче дискретного логарифмирования. Квантовые алгоритмы, например алгоритм Шора, способны эффективно решать эту задачу, что ослабляет защиту схемы Шнорра перед квантовыми атаками. Тем не менее, используя методы защиты, такие как нулевое разглашение информации, можно разработать подходы, способные повысить безопасность данной схемы в постквантовой среде.

Несмотря на уязвимость дискретного логарифма перед квантовыми атаками, схема Шнорра остается полезной в гибридных системах, где применяются дополнительные механизмы защиты, включая хеширование сообщений и другие методы предотвращения модификации

данных. Это делает ее перспективной для интеграции с квантово-устойчивыми протоколами [11]. Дальнейшие исследования необходимы для разработки эффективных способов адаптации таких схем к вызовам квантовых технологий.

В 1970-х годах разрабатывались алгоритмы, основанные на модульной арифметике, такие как RSA (1977), использующий операции возведения в степень по модулю. Однако в этот период системы остаточных классов (СОК) еще не рассматривались в контексте криптографии. Далее появились первые исследования, посвященные применению СОК для ускорения вычислений в криптографических алгоритмах. Одним из первых направлений стало использование СОК в схемах быстрого вычисления модульных операций (остатков от деления). Со временем СОК начала применяться в аппаратных криптографических устройствах, включая ускорители RSA и криптографические процессоры, где она позволяла выполнять вычисления параллельно. После этого начались исследования по использованию СОК в эллиптической криптографии и гомоморфном шифровании. В настоящее время СОК, а также другие нелинейные позиции систем счисления (НПСС) изучаются в контексте постквантовой криптографии, облачных вычислений и криптографических методов, ориентированных на искусственный интеллект, включая интеграцию с нейронными сетями. Несмотря на то что применение НПСС в криптографии начало развиваться еще раньше, наибольший интерес к этой теме возник в конце 1990-х – начале 2000-х годов, когда стало очевидно, что СОК способна значительно повысить эффективность криптографических вычислений.

Алгоритм Шнорра – это криптографический алгоритм, который может быть использован в контексте управления сертификатами, особенно для создания цифровых подписей. Он основан на идее доказательства с нулевым разглашением, позволяя пользователю доказать владение некоторой информацией без раскрытия самой информации.

Приведем краткое описание алгоритма [12]:

Генерация ключей

p, q – простые числа, где $p - 1$ делит q ; g – порождающий элемент группы Z_p^* ; k – случайное число, $1 < k < q$; $y = g^k \bmod p$ – создание открытого ключа. Открытый ключ (p, q, g, y) , секретный ключ k .

Вычисление подписи для сообщения M включает следующие шаги:

1. Генерируется случайное число, которое действует как одноразовый секретный ключ r , $1 < r < q$.

2. Вычисляется $R = g^r \bmod p$.

3. К сообщению M присоединяется число R и от значения $H: E = H(M||R)$ вычисляется H хеш-функция. Значение E – это первая часть подписи. Здесь хеш-функция принимает сообщение произвольной длины на вход.

4. Вычисляется вторая часть подписи: $S = r + kE \bmod q$, здесь k – секретный ключ.

Проверка подписи.

1. R' вычисление: $R' = g^S y^{-E} \bmod p$.

$M||R'$ вычисляется хеш-значение $H: E' = H(M||R')$. Здесь хеш-функция возвращает фиксированный конкретной длины.

2. E и E' значения сравниваются. Если $E = E'$, тогда подпись считается верной.

Результаты и обсуждение

С учетом рациональных преимуществ алгоритма в данной работе предложена модификация схемы электронной цифровой подписи (ЭЦП) с применением непозиционной системы счисления. Алгоритм Шнорра рассматривается в контексте использования непозиционных полиномиальных систем счисления (НПСС), что позволяет повысить эффективность и криптостойкость криптографической схемы. Ниже представлены этапы модифицированного алгоритма Шнорра, реализованного на основе НПСС.

Генерация ключей. Производится формирование непозиционной полиномиальной системы счисления. В качестве рабочих оснований НПСС выбираются неприводимые двоичные полиномы $p_1(x), p_2(x), \dots, p_n(x)$ со степенями $a_1, a_2, \dots, a_n$, соответственно, при этом сумма степеней рабочих оснований должна совпадать с длиной ключа, то есть $\sum_{i=1}^n a_i = L$. Для выполнения китайской теоремы об остатках все основания должны быть различными.

Также выбираем $q_1, q_2, \dots, q_n$ – простые числа, удовлетворяющие условие $2^{a_i} - 1 = 0 \pmod{q_i}$, $i = \overline{1, n}$ ($1 < q_i < \deg(p(x)) - 1$), и для каждого основания $p_i(x)$ выбирается примитивный элемент (многочлен) $g_i(x)$, $0 < g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x) < P(x)$, удовлетворяющие условию $g_i(x)^{\deg(p_i(x))-1} = 1 \pmod{p_i(x)}$, $i = \overline{1, n}$.

Выбираем случайные числа $k_i < q_i$, $i = \overline{1, n}$. Значения k_i должны храниться в секрете, так как это закрытый ключ $ЗК = \{k_i\}$.

Для каждого рабочего основания вычисляется выражение $y_i(x) = g_i(x)^{k_i} \pmod{p_i(x)}$, $i = \overline{1, n}$.

Открытый ключ $ОК = \{P, Q, G, Y\}$, то есть $P = \{p_1(x), p_2(x), \dots, p_n(x)\}$, $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, $G = \{g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x)\}$, $Y = \{y_1(x), y_2(x), \dots, y_n(x)\}$.

Подпись

A : Для подписи выбирает $r_i < q_i$ случайные числа, $R_i = g_i(x)^{r_i} \pmod{p_i(x)}$, $i = \overline{1, n}$

$A \rightarrow B$: вычисляет первую часть подписи $E_i = H(M || R_i)$, $i = \overline{1, n}$

A : вычисляет вторую часть подписи $S_i = r_i + k_i * E_i \pmod{q_i}$, $i = \overline{1, n}$

$A \rightarrow B$: Отправляет сообщение M с подписью (E_i, S_i) .

Проверка подписи

B : вычисляет $R'_i = g_i(x)^{S_i} y_i(x)^{E_i^{-1}} \pmod{p_i(x)}$,

$H(M || R_i) = E'_i$ вычисляет хэш-значение.

E_i и E'_i сравниваются. Если $E_i = E'_i$ равны, тогда подпись верна.

Структура представленного алгоритма ориентирована на генерацию криптографических параметров, необходимых для обеспечения безопасного обмена ключевой информацией. Корректное понимание и точная реализация соответствующих криптографических протоколов играют ключевую роль в поддержании надежности и целостности всей системы безопасности.

Схема электронной цифровой подписи Шнорра [13] отличается от алгоритма Эль-Гамала рядом важных особенностей. Здесь главное преимущество – это размер подписи. Подпись по схеме Шнорра занимает всего 320 бит, при этом обеспечивает высокий уровень безопасности. Чтобы взломать такую подпись, злоумышленнику нужно выполнить как минимум 280 сложных вычислений, что делает взлом крайне трудным. Для сравнения: чтобы добиться такого же уровня защиты в схеме Эль-Гамала, нужно использовать намного более длинные ключи – 2048 бит. Из-за этого итоговая подпись получается очень большой – около 4096 бит, что в десятки раз больше, чем у Шнорра. Поэтому схема Шнорра гораздо удобнее для практического применения, особенно там, где важны скорость и экономия места.

Схема Шнорра также обладает важным теоретическим свойством: хеш-функция вычисляется сразу после генерации рандомизационного параметра r . Благодаря этому можно логически доказать, что если существует эффективный алгоритм подделки подписи, то существует и эффективный алгоритм решения задачи дискретного логарифмирования [14]. Это подтверждает теоретическую обоснованность стойкости схемы, поскольку ее взлом сводится к решению задачи дискретного логарифмирования, лежащей в основе криптосистемы.

При внедрении квантовых технологий существуют серьезные потенциальные последствия для существующих криптографических систем, такие как уязвимость к квантовому криптоанализу. Существующие криптографические системы могут оказаться устаревшими, и потребуются переход на новые криптографические методы, которые обеспечивают безопасность даже в условиях квантовых атак. Это включает в себя разработку алгоритмов, осно-

ванных на задачах, которые пока не поддаются эффективным квантовым методам, например, задачи решетки или многомерных полиномов.

В связи с этим исследования и анализ в данной статье алгоритма ЭЦП с применением НПСС в управлении криптографическими сертификатами ключей в криптографических системах являются актуальными.

В НПСС основаниями являются не простые числа [15], а неприводимые многочлены над полем $GF(2)$ [16]. Применение НПСС способствует сокращению длины ключей, а также улучшению как стойкости, так и эффективности непозиционных криптоалгоритмов. Эффективность достигается благодаря особенностям НПСС, которые позволяют выполнять все арифметические операции параллельно по модульным основаниям данной системы.

Методы, разработанные на основе таких систем, относятся к категории нетрадиционных криптографических алгоритмов. Использование НПСС в построении криптографических защитных механизмов для хранения и передачи информации значительно повышает их эффективность и стойкость [17].

В рамках нетрадиционных криптосистем процесс формирования ЭЦП осуществляется для сообщений фиксированной длины. В непозиционных криптоалгоритмах криптостойкость определяется не только длиной ключей, но и особенностями самого алгоритма цифровой подписи, включая полный секретный ключ. Кроме того, при увеличении порядка неприводимых многочленов с двоичными коэффициентами наблюдается их значительный рост, что дает широкий выбор полиномиальных оснований для обеспечения надежности системы.

Заключение

В условиях стремительной цифровой трансформации вопросы информационной безопасности, особенно в части управления криптографическими ключами, приобретают первостепенное значение. Эффективное управление ключами – критически важный элемент защиты данных и обеспечения безопасности цифровых процессов. Это требует внимательного подхода к таким операциям, как генерация, распространение, хранение и отзыв ключей. Среди ключевых вызовов можно выделить необходимость доверия к центрам ключевой инфраструктуры, обеспечение масштабируемости систем, а также регулярное обновление ключей. Все это подчеркивает важность разработки надежных, устойчивых к угрозам протоколов.

На фоне растущего числа киберугроз и широкого распространения новых технологий, таких как облачные вычисления, вопросы управления криптографическими ключами остаются в фокусе научных и практических исследований.

Для повышения эффективности криптографических операций в разработанной системе применяется НПСС (непозиционная система счисления). Все операции умножения и возведения в степень двоичных полиномов выполняются в рамках НПСС, что позволяет осуществлять вычисления параллельно по выбранным полиномиальным основаниям $p_1(x)$, $p_2(x)$, ..., $p_n(x)$. Благодаря этому существенно увеличивается скорость выполнения операций.

На основе этих принципов была модифицирована схема асимметричного шифрования Шнора. Предложенная система электронной цифровой подписи на базе НПСС реализуется в три этапа: 1) формирование системы НПСС; 2) генерация цифровой подписи; 3) проверка цифровой подписи.

Программные реализации такой криптосистемы способны конкурировать с аппаратными средствами за счет гибкости и высокой производительности. Использование НПСС с подбором подходящих оснований и соответствующих им примитивных неприводимых многочленов, а также персонализированных секретных ключей пользователей позволяет значительно повысить криптостойкость системы и ее эффективность при управлении криптографическими сертификатами.

На фоне быстрого прогресса квантовых технологий все более важной становится задача адаптации существующих криптографических схем к возникающим угрозам. Предлагаемая система может быть дополнительно усилена с использованием, например, решеточных подходов, что откроет путь к созданию квантово-устойчивых решений. Важно акцентировать внимание на необходимости разработки таких систем, которые не только противостоят квантовым атакам, но и остаются доступными и эффективными для широкого круга пользователей.

Информация о финансировании. Данная работа написана в рамках проекта BR24993052 «Разработка и исследование криптографических алгоритмов для защиты информации в системах с ограниченными ресурсами и оценка их стойкости».

REFERENCES

- 1 Fomina, I.A. Key management in cryptographic systems. Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I.Lobachevsky, 4(1), 165–169 (2010).
- 2 Moise, G., Gangea, O. Intelligent Management of the Cryptographic Keys. Int. J. of Computers, Communications & Control, 4(1), 150–157 (2011).
- 3 Adams, C., & Farrell, S. Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate Management Protocols. RFC 2510. (1999). <https://tools.ietf.org/html/rfc2510>.
- 4 Housley, R., Polk, W., Ford, W., & Solo, D. Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate and CRL Profile. RFC 3280. (2002). <https://tools.ietf.org/html/rfc3280>.
- 5 Chokhani, S., & Ford, W. Internet Public Key Infrastructure Certificate Policy and Certification Practices Framework. RFC 2527. (1995). <https://tools.ietf.org/html/rfc2527>.
- 6 Aristarkhov, I.V. Management of certificates of electronic signature verification keys. Diss. cand. of Technical Sciences. 2012 Moscow
- 7 Sinev, V.E. Methods of construction and development of practical group signature protocols and algebraic algorithms for protective transformations. Diss. cand. of Technical Sciences. St. Petersburg, 2017, 166 p.
- 8 Moldovyan, N.A., Moldovyan, A.A. Introduction to public key cryptosystems. Tutorial. St. Petersburg. "BHV-Petersburg", 2005
- 9 Schnorr, C.P. Efficient Signature Generation by Smart Cards. J. Cryptology, 161–174 (1991).
- 10 Kolesnikov P.V. Schnorr scheme in cryptography. Computer systems and networks: collection of articles of the 59th scientific conference of postgraduates, master's students and students, Minsk, April 17–21, 2023. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, 2023), pp. 393–396.
- 11 Watrous, Jo. Zero-knowledge against quantum attacks. Proceedings of the thirty-eighth annual ACM symposium on Theory of Computing. 296–305 (2008). <https://doi.org/10.1145/1132516.1132560>.
- 12 Schnorr, C.P. Efficient identification and signatures for smart cards. Advances in cryptology – CRYPTO'89. Springer-Verlag LNCS, 435, 239–252 (1990).
- 13 Moldovyan, D.N., Moldovyan, N.A. A New Hard Problem over Non-Commutative Finite Groups for Cryptographic Protocols. Proceedings of the international conference MMM-ACNS 2010. I. Kottenko and V. Skormin (Eds.): MMM-ACNS 2010, LNCS. Springer, Heidelberg. V. 6258. P. 183–194.
- 14 Pointcheval, D., Stern, J. Security Arguments for Digital Signatures and Blind Signatures. Journal of Cryptology, 13, 361–396 (2000).
- 15 Akushsky I. Ya., Yuditsky D.I. Machine arithmetic in residual classes. M.: Sov.radio, 1968. 439 p.
- 16 Biyashev R.G. Development and research of methods for end-to-end increase of reliability in data exchange systems of distributed automated control systems: Dis. d. tech. sciences. M., 1985. 328 p.
- 17 Biyashev R.G., Kapalova N.A., Nysanbaeva S.E. Development and study of a modified Diffie-Hellman algorithm based on modular arithmetic. Actual problems of information technology security: Proc. III Int. scientific-practical. conf. Under the general editorship of O.N. Zhdanov, V.V. Zolotarev. Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk, September 9–11, 2009 (Krasnoyarsk, 2009), pp. 18–22.

¹Капалова Н.А.,

т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0001-9743-9981,
e-mail: nkapalova@mail.ru

^{2*}Абишева А.Ж.,

докторант, ORCID ID: 0000-0002-6557-3067,
*e-mail: ak_maral@mail.ru

¹ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеу технологиялары институты,
Алматы қ., Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Алматы қ., Қазақстан

КРИПТОГРАФИЯЛЫҚ КІЛТТЕРДІ БАСҚАРУДЫҢ ЖӘНЕ САНДЫҚ ҚОЛТАҢБАНЫ ҚОЛДАНУДЫҢ ЗАМАНУИ ТӘСІЛДЕРІ

Аңдатпа

Бұл жұмыста криптографиялық кілттерді басқару мәселелері талданады және криптографиялық жүйеге қатысушылар арасындағы кілт алмасудың қауіпсіздігі мен шынайылығын қамтамасыз ететін тиімді хаттамалардың қажеттілігі негізделеді. Қол қоюдан бас тартпау және хабарламаны қайталанудан қорғау қасиеттеріне ие болатын аутентификацияның тиімді әдістерінің бірі – Шнорр схемасы қарастырылады. Позициялық емес полиномды санау жүйесін құру және таңдалған жұмыс негіздері бойынша мәндерді есептеу схемасы мен процедурасының модификациясы сипатталған. Криптографиялық жүйелерде сандық қолтаңбаның және кілттерді басқарудың дәстүрлі емес алгоритмдерін жасауда позициялық емес полиномды санау жүйесін пайдалану осы криптографиялық процедуралардың сенімділігі мен тиімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Ұсынылған схеманы кванттық шабуылдарға қарсы қорғанысты күшейту мүмкіндігі қарастырылған.

Тірек сөздер: криптография, криптографиялық кілттерді басқару, позициялық емес полиномды санау жүйесі, сандық қолтаңба, Шнорр схемасы.

¹Kapalova N.,

Cand.Tech.Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-9743-9981,
e-mail: nkapalova@mail.ru

^{2*}Abisheva A.,

PhD student, ORCID ID: 0000-0002-6557-3067,
*e-mail: ak_maral@mail.ru

¹Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK,
Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan

MODERN APPROACHES TO CRYPTOGRAPHIC KEY MANAGEMENT AND APPLICATION OF DIGITAL SIGNATURE

Abstract

This paper explores the challenges associated with cryptographic key management and highlights the importance of developing efficient protocols to ensure secure and trustworthy key exchange in cryptographic systems. It focuses on the Schnorr digital signature scheme, recognized for its features such as indivisibility, non-repudiation, and

resistance to message replay attacks. The study introduces a modified version of the Schnorr scheme, incorporating a non-positional polynomial number system. It outlines the process of generating random numbers for keys and computing necessary values using selected polynomial bases. The implementation of non-positional polynomial number system in the creation of non-traditional digital signature algorithms and key management mechanisms significantly improves both the reliability and performance of cryptographic operations. Furthermore, the paper discusses the potential for adapting the proposed scheme to enhance resistance against quantum computing threats, contributing to the development of quantum-resilient cryptographic solutions.

Keywords: cryptography, cryptographic key management, non-positional polynomial number systems, digital signature, Schnorr scheme.

Дата поступления статьи в редакцию: 23.04.2025

УДК 004.896
МРНТИ 28.23.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-85-97>

^{1,2}**Самигулина Г.А.,**

д.т.н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-1798-9161,

e-mail: kz.galinasamigulina@gmail.com

^{1,2*}**Самигулина З.И.,**

PhD, доцент, ORCID ID: 0000-0002-5862-6415,

*e-mail: z.samigulina@kbtu.kz

^{1,2}**Бекешев Д.Д.,**

магистр, ORCID ID: 0009-0002-8168-6368,

e-mail: dauletb01@gmail.com

¹Институт информационных и вычислительных технологий,
лаб. «Интеллектуальные системы управления и прогнозирования»,

г. Алматы, Казахстан

²Казахстанско-Британский технический университет,

г. Алматы, Казахстан

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация

Современные системы промышленной автоматизации в процессе эксплуатации генерируют большой объем производственных данных, обработка которых современными методами искусственного интеллекта позволяет своевременно осуществлять диагностику состояния и прогнозировать износ дорогостоящего оборудования. В статье разработана инновационная мультиагентная система на основе нейроиммунноэндокринного взаимодействия для диагностики промышленного оборудования. Система состоит из агентов, специализирующихся на редукции данных, на основе искусственной нейронной сети (ИНС), искусственного эндокринного алгоритма (ИЭА) и искусственной иммунной системы (ИИС). Задача данных агентов снизить размерность базы данных, при этом не потеряв ее информативность. Также разработаны предиктивные агенты на основе ИИС и ИЭА, которые решают задачу классификации состояния оборудования на основе информации, полученной после редукции данных и осуществляют прогноз износа оборудования. Эксперименты осуществлены на реальных промышленных данных нефтеперерабатывающего предприятия ТОО «ТенгизШевройл». Результаты моделирования показали перспективность использования данного подхода. Получены следующие значения метрики AUC (Area Under ROC Curve) от 0.86 до 0.90, пропускная способность мультиагентной системы составляет 1000 задач в секунду, время предсказания – 1 мс, отказоустойчивость – 100%.

Ключевые слова: промышленный искусственный интеллект, диагностика оборудования, мультиагентная система, нейроиммунноэндокринное взаимодействие, нефтеперерабатывающее производство.

Введение

Современные системы промышленной автоматизации реализованы с помощью программируемых логических контроллеров класса PAC (Programmable Logic Controllers) и EPAC (Ethernet Programmable Logical Controllers), которые связаны со SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) системами. Через протоколы связи Modbus, Ethernet, OPC UA можно собирать данные о состоянии технологического процесса в виде показаний с датчиков, сведений об отказах и т.д. В среднем время сканирования промышленного контроллера составляет 20 мс, таким образом, сведения о состоянии системы обновляются каждые 20 мс. Управле-

ние технологическим процессом малой автоматизации с помощью одного контроллера серии Modicon M340 (Schneider Electric) может обслуживать максимум 1024 дискретных канала, 256 аналоговых вводов/выводов, 36 пользовательских каналов, 4 сети и 4 локальные шины. Контроллеры серии Modicon M580 могут обслуживать 6144 дискретных канала ввода/вывода, 1536 аналоговых каналов, 216 пользовательских каналов, 9 сетей, 8 локальных шин и 31 шину ERIO (Ethernet Remote Input/Output). Таким образом, алгоритмы искусственного интеллекта для применения в индустрии должны быть не только достаточно точными, но и обрабатывать большой объем данных в короткие сроки.

Мультиагентные системы [1] являются удобным инструментом для разработки систем промышленной диагностики за счет децентрализованной обработки данных и устойчивости к сбоям ее отдельных компонентов. Распределенная структура позволяет выполнять задачи параллельно, например, редукции и классификации, что снижает время выполнения операций и повышает точность прогноза. Например, в работе [2] представлена нечеткая адаптивная система на основе нелинейной многоагентной системы. Разработан нечеткий адаптивный контроллер для аппроксимации неизвестной нелинейной функции. В исследовании [3] рассматривается проблема управления нелинейной мультиагентной системой с коммуникациями. Предлагается новая распределенная система отчета для каждого агента, использующая собственные дискретные выходы агента и его соседа. Для облегчения коммуникаций между взаимосвязанными агентами без постоянного мониторинга соседних состояний разработана система, при которой решается, когда передавать свой выход соседним агентам. Эффективность разработанной адаптивной схемы управления согласованием без лидера доказана результатами моделирования.

Работа [4] посвящена разработке распределенного кооперативного протокола управления многоагентной системой для решения проблем с отказами исполнительных механизмов. С помощью разработанной стратегии каждый агент может отслеживать опорную траекторию агента-лидера при наличии отказов исполнительных механизмов, помех и неопределенностей. Разработан адаптивный отказоустойчивый алгоритм управления между агентами. Исследования [5] посвящены обзору методов и методологий для решения задачи конфиденциальности в мультиагентных системах. В работе [6] рассматривается мультиагентная система мониторинга для автомобильной отрасли. Применяется интеграция голосовых помощников для улучшения оперативного управления.

Эффективность разработанных мультиагентных систем для решения инженерных задач во многом зависит от алгоритмов, на основе которых они построены. Однако не все алгоритмы искусственного интеллекта применимы для работы с индустриальными данными. Интересны биологические прототипы, позволяющие использовать механизмы живой природы для реализации в технике. Широкое распространение в настоящее время получили нейронные сети и их модификации [7] для анализа временных рядов. Однако нейронная система как биологический прототип тесно взаимодействует с эндокринной [8] и иммунной системами [9, 10]. Такое взаимодействие обеспечивает гомеостаз организма [11]. Нервная система человека регулирует работу иммунной и эндокринной систем, в свою очередь эндокринная система осуществляет регуляцию иммунной системы за счет выработки гормонов. Иммунная система реагирует на сигналы нервной и эндокринной систем. Подобное взаимодействие подсистем обеспечивает организм своевременными реакциями по защите от вирусов, инфекций, стрессов и т.д. На основе данного взаимодействия реализованы эффективные биоинспирированные алгоритмы искусственного интеллекта [12, 13]. Например, в работе [14] представлена интеграция искусственной иммунной системы и статистических подходов, предложенных Генити Тагучи для планирования производства в швейной промышленности. В исследовании [15] приводится литературный обзор применения искусственных иммунных систем для решения актуальных задач передового промышленного производства (Advanced Manufacturing Systems, AMS) на основе новейших технологий в рамках концепции «Индустрия 4.0». В работе [16] рассматривается применение нейронной сети на основе таксономии (Taxonomy-Informed Neural Network, TINN) для умных производственных систем, в которых при обучении нейронной сети исполь-

зуются онтологические знания. Результаты экспериментов показывают, что предложенный подход повышает качество моделей. Исследование [17] посвящено применению нейронных сетей для автоматизированных методов конструирования признаков (feature engineering) при решении задач предиктивной аналитики для управления цепочками поставок. В статье [18] представлена искусственная гормональная система в качестве механизма, который реагирует на внешние изменения окружающей среды и корректирует поведение робота при перемещении с целью экономии энергии. Искусственная гормональная система используется, чтобы помочь роботу справляться с изменениями рельефа местности.

Таким образом, разработка мультиагентной системы для диагностики промышленного оборудования на основе биоинспирированных алгоритмов [19, 20] является актуальной задачей.

Постановка задачи исследований формулируется следующим образом: необходимо разработать мультиагентную систему для интеллектуальной диагностики промышленного оборудования и прогнозирования износа оборудования на нефтеперерабатывающих предприятиях нефтегазового сектора на основе биоинспирированных алгоритмов искусственного интеллекта, нейроиммунноэндокринного взаимодействия и принципов гомеостаза с целью предотвращения аварийных ситуаций на производстве, простоя дорогостоящего оборудования и проведения своевременных профилактических работ для обеспечения бесперебойной работы производственных линий, а также своевременной замены изношенного оборудования и экономии финансовых ресурсов.

Материалы и методы

При разработке мультиагентной системы диагностики используются следующие биоинспирированные подходы искусственного интеллекта: искусственные нейронные сети, искусственные иммунные системы и искусственные эндокринные системы. Также рассматриваются принципы гомеостаза и нейроиммунноэндокринные взаимодействия для обеспечения эффективного функционирования производства. Применение интеллектуальных алгоритмов оценивается на основе различных метрик.

Мультиагентная система представляет собой несколько независимых агентов, взаимодействующих между собой для достижения общей цели и обладающих свойствами автономности и адаптивности [21].

Разработка мультиагентной системы диагностики и прогнозирования состояния промышленного оборудования

Предлагается следующая архитектура мультиагентной системы (рисунок 1) в виде управляющего агента (агента супервайзера), агента снижения размерности (редукции) данных, агента обучения, агента прогнозирования.

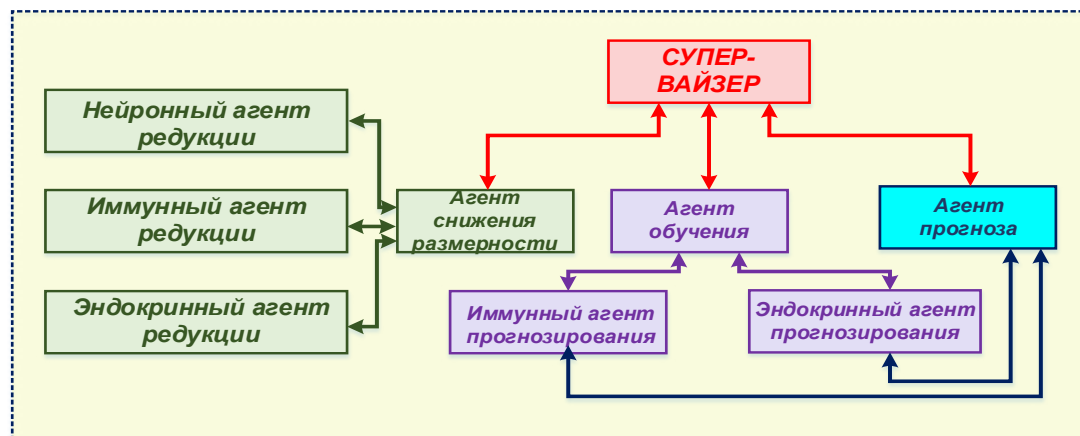


Рисунок 1 – Архитектура мультиагентной системы

В таблице 1 представлено описание агентов и их функциональное назначение.

Таблица 1 – Спецификация агентов мультиагентной системы

№	Назначение агента	Назначение
1	Супервайзер	Центральный управляющий агент верхнего уровня, координирующий взаимодействие всех компонентов системы, принимающий стратегические решения и направляющий потоки данных между агентами.
2	Агент снижения размерности	Отвечает за выбор и применение методов снижения размерности. Его задача – трансформировать исходные данные в сжатое представление, без потери полезной информации. Состоит из нейронного агента, иммунного агента и гормонального агента.
2.1	Нейронный агент редукции данных	Нейронный агент использует нейросетевые подходы для оценки значимости признаков. Реализован алгоритм на основе многослойного персептрона.
2.2	Эндокринный агент редукции данных	Эндокринный агент реализует алгоритм искусственной гормональной системы на основе биологического прототипа взаимодействия гормонов в организме человека.
2.3	Иммунный агент редукции данных	Иммунный агент использует алгоритм искусственной иммунной системы для выделения информативных признаков.
3	Агент обучения	Передаёт данные после редукции агентам прогнозирования для дальнейшего обучения. Метрики, полученные после обучения агентов, используются для выбора наиболее эффективного агента.
4	Агент прогноза	Агент получает данные после редукции и обученные модели для выполнения задачи классификации.
4.1	Иммунный агент прогнозирования	Решается задача классификации на основе искусственной иммунной системы и прогноза.
4.2	Эндокринный агент прогнозирования	Решается задача классификации на основе искусственной эндокринной системы и прогноза.

Рассмотрим механизм работы мультиагентной системы. В предложенной системе ввод данных, а также общее управление процессом осуществляется агентом верхнего уровня – супервайзером. Этот агент обрабатывает входные данные и последовательно активирует агентов среднего уровня: агента редукции данных, обучающего агента и агента прогноза. Агент редукции данных направляет входной набор данных на обработку агентам нижнего уровня: нейронному, иммунному и эндокринному агентам редукции данных. Каждый из них предлагает собственный вариант уменьшения размерности данных. После оценки результатов наиболее эффективная стратегия редукции возвращается супервайзеру. На следующем этапе супервайзер передает уменьшенный набор данных агенту обучения, который, в свою очередь, инициирует обучение агентов прогноза нижнего уровня: иммунного агента прогнозирования и эндокринного агента прогнозирования. После завершения обучения сравниваются метрики точности моделей, и модель с наилучшими результатами передается агенту прогноза. Агент прогноза, получив от супервайзера новые данные, использует ранее обученную модель для выполнения прогноза.

Результаты и обсуждение

В качестве набора данных рассматривается база данных с предприятия ТОО «ТенгизШевройл» с установки по очистке газов от кислых компонентов на основе суточных замеров с датчиков. Набор данных представляет собой временной ряд с частотой измерений раз в минуту, содержащий 16 признаков и 400 наблюдений. Всего 6400 экземпляров данных. В таблице 2 представлен фрагмент базы данных для анализа (Р – показания с датчиков давления, Т – температуры, L – уровня и т.д.)

Таблица 2 – Фрагмент базы данных установки по очистке газов

Время	11PDT30102	11PDT3100	11TE30105	11LIC3101	...	11LIC310	Класс
26-сент-22 01:01:00	0	80	95	49,720	...	51,769	-1
26-сент-22 01:02:00	0,5	71,226	90	49,873	...	51,268	-1
26-сент-22 01:03:00	0,2	82	100,116	50,130	...	48,909	-1
26-сент-22 01:04:00	0,4	84	92	50,123	...	49,571	-1
26-сент-22 01:05:00	1,099	92	70	49,953	...	50,917	-1
...	...	...	...	...	...	...	...
26-сент-22 04:19:00	1,109	71,018	100,052	50,000	...	50,530	1

В качестве целевой переменной использовался признак «Class», отражающий нормальное функционирование (1) или наличие отказа (-1). На рисунке 2 представлена матрица взаимной информации (Mutual Information, MI) [22]. Данный анализ позволил выявить наиболее значимые, в том числе нелинейные, зависимости между признаками и целевой переменной. Наибольшие значения MI наблюдаются у 11TE31004.PV, 11TE301046.PV, 11PDT31008.PV, 11PDT31007.PV, 11TE301020.PV. Эти результаты демонстрируют, что некоторые признаки, несмотря на слабую линейную связь, обладают значительным вкладом в предсказательную способность модели. Матрица показывает, сколько информации об одной переменной содержится в другой, и чем выше ее значение, тем больше информации одна переменная дает о другой.

Рассчитанные значения коэффициента инфляции дисперсии (Variance Inflation Factor, VIF) [23] в таблице 3 выявили наличие критической мультиколлинеарности между признаками: 11TE301046.PV, 11FIC31011.PV, 11LIC31014.PV, 11TE301020.PV, 11FFIC31051.PV.

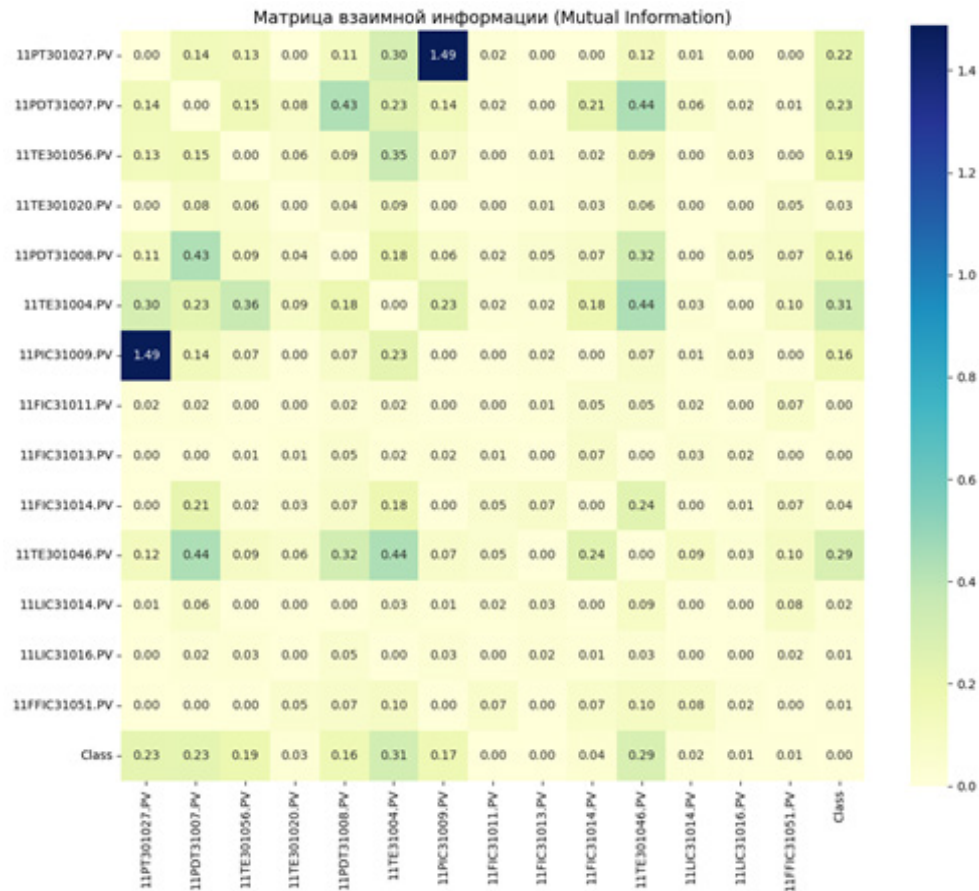


Рисунок 2 – Матрица взаимной информации

Таблица 3 – Таблица значения коэффициента инфляции дисперсии VIF

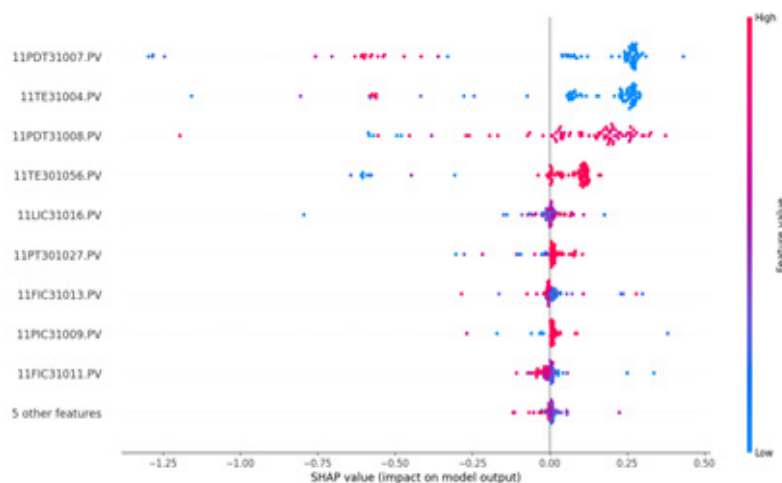
№	Признак	Значение VIF
1	2	3
1	11PT301027.PV	1.101134e+00
2	11PDT31007.PV	2.149743e+01
3	11TE301056.PV	4.495404e+00
4	11TE301020.PV	1.356624e+05
5	11PDT31008.PV	5.674767e+00
6	11TE31004.PV	1.282992e+01
7	11PIC31009.PV	1.122293e+00
8	11FIC31011.PV	6.633705e+05
9	11FIC31013.PV	4.108856e+03
10	11FIC31014.PV	1.028444e+05
11	11TE301046.PV	1.052425e+06
12	11LIC31014.PV	2.014021e+05
13	11LIC31016.PV	2.315087e+03
14	11FFIC31051.PV	1.360952e+05
15	Class	1.220337e+00

Высокие значения VIF указывают на почти полную линейную зависимость между отдельными признаками. Представленный набор данных был проанализирован с помощью разработанной мультиагентной системы. На первом этапе была выполнена редукция данных, которая заняла 2 минуты 36 секунд 30 миллисекунд. В процессе участвовали три агента редукции: нейронный, иммунный и эндокринный. Результаты редукции представлены в таблице 4.

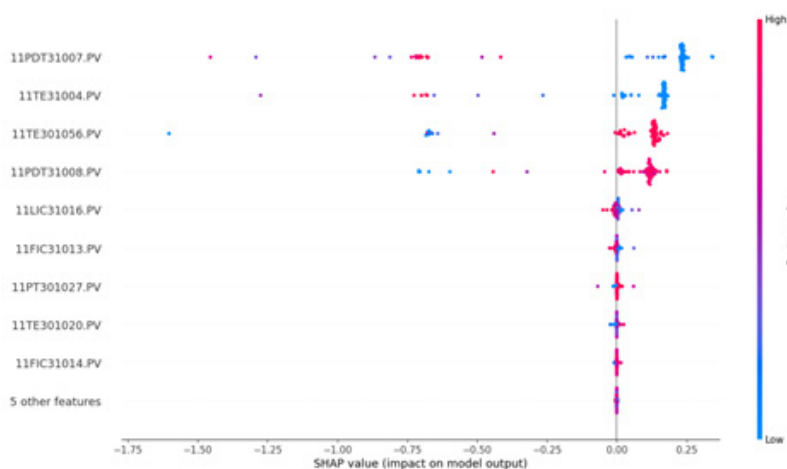
Таблица 4 – Выбор информативных признаков на основе агентов редукции

№	Иммунный агент редукции данных (точность: 88%)	Нейронный агент редукции данных (точность: 80%)	Эндокринный агент редукции данных (точность: 72%)
1	11PDT31007.PV	11PDT31007.PV	11PDT31007.PV
2	11TE31004.PV	11TE31004.PV	11TE301056.PV
3	11PDT31008.PV	11TE301056.PV	11PDT31008.PV
4	11TE301056.PV	11PDT31008.PV	11TE31004.PV

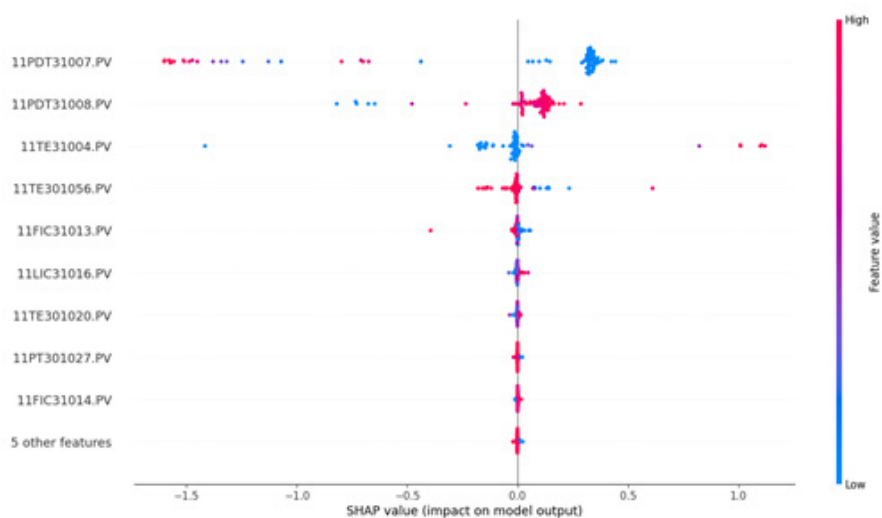
Агент-супервайзер по результатам моделирования и работы агентов редукции данных выбрал результат после иммунного агента редукции данных с точностью 88% (рисунок 3).



(а) Выделение информативных признаков на основе редукции данных иммунным агентом



(б) Выделение информативных признаков на основе редукции данных эндокринным агентом



(в) Выделение информативных признаков на основе редукции данных нейронным агентом

Рисунок 3 – Визуализация результата работы агентов редукции данных:
(а) иммунный агент редукции данных, (б) эндокринный агент редукции данных,
(в) нейронный агент редукции данных

На втором этапе было выполнено обучение с использованием набора данных после редукции. Обучение заняло 1 минуту 14 секунд 14 миллисекунд. Участвовали два предсказывающих агента: иммунный и эндокринный. Оба достигли одинакового уровня точности – 77,5%. Агент обучения выбрал эндокринный классификатор для дальнейшей передачи предсказывающему агенту. Результаты классификации всех агентов представлены на рисунке 4.

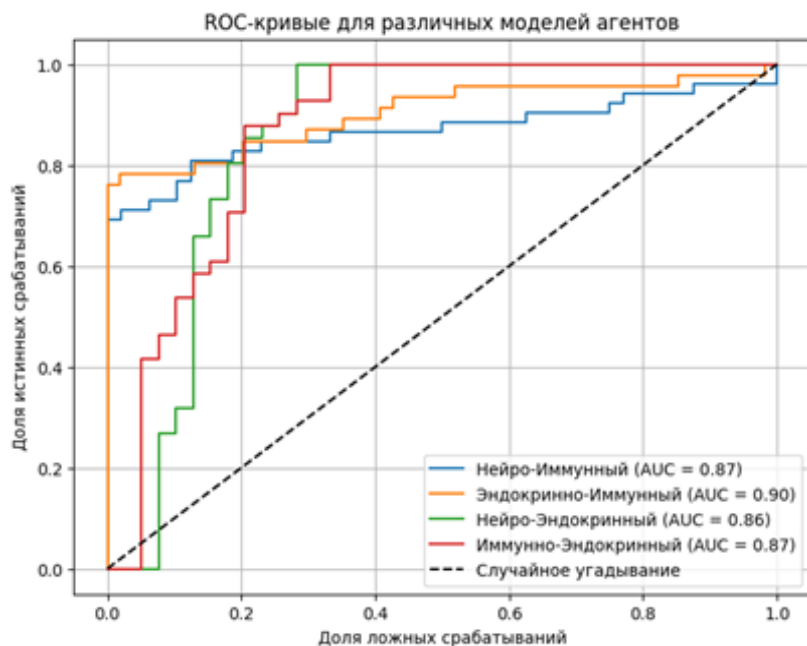


Рисунок 4 – Результаты классификации агента прогноза на ROC-кривой

Графики на рисунке 5 демонстрируют высокую площадь под ROC-кривой для всех агентов, что указывает на хорошие классификационные свойства агентов. Комбинация, выбранная агентом редукции данных и агентом обучения, является иммунно-эндокринной с точностью метрики AUC в 0.87. Сравнительный анализ с классическими моделями классификации, такими как линейная регрессия, деревья решений и метод опорных векторов, показал, что разработанная мультиагентная система показывает лучшие результаты на инженерных данных.

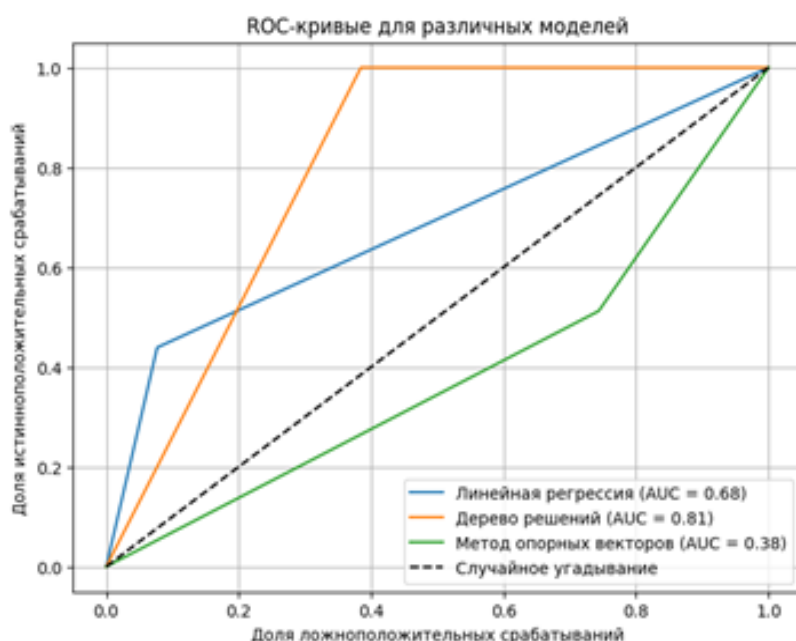


Рисунок 5 – Результаты классификации базы данных «ТенгизШевройл»

По результатам моделирования и экспериментов иммунно-эндокринная модель превосходит остальные алгоритмы по совокупности ключевых показателей качества, как показано в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнительный анализ метрик результатов классификации

Метрика	Линейная регрессия	Деревья решений	Метод опорных векторов	Иммунно-эндокринная модель
Precision для класса -1 (отказ)	0.61	1	0.33	0.71
Recall для класса -1 (отказ)	0.92	0.62	0.26	0.79
f1-score для класса -1 (отказ)	0.73	0.76	0.29	0.76
precision для класса 1 (нормальный режим)	0.86	0.73	0.42	0.78
recall для класса 1 (нормальный режим)	0.44	1	0.51	0.79
f1-score для класса 1 (нормальный режим)	0.57	0.85	0.46	0.76
Accuracy	0.68	0.81	0.39	0.75
ROC-AUC	0.68	0.81	0.38	0.87

В частности, она демонстрирует сбалансированную точность и полноту как для класса отказов, так и для нормального режима работы, в отличие от других моделей, склонных к переобучению или смещению в сторону одного из классов. F1-мера для обоих классов составляет 0.76, что свидетельствует о стабильной способности модели эффективно выявлять как аномальные, так и штатные состояния. Значение ROC-AUC достигает 0.87, что существенно выше по сравнению с другими методами.

Заключение

В данной работе предложена и реализована иерархическая мультиагентная система для диагностики состояния промышленного оборудования, основанная на взаимодействии специализированных агентов редукции и прогноза. Архитектура системы обеспечивает логическую декомпозицию задач, что позволяет эффективно управлять потоком данных, снижать размерность признаков без потери информативности и повышать точность классификации технического состояния. Проведенные эксперименты на реальных промышленных данных предприятия ТОО «ТенгизШевройл» подтвердили высокую эффективность предложенного мультиагентного подхода. Иммуно-эндокринная модель, выбранная мультиагентной системой, показала наивысшее значение метрики AUC=0.87 по сравнению с традиционными методами классификации: линейной регрессией AUC=0.68, деревом решений AUC=0.81 и методом опорных векторов AUC=0.38. Полученные результаты подчеркивают эффективность внедрения мультиагентных систем на основе биоинспирированных алгоритмов искусственного интеллекта в задачах промышленной диагностики в рамках концепции Industry 4.0.

На разработанное программное обеспечение получено свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом [24].

Информация о финансировании

Исследования проводятся по гранту ГФ КН МНВО РК, ИРН №AP23486386 на тему «Разработка интеллектуальной технологии самосборки унифицированной искусственной иммунной системы для управления сложными объектами промышленной автоматизации с использованием нейроэндокринной системы» (2024–2026 гг.).

REFERENCES

- 1 Cheng, C., Yang, B., Xiao, Q. Hierarchical Coordinated Predictive Control of Multiagent Systems for Process Industries. *Applied Sciences*, 14 (14), 6025 (2024). <https://doi.org/10.3390/app14146025>.
- 2 Wang, Y., Yang, Y.H., Wu, L.B. Fuzzy Adaptive Event-triggered Control of Multi-agent Systems With Command Filter. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 23 (1), 175–186 (2025). <https://doi.org/10.1007/S12555-024-0634-5>.
- 3 Liu, Y., Wu, X., Long, J., Wang, W. Event-Triggered Distributed Adaptive Leaderless Consensus of Uncertain Heterogenous Nonlinear Multi-Agent Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 71 (5), 2694–2698 (2024). <https://doi.org/10.1109/TCSII.2023.3348763>.
- 4 Xing, X., Hu, G. Distributed Fault-Tolerant Control of Uncertain Multi-Agent Systems with Connectivity Maintenance. *Journal of Systems Science and Complexity*, 37 (1), 40–62 (2024). <https://doi.org/10.1007/S11424-024-3436-1>.
- 5 Kossek, M., Stefanovic, M. Survey of Recent Results in Privacy-Preserving Mechanisms for Multi-Agent Systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 110 (3), 1–27 (2024). <https://doi.org/10.1007/S10846-024-02161-9>.

- 6 Vinogradova, E. Software of the “Alice” Type for the Multi-Agent System of Monitoring the Problems of the Development of the Car Service Industry. *Proceedings of MLSD 2023*. <https://doi.org/10.1109/MLSD58227.2023.10303859>.
- 7 Wang, J., Su, X., Huang, Y., Lai, H., Qian, W., Zhang, S. CLinear: An Interpretable Deep Time-Series Forecasting Model for Periodic Time Series. *IEEE Internet of Things Journal*, 12 (11), 17364–17376 (2025). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3536460>.
- 8 Hinson, J.P., Raven, P., Chew, S.L., Hughes, S.H. *The Endocrine System*. 3rd ed. Oxford: Elsevier, 2022 (Systems of the Body Series).
- 9 Sompayrac, L.M. *How the Immune System Works*. 7th ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2022. 176 p. ISBN 978-1-119-89068-3.
- 10 Dettmer, P. *Immune*. New York: Penguin Random House, 2021. 341 p.
- 11 Paradise, C.J., Campbell, A.M. *Organismal Homeostasis*, 2016. 100 p.
- 12 Abdelhadi, A., Kadri, O.A New Operator that Combines Artificial Immune Systems and Multi-Agent Systems for Addressing Flow Shop Scheduling Problems. *Brazilian Journal of Technology*, 7 (4) (2024). <https://doi.org/10.38152/bjtv7n4-048>.
- 13 Pulikottil, T., Martinez-Arellano, G., Barata, J. Immune System Inspired Smart Maintenance Framework: Tool Wear Monitoring Use Case. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132 (9–10), 1–23 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13472-4>.
- 14 Wang Chia-Nan, Nguyen Tram Thi Mai. Integrated artificial immune system and Taguchi approach for production scheduling in the garment industry. *Production Planning and Control*, 31 (2), 97–107 (2024). <https://doi.org/10.23055/ijietap.2024.31.2.9747>.
- 15 Pinto Rui, Gonçalves Gil. Application of artificial immune systems in advanced manufacturing. *Array*, 16, art. 100238 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.array.2022.100238>.
- 16 Terziyan Vagan, Vitko Oleksandra. Taxonomy-informed neural networks for smart manufacturing. *Procedia Computer Science*, 232, 1388–1399 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.137>.
- 17 Sharma Priynka, Gounder Maanvik, Kumar Kaushik. Mastering feature engineering: unlocking the art of data transformation for enhanced predictive modeling with neural networks. *Data Science and Applications*, pp. 451–464 (June 2025). https://doi.org/10.1007/978-981-96-1188-1_33.
- 18 Haomachai, W., Teerakittikul, P. An Artificial Hormone System for Adaptable Locomotion in a Sea Turtle-Inspired Robot. *Proceedings of the 4th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*. IEEE, 2019, pp. 136–141. <https://doi.org/10.1109/ICCRE.2019.8724369>.
- 19 Samigulina, G.A., Samigulina, Z.I. Development of intelligent technology for complex objects control based on a unified artificial immune system and principles of immunological homeostasis for industrial automation using modern microprocessor equipment: monograph. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2023. 196 p. ISBN 978-1-62174-150-3. SAN 920-3230.
- 20 Samigulina, G., Samigulina, Z. Diagnostics of industrial equipment and faults prediction based on modified algorithms of artificial immune systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33 (1), 1–18 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01732-5>.
- 21 Liu, H., Liu, X., Huang, K., Huang, K., Guo, D. Embodied Multi-agent System. *Embodied Multi-Agent Systems* (2025). https://doi.org/10.1007/978-981-96-5871-8_2.
- 22 Qian, W., Wan, L., Shu, W. Semisupervised feature selection based on discernibility matrix and mutual information. *Applied Intelligence*, 54 (13–14), 7278–7295 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10489-024-05481-3>. sciencedirect.com+8.
- 23 SalmerónGómez, R., GarcíaGarcía, C. B., GarcíaPérez, J. A Redefined Variance Inflation Factor: Overcoming the Limitations of the Variance Inflation Factor. *Computational Economics*, 65 (1), 337–363 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10614-024-10575-8>. arxiv.org+9
- 24 A.S. №56573. INTELLECTUAL MULTI-AGENT SYSTEM FOR SMART MANUFACTURING – MASBio. G.A. Samigulina, Z.I. Samigulina, D.D. Bekeshev; opubl.05.04.2025. <https://qazpatent.kz/ru>.

^{1,2}**Самигулина Г.А.,**

т.ф.д., профессор, ORCID ID: 0000-0003-1798-9161,

e-mail: kz.galinasamigulina@gmail.com

^{1,2}***Самигулина З.И.,**

PhD, доцент, ORCID ID: 0000-0002-5862-6415,

*e-mail: z.samigulina@kbtu.kz

^{1,2}**Бекешев Д.Д.,**

магистр, ORCID ID: 0009-0002-8168-6368,

e-mail: dauletb01@gmail.com

¹Ақпараттық және есептеу технологиялары институты,
«Зияткерлік басқару және болжау жүйелері» зертханасы, Алматы қ., Қазақстан
²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ӨНЕРКӘСІПТІК ЖАБДЫҚТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУҒА АРНАЛҒАН МУЛЬТИАГЕНТТІК ЖҮЙЕНІ ӘЗІРЛЕУ

Андатпа

Қазіргі заманғы өнеркәсіптік автоматтандыру жүйелері пайдалану үдерісінде өндірістік деректердің үлкен көлемін қалыптастырады. Бұл деректерді заманауи жасанды интеллект әдістері арқылы өңдеу – қымбат жабдықтардың жағдайын уақытылы диагностикалауға және тозуын болжауға мүмкіндік береді. Мақалада өнеркәсіптік жабдықтарды диагностикалауға арналған нейро-иммунды-эндокриндік өзара әрекеттестік негізіндегі инновациялық мультиагенттік жүйе ұсынылады. Жүйе деректерді редукциялауға мамандандырылған агенттерден тұрады. Олар жасанды нейрондық желі (ЖНЖ), жасанды эндокриндік алгоритм (ЖЭА) және жасанды иммундық жүйе (ЖИЖ) негізінде құрылған. Бұл агенттердің мақсаты – деректер базасының өлшемін азайту, бірақ оның ақпараттылығын жоғалтпай сақтау. Сонымен қатар, ЖИЖ және ЖЭА негізінде жабдықтың күйін деректер редукциясынан кейінгі ақпарат бойынша жіктеу мен тозуын болжау мәселесін шешетін предиктивті агенттер жасалды. Эксперименттер «ТеңізШевройл» ЖШС мұнай өңдеу кәсіпорнының нақты өндірістік деректерінде жүргізілді. Модельдеу нәтижелері бұл тәсілдің болашағы зор екенін көрсетті. AUC (ROC қисығы астындағы аудан) метрикасының мәні 0.86–0.90 аралығында, мультиагенттік жүйенің өткізу қабілеті – секундына 1000 тапсырма, болжау уақыты – 1 мс, ал жүйенің сенімділігі – 100%.

Тірек сөздер: өнеркәсіптік жасанды интеллект, жабдықты диагностикалау, мультиагенттік жүйе, нейро-иммунды-эндокриндік өзара әрекеттестік, мұнай өңдеу өндірісі.

^{1,2}**Samigulina G.A.,**

Dr.Tech.Sc., Professor, ORCID ID: 0000-0003-1798-9161,

e-mail: kz.galinasamigulina@gmail.com,

^{1,2}***Samigulina Z.I.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-5862-6415,

*e-mail: z.samigulina@kbtu.kz,

^{1,2}**Bekeshev D.D.,**

Master's degree, ORCID ID: 0009-0002-8168-6368, e-mail: dauletb01@gmail.com

¹Institute of Information and Computing Technologies,

Lab. «Intellectual Control system and forecasting», Almaty, Kazakhstan

²Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A MULTI-AGENT SYSTEM FOR INTELLIGENT DIAGNOSTICS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

Abstract

Modern industrial automation systems generate a large volume of production data during operation, the processing of which by modern artificial intelligence methods allows for timely diagnostics of the condition

and prediction of wear of expensive equipment. The article develops an innovative multi-agent system based on neuroimmune-endocrine interaction for diagnostics of industrial equipment. The system consists of agents specializing in data reduction, based on an artificial neural network (ANN), an artificial endocrine algorithm (AEA) and an artificial immune system (AIS). The task of these agents is to reduce the size of the database without losing its information content. Also, predictive agents based on AIS and AEA have been developed, which solve the problem of classifying the condition of equipment based on information obtained after data reduction and predict equipment wear. Experiments were carried out on real industrial data of the oil refinery TengizChevroil LLC. The modeling results showed the prospects of using this approach. The following values of the AUC (Area Under ROC Curve) metric were obtained from 0.86 to 0.90, the throughput of the multi-agent system is 1,000 tasks per second, the prediction time is 1 ms, and the fault tolerance is 100%.

Keywords: industrial artificial intelligence, equipment diagnostics, multi-agent system, neuroimmune-endocrine interaction, oil refining.

Дата поступления статьи в редакцию: 28.02.2025

UDC 004
IRSTI 28.23.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-98-109>

¹***Ordabaeva Zh.**,

PhD student, ORCID ID: 009-0009-8273-3147,

*e-mail: zhannaordabayeva@gmail.com

¹**Ibrahim Rıza Hallaç,**

Associate Professor, ORCID ID: 0000-0003-0568-3114,

e-mail: ibrahim.hallac@alanya.edu.tr

¹**Moldagulova A.N.**,

Cand.Phys-Math.Sc., Associate Professor,

ORCID ID: 0000-0002-1596-561X, e-mail: aiman.moldagulova@gmail.com

¹Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev,
Almaty, Kazakhstan

SCORING CARDS FOR DIFFERENT TYPES OF CREDIT PRODUCTS

Abstract

The development of credit scoring is one of the key topics of attention in credit risk management in financial companies. However, a single approach to produce rating cards is frequently worthless since loan products differ in risk and financing time and often there is insufficient information on borrowers. The paper addresses the features of creating score cards for consumer credit, refinancing, small and medium businesses, auto loans, mortgage loans, fintech and P2P lending. Thus, the present work can be considered as the above comparative analysis of the most important elements influencing the probability of default of the borrower in the settlement by segments, together with the consideration of machine learning techniques and the use of alternative data sources that can improve the accuracy of the forecast. Depending on the usual credit product, the analysis lets one create recommendations for choosing the optimal approach of creating scoring cards, so enhancing the accuracy of the borrower's creditworthiness projection and reducing the degree of default risk.

Keywords: credit scoring, scoring cards, credit products, refinancing, machine learning, risk management, creditworthiness, alternative data.

Introduction

There are several kinds of scoring cards utilized in financial companies nowadays, with various methods of development. Still relevant, nonetheless, are conventional approaches of building the credit scoring issue using statistical analysis and classical scoring models. Their qualitative traits as the loan product and degree of efficiency vary. Sometimes the effectiveness is absolutely less than in others. Every kind of borrower, loan terms, and time horizon need their own scoring chart; however, the amount of total services makes them challenging to adjust in like circumstances. [1].

Focused on their own scoring algorithms, several credit products – consumer loans, mortgages, refinancing, auto loans, small and medium-sized business (SME) lending, and fintech products (including P2P lending) are For refinancing, for instance, it is advisable to consider the borrower's credit record with another bank. Scoring cards for SMEs depends on non-traditional data since entrepreneurs' financial records are sometimes lacking. Long-term products should be considered in light of macroeconomic data projections influencing borrower solvency going forward.

Table 1 – The main factors influencing credit scoring for different types of loans

Credit product	Key scoring factors	Data availability	The optimal scoring method	Using alternative data
Consumer loans	Income, age, credit history, debt burden	High	Logistic regression, random forest	Moderate (telecom, transactions)
Refinancing	Credit history, refinancing bank, previous loan amount	High	Gradient boosting	Limited
SME lending	Financial reports, account turnover, industry risks	Low	Ensembles of models, XGBoost	High (tax, transaction data)
Car loans	Income stability, car age, credit history	Average	Logistic regression	Low
Mortgage	Income, work experience, collateral value, marital status Income, work experience, collateral value, marital status	High	Gradient boosting	Low
P2P lending	Online behavior, transactional activity	Low	Deep neural networks, Random Forest	High quality (social media, digital footprint)

Apart from employing several data sets, the selection of a scoring model is also rather crucial. Machine learning is gradually replacing conventional statistical techniques so that nonlinear dependencies may be considered and forecast accuracy may be raised [2].

Recently, hybrid solutions combining a great degree of knowledge about the model and its predictive ability have gained popularity. The review's ultimate objective is to evaluate the characteristics of generating scoring maps for different kinds of products, compute the important variables that define the borrower's default risk, and provide best ways to the construction of scoring models for every one of the segments. The old and modern scoring systems will be discussed in this paper together, together with their respective benefits and drawbacks. We will also discuss alternate data possibilities.

Materials and methods

A dataset comprising information on borrowers of several credit product types was gathered for this research. Data collecting and preparation comprised several crucial phases.

Gathering records of loan applications from several sources – including credit bureaus, fintech platforms, and commercial banks – was the initial phase. We selected data considering the representativeness of the sample, so covering a broad spectrum of credit products. These comprise consumer loans, refinancing, lending to small and medium-sized firms (SMEs), auto loans, mortgages, and personal-to-personal loans. To increase the relevance of the research, the study used conventional and alternative credit scoring elements [3].

Further data processing was done following the first data collecting to raise the completeness and quality of the information. We obtained creditworthiness indicators of borrowers, demographic information, and financial traits. Especially for P2P lending models, the study also included digital behavioral measures and transaction data among other data sources [4].

Data transformation and cleaning techniques including gap handling, normalizing of financial variables, and categorical feature encoding marked the last stage. This guaranteed appropriate application of the data in next modeling and analysis.

Table 2 – Description of the data selection

Type of loan	Number of borrowers	Average age	Average income (KZT)	Percentage of defaults (%)
Consumer loans	10,000	35.2	450,000	5.8
Refinancing	7,500	39.8	520,000	4.5
SME lending	5,000	42.1	1,200,000	12.3
Car loans	3,500	37.5	600,000	3.7
Mortgage	4,200	40.2	750,000	2.1
P2P lending	6,000	29.8	300,000	15.4

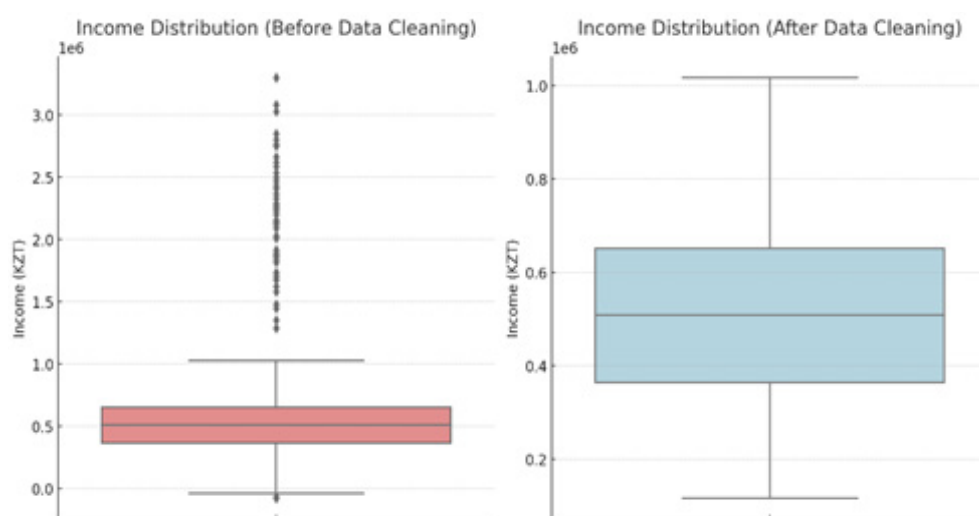


Figure 1 – The impact of data cleaning on the income distribution of borrowers

Before data cleaning, the first data shows emissions with very high and low incomes that could compromise the quality model.

Following data cleansing: the income range is balanced, the data gets clean and fit for modelling.
Data preprocessing

Different approaches of data preparation have been used to raise the prediction quality of the model:

1. Data cleansing: deleting erroneous values and duplicates.

- ♦ Handling missing data by use of median values (for quantitative variables) or by stressing a different category (for categorical ones).

- ♦ Eliminating or correcting outliers investigated with the Z-estimation technique and the interquartile range (IQR).

2. Feature engineering:

- ♦ Development of other variables, such the debt burden ratio (DTI – Debt-to-- Income Ratio), the ratio of the payments to the borrower's income (PTI–Payment-to--Income Ratio).

- ♦ Determining the credit limit using average income and present debt liabilities.
- ♦ Generation of behavioral indicators depending on the borrower's transactional activity: microloan availability, average transaction size, and frequency of payments.

3. Variable conversions:

- ♦ Continuous variable logarithmic transformation—that is, income, loan amount—to remove distribution asymmetry.

- ♦ Sort borrowers into low, medium, high income groups to help the model to be interpretable.

4. Categorization and encoding of data:
 - ♦ One-Hot Encoding (OHE) for nominal variables allows one to translate category features into numerical form.
 - ♦ Using Weight of Evidence (WoE) Encoding for categorical variables with monotonic influence on default likelihood.
5. Standardization and normalization of data:
 - ♦ Depending on the properties of the distribution, minimum and maximum scaling (bringing values to the range $[0,1]$) or Z-estimates (standardization with zero mean and unit variance) can help normalize variables.
 - ♦ Given their distribution, scale quantitative factors, including income, loan amount, and age of the borrower.
6. Creation of training and test samples based on the data obtained:
 - ♦ The data was split in an 80:20 ratio: 80% for model training and 20% for testing.
 - ♦ The ratio of borrowers who did not default to borrowers who defaulted remained unchanged when using a stratified sample.
7. Identification and management of class imbalance:
 - ♦ Over-sampling (SMote is a method of synthetic sampling of a minority) and under-sampling were used in cases where the data showed a noticeable class imbalance, say less than 10% of the default values.
 - ♦ On the other hand, machine learning models use a weighted loss function to properly handle infrequent events [5].

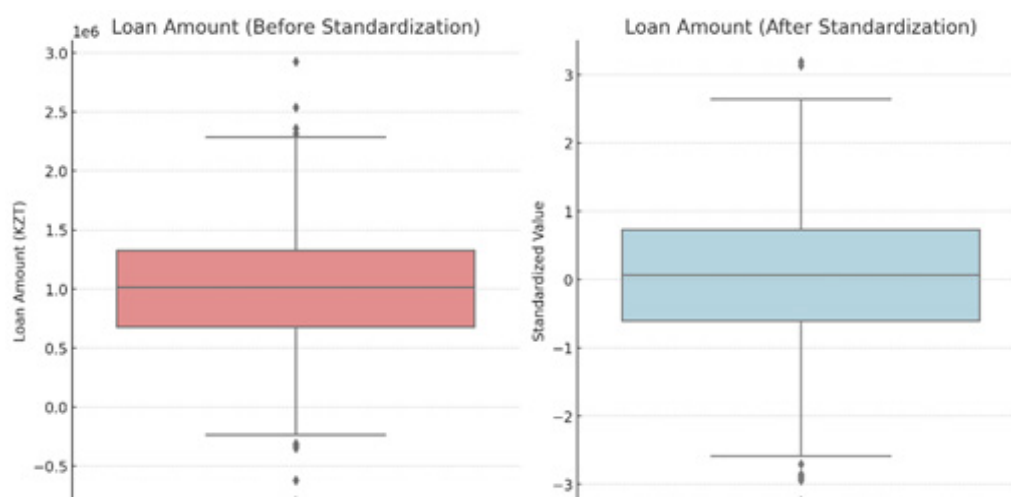


Figure 2 – The impact of data standardization on the loan amount

Loan Amount: Before standardization, the figures have a wide spectrum and maybe anomalies. Loan Amount (After Standardization) – Following standardizing (Z-score), the values are lowered to a normal distribution with zero mean and unit variance.

Development of scoring models

Many scoring systems have been established, modified for different kinds of credit instruments, to evaluate credit risk. The selection of models was determined by the features of the data and the need of interpretability of the results.

- ♦ Logistic regression is highly interpretable and resistant to tiny amounts of data – it was the basic model for consumer and mortgage loans.

- ♦ Using Random Forest and gradient boosting (XGBoost, LightGBM), refinancing programs and loans to small and medium-sized firms (SMEs) let non-linear relationships and interactions between characteristics be enabled.

♦ P2P lending made use of neural network models (deep neural networks, LSTM), whereby alternate and unstructured data – including transactional and behavioral aspects – played a crucial part [6].

Hyperparametric optimization and cross-validation

A hyperparametric optimization procedure containing the following helped to choose the best parameters of the models:

♦ Automatic selection of parameters for Random Forest and XGBoost using grid search and random random search

♦ Gradient boosting and neural networks used Bayesian optimization to reduce computing time.

♦ To reduce the risk of overfitting and evaluate the model more accurately, a cross-evaluation (K-fold, stratified K-fold) was applied.

Methods of interpreting the model

Explicable machine learning methodologies (Explicable AI, artificial intelligence) were used, since credit risk assessment depends on interpretability of decisions.:

♦ For the nonlinear model (Boost, Light BM), the importance of features was analyzed using additional explanations by SHAP or Shapley.

♦ The importance of the function (in terms of Gin and Gain) for boosting and random forests.

♦ Partial Dependency Graphs (PHP) allow you to see how specific variables affect the probability of default [7].

Analyzing model performance

The efficiency of the models was evaluated using conventional measures:

♦ ROC-AUC measures ability for discriminating.

♦ Variations in default probability are approximated using a Gini coefficient.

♦ Predicting for unequal classes is evaluated using a precision-recall curve.

♦ Calibration Curve: Verification of probabilistic prediction correctness

♦ Selecting the ultimate model

The model's last decision rested on the details of the loan product:

1. Given its great interpretability and stability, logistic regression turned out to be better for mortgages and consumer loans.

2. Gradient boosting (XGBoost, Light G BM) has the strongest predicting ability for SMEs and refinancing.

3. Deep neural networks produced the greatest outcomes in P2P lending since these models effectively handle alternate data.

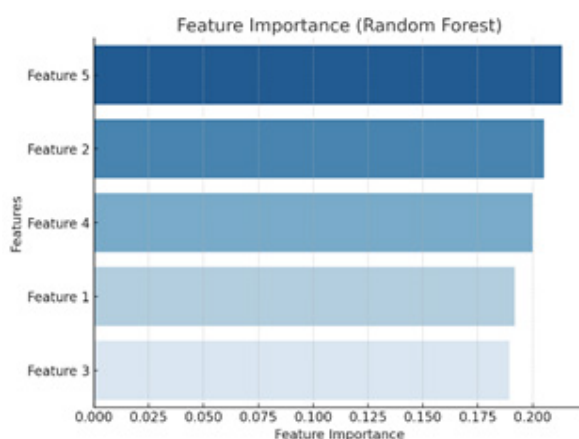


Figure 3 – The importance of features in a random forest model

The graph illustrates the relevance of features in the Random Forest model applied to estimate default likelihood of a borrower. The factors incorporated in the model are shown on the Y-axis;

their contribution to risk prediction is shown on the X-axis (the higher the value, the more effect this characteristic has). The graph indicates which factors most affect the choice of the model. Developing a scoring card should consider the most important elements since they greatly help to evaluate the creditworthiness of borrowers. Less significant elements can be eliminated or also investigated for their value [8].

This study clarifies the work of the model and generates hypotheses regarding the most crucial traits of borrowers for solvency prediction.

Methods for evaluating the quality of models

Standard credit scoring criteria allow you to evaluate the effectiveness of the created scoring models:

- ♦ The operational characteristic of the receptor, the area under the curve, or ROC-AUC, is an indicator that measures the model's ability to distinguish between borrowers with high and low credit risk.

- ♦ The Gini coefficient, which is particularly well known in credit scoring, is an indicator of a model's recognition ability.

- ♦ Kolmogorov-Smirnov statistics (KS statistics) assesses the differences in the distribution of borrowers between overdue and non-overdue loans.

- ♦ Analyzing the stability of the model over time, the Population Stability Index (PSI), helps us determine the need for its retraining.

The indicators were evaluated among other credit product sectors to confirm the validity of the estimates and the reliability of the model.

Table 3 – Model Evaluation Methods

Model	ROC-AUC	Gini Coefficient	K5 Statistic	PSI
Logistic Regression	0.76	0.52	0.32	0.08
Random Forest	0.82	0.64	0.41	0.12
XGBoost	0.88	0.76	0.52	0.15

This table presents the results of the evaluation of several valuation systems used to predict borrowers' default. The indicators allow you to evaluate the effectiveness of the models and choose the optimal algorithm for assessing creditworthiness.

Organization of the table:

Model: The model name is shown here.

The ability of the model to distinguish between debtors who have defaulted and insolvent borrowers is known as ROC-AUC, or the recipient's Operating Characteristic – the area under the curve. The higher the value, the better.

A distinctive feature of the model is its Gini coefficient. $Gini = 2 \times (ROC-AUC - 0.5)$ calculated this way.

Kolmogorov-Smirnov statistics, or KS Statistical, represent a variation in the distribution of borrowers with and without default. Higher values indicate a higher ability of the model to separate these groups.

The model's stability Index, PSI (Population Stability Index), shows the extent to which the distribution of borrowers has changed over time. The model must be changed if the PSI value exceeds 0.2.

Conclusion of the table:

1. Among the above algorithms, XGBoost is the most powerful with ROC-AUC = 0.88, Gini = 0.76, KS = 0.52.

2. The random forest is at an average level with ROC-AUC = 0.82, which is higher than with logistic regression, but less than with XGBoost.

3. Although logistic regression gives the worst results (ROC-AUC = 0.76, Gini coefficient = 0.52), its interpretability nevertheless makes it popular.

4. Although XGBoost (PSI = 0.15) shows a fairly high sensitivity to data changes, the PSI value in all models remains below 0.2, which indicates the stability of the models.

Software development tools and programs

Below are the tools for data processing, modeling, and analysis.:

- ◆ The most commonly used programming language is Python; packages for it include pandas, scikit-learn, XGBoost, LightGBM, SHAPE.

- ◆ SQL for managing the borrower's access to relational databases.

- ◆ Jupiter notebooks for interactive data analysis and model building.

- ◆ SHAPE, or Shapley's additive explanations, help to understand machine learning models.

Thanks to the use of these tools and approaches, it has become possible to thoroughly study the effectiveness of several scoring models adapted to specific characteristics of credit products [9].

Results and discussion

1. Comparative Performance of Scoring Models

To evaluate the effectiveness of various credit scoring models, we assessed their predictive quality using a range of performance metrics: ROC-AUC, Gini coefficient, F1-score, Precision, Recall, Logarithmic Loss (Log-Loss), and Population Stability Index (PSI). The following table summarizes the results across the three models under consideration.

Table 4 – Summary of Evaluation Metrics for Credit Scoring Models

Model	AUC	Gini	F1-score	Precision	Recall	Log-Loss	PSI
Logistic Regression	0.76	0.52	0.61	0.58	0.64	0.46	0.08
Random Forest	0.82	0.64	0.68	0.70	0.66	0.39	0.12
XGBoost	0.88	0.76	0.74	0.72	0.76	0.33	0.15

XGBoost demonstrated the highest predictive power across all key metrics, with an AUC of 0.88 and F1-score of 0.74. Despite a higher sensitivity to input shifts (PSI = 0.15), its low Log-Loss (0.33) indicates confident classification performance.

Random Forest achieved a strong balance between predictive performance and model robustness, with F1-score of 0.68 and moderate sensitivity to distributional shifts (PSI = 0.12).

Logistic Regression, although exhibiting the lowest F1-score (0.61), remains competitive due to its high interpretability, transparency, and stability (PSI = 0.08), making it suitable for regulated credit environments.

2. Loss Functions Used in Model Training

Different loss functions were applied based on model type:

Logistic Regression: Binary Cross-Entropy Loss was used to penalize incorrect classifications of defaulters and non-defaulters [10].

Random Forest: While non-parametric and not optimized by a specific loss function, classification was based on Gini impurity minimization at node splits.

XGBoost: Employed regularized logistic loss (binary:logistic), with an L1/L2 penalty for complexity control, minimizing overfitting and improving generalization.

Log-loss results further validate the relative confidence of predictions: the lower the log-loss, the more calibrated the model's predicted probabilities [11].

3. Importance of Predictors and Feature Interpretation

Using SHAP (Shapley Additive Explanations) and model-based feature importance, the following predictors emerged as the most influential across models:

Loan Amount: Larger values were consistently linked to higher default probability.

Income: Higher income generally reduced default risk, though marginal returns diminished in high-income tiers.

Debt Obligations: Strongly associated with financial stress and likelihood of non-repayment [12].

Credit Bureau Inquiries: Frequent inquiries indicated potential credit distress or over-leveraging.

Alternative Data: In P2P models, behavioral and transactional patterns (e.g., mobile activity, payment regularity) significantly improved performance.

4. ROC Curve Analysis

Figure 5 displays the ROC curves for all models:

XGBoost had the steepest curve, reflecting superior classification power (AUC = 0.88).

Random Forest achieved a balanced ROC profile (AUC = 0.82).

Logistic Regression showed more moderate separation (AUC = 0.76), consistent with its linear structure.

The curves confirm the consistent ability of all models to differentiate high- and low-risk borrowers, with gradient boosting offering the highest discriminatory power.

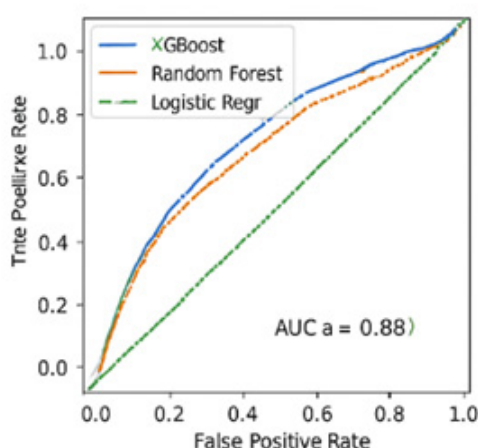


Figure 4 – ROC curves for three models: logistic regression, Random Forest, and XGBoost. XGBoost demonstrates the highest discriminative ability with an AUC of 0.88

The graph shows ROC curves for the three tested models: logistic regression, random forest, and XGBoost. The ROC (Receiver Operating Characteristic) curve shows the ratio of true positives to false positives at different thresholds. The closer the model curve is to the upper left corner, the higher the model's ability to distinguish between defaulting and reliable borrowers [13].

The XGBoost model shows the best results, as evidenced by the AUC value of 0.88. This means that in 88% of cases, the model is able to correctly distinguish between a borrower who will default and one who will not.

The Random Forest model demonstrated moderately high accuracy (AUC = 0.82), providing good separation of classes with acceptable interpretability.

Logistic regression showed the smallest area under the curve (AUC = 0.76), which is explained by the limited ability of the linear model to capture complex nonlinear dependencies between features[14].

However, despite its more modest predictive power, logistic regression can be used in settings where interpretability and regulatory compliance are critical.

5. Temporal Stability of Models

Population Stability Index (PSI) values indicated:

Logistic Regression: most stable (PSI = 0.08), suitable for long-term application.

Random Forest: moderately stable (PSI = 0.12), tolerating minor input shifts.

XGBoost: required closer monitoring (PSI = 0.15) due to its adaptive, data-specific nature.

Although all PSI values remained below the 0.2 threshold, suggesting acceptable stability, XGBoost may require periodic recalibration to maintain performance in dynamic borrower populations [15].

6. Practical Recommendations

Model selection should align with loan product complexity:

Use logistic regression for regulated, low-risk products (e.g., mortgages, standard consumer loans) [16].

Apply random forest or XGBoost for heterogeneous segments (e.g., SMEs, refinancing).

Adopt deep learning models with alternative data in P2P and fintech settings.

Monitoring and retraining:

Reassess PSI quarterly; retrain if $PSI > 0.2$.

Combine AUC and F1-score for comprehensive model diagnostics.

Conclusion

This article offers a thorough study of several methods for assessing creditworthiness using machine learning methods and traditional statistical models. Given their predictive ability, interpretability, and resilience to change over time, efforts have been focused primarily on determining the most effective model for assessing a borrower's probability of default.

XGBoost showed the best forecasting accuracy (AUC = 0.88), therefore, it is a potential method for assessing credit risk. This model is very sensitive to changes in the borrower's characteristics, so even if it has a high recognition capability, it needs constant recalibration. This is the result of using the sequential decision tree construction method, which makes XGBoost adaptive but less stable when data changes.

When using a random forest (AUC = 0.82), which demonstrated a balance between accuracy and interpretability, the second most successful model was a combination of responses from multiple trees, which allows this model to be less susceptible to overfitting and withstand changes in the sample structure of borrowers. These features make a random forest the best choice for banks, since its long-term use depends on the reliability and stability of the model.

Although logistic regression (AUC = 0.76) has less predictive power than other machine learning methods, it is still the best option in circumstances requiring regulatory compliance and openness. Being a linear model, logistic regression is quite interpretable, which makes it possible to explain the elements influencing decision-making, which is especially important for financial institutions under close supervision.

In addition to the predictive ability of the models, the assessment of their stability over time was crucial for the study. The study of the population stability index (PSI) showed that each model has a $PSI < 0.2$, which reflects their stability. But XGBoost has the highest sensitivity to changes (PSI = 0.15), which requires constant updating of the model and performance monitoring. At the same time, random forest (PSI = 0.12) and logistic regression (PSI = 0.08) showed more consistent characteristics, which makes them more effective in situations where the long-term reliability of the model is crucial.

REFERENCES

- 1 Addo P.M., Guegan D., Hassani B. Credit risk analysis using machine and deep learning models // *Risks*. – 2018. – V. 6. – No. 2. – P. 38. – <https://doi.org/10.3390/risks6020038>.
- 2 Brown I., Mues C. An experimental comparison of classification algorithms for imbalanced credit scoring datasets // *Expert Systems with Applications*. – 2012. – V. 39. – No. 3. – P. 3446–3453. – <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.033>.

- 3 Grier D.A. Credit Scoring and Credit Control. – Oxford: Oxford University Press, 2012.
- 4 Henley W.E., Hand D.J. A k-nearest-neighbour classifier for assessing consumer credit risk // The Statistician. – 1996. – V. 45. – No. 1. – P. 77–95. – <https://doi.org/10.2307/2988486>.
- 5 Munkhdalai L., Namsrai O.B., Lee J.Y., Ryu K.H. An empirical comparison of machine-learning methods on bank client credit assessments // Sustainability. – 2019. – V. 11. – No. 3. – P. 699. – <https://doi.org/10.3390/su11030699>.
- 6 Oguz K., Ugur O., Kestel A. S. The impact of feature selection and transformation on machine learning methods in determining credit scoring // arXiv preprint. – 2023. – arXiv:2303.05427. – URL: <https://arxiv.org/abs/2303.05427>.
- 7 Tatarintsev M.A., Nikitin P.V., Gorokhova R.I., Dolgov V.I. Comparative analysis of machine learning technologies for credit scoring tasks // Fundamental Research. – 2022. – V. 2. – P. 7–12. – <https://doi.org/10.17513/fr.43419>.
- 8 XGBoost Documentation. Random Forests™ in XGBoost. – URL: <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/tutorials/rf.html> (дата обращения: 13.02.2025).
- 9 Kadiev A.D., Chibisova A.V. Neural network methods for credit scoring // Mathematical Modeling and Numerical Methods. – 2022. – V. 4. – P. 81–92. – URL: https://mmcm.bmstu.ru/articles/download_article/295/.
- 10 Hu L., Chen D., Wong J., Yang H., Wang K., Sudjianto A., Nair V. N. Supervised machine learning techniques: An overview with applications to banking // arXiv preprint. – 2020. – arXiv:2008.04059. – URL: <https://arxiv.org/abs/2008.04059>.
- 11 Shukhardin A. V. Development of a credit scoring system based on machine learning models // Ural Federal University Electronic Archive. – 2024. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/140553/1/m_th_a.v.shukhardin_2024.pdf.
- 12 Arram A., Ayob M., AlBadr M. A. A., Suleiman A., Albashish D. Credit rating prediction using machine learning models: A new dataset // arXiv preprint. – 2023. – arXiv:2310.02956. – URL: <https://arxiv.org/abs/2310.02956>.
- 13 Rastorguev A.V., Mikishanina E.V. Building a scoring model for assessing borrower creditworthiness // Электронный научный журнал «Вектор экономики». – 2022. – No. 5. – URL: https://www.vectoreconomy.ru/images/publications/2022/5/mathematicalmethods/Rastorguev_Mikishanina.pdf.
- 14 Dauletkanuly Y., Oyshynova G. A. The use of machine learning and artificial intelligence by the monetary regulator // Economic Review of the National Bank of the Republic of Kazakhstan. – 2023. – No. 4. – URL: <https://nationalbank.kz/file/download/98995>.
- 15 Центральный банк Российской Федерации. The impact of negative news on public perception of inflation // Рабочие материалы Банка России. – 2022. – No. 111. – URL: https://www.cbr.ru/content/document/file/144918/wp_111.pdf.
- 16 Biecek P., Chlebus M., Gajda J., Gosiewska A., Kozak A., Ogonowski D., Sztachelski J., Wojewnik P. Enabling machine learning algorithms for credit scoring: Explainable artificial intelligence (XAI) methods for clear understanding complex predictive models // arXiv preprint. – 2023. – arXiv:2310.02956. – URL: <https://arxiv.org/abs/2310.02956>.

REFERENCES

- 1 Addo, P.M., Guegan, D., & Hassani, B. Credit risk analysis using machine and deep learning models. Risks, 6 (2), 38 (2018). <https://doi.org/10.3390/risks6020038>.
- 2 Brown, I., & Mues, C. An experimental comparison of classification algorithms for imbalanced credit scoring datasets. Expert Systems with Applications, 39 (3), 3446–3453 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.033>.
- 3 Grier, D.A. Credit Scoring and Credit Control. Oxford University Press (2012).
- 4 Henley, W.E., & Hand, D.J. A k-nearest-neighbour classifier for assessing consumer credit risk. The Statistician, 45 (1), 77–95 (1996). <https://doi.org/10.2307/2988486>.
- 5 Munkhdalai, L., Namsrai, O.B., Lee, J.Y., & Ryu, K.H. An empirical comparison of machine-learning methods on bank client credit assessments. Sustainability, 11 (3), 699 (2019). <https://doi.org/10.3390/su11030699>.
- 6 Oguz, K., Ugur, O., & Kestel, A.S. The impact of feature selection and transformation on machine learning methods in determining credit scoring. (2023). arXiv preprint, arXiv:2303.05427. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2303.05427>.

7 Tatarintsev, M.A., Nikitin, P.V., Gorokhova, R.I., & Dolgov, V.I. Comparative analysis of machine learning technologies for credit scoring tasks. *Fundamental Research*, 2, 7–12 (2022). <https://doi.org/10.17513/fr.43419>.

8 XGBoost Documentation. (n.d.). Random Forests™ in XGBoost. Retrieved from <https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/tutorials/rf.html>.

9 Kadiev, A.D., & Chibisova, A.V. Neural network methods for credit scoring. *Mathematical Modeling and Numerical Methods*, 4, 81–92 (2022). URL: https://mmcm.bmstu.ru/articles/download_article/295/.

10 Hu, L., Chen, D., Wong, J., Yang, H., Wang, K., Sudjianto, A., & Nair, V. N. (2020). Supervised machine learning techniques: An overview with applications to banking. *arXiv preprint*, arXiv:2008.04059. URL: <https://arxiv.org/abs/2008.04059>.

11 Shukhardin, A.V. (2024). Development of a credit scoring system based on machine learning models. *Ural Federal University Electronic Archive*. URL: https://elar.ufu.ru/bitstream/10995/140553/1/m_th_a.v.shukhardin_2024.pdf.

12 Arram, A., Ayob, M., AlBadr, M. A.A., Suleiman, A., & Albashish, D. Credit rating prediction using machine learning models: A new dataset. (2023). *arXiv preprint*, arXiv:2310.02956. URL: <https://arxiv.org/abs/2310.02956>.

13 Rastorguev, A.V., & Mikishanina, E.V. Building a scoring model for assessing borrower creditworthiness. *Electronic Scientific Journal “Vector of Economics, 5”*. (2022). URL: https://www.vectoreconomy.ru/images/publications/2022/5/mathematicalmethods/Rastorguev_Mikishanina.pdf.

14 Dauletkhanuly, Y., & Oyshynova, G. A. The use of machine learning and artificial intelligence by the monetary regulator. *Economic Review of the National Bank of the Republic of Kazakhstan*, 4 (2023). URL: <https://nationalbank.kz/file/download/98995>.

15 Central Bank of the Russian Federation. The impact of negative news on public perception of inflation. *Working Papers of the Bank of Russia*, 111 (2022). URL: https://www.cbr.ru/content/document/file/144918/wp_111.pdf. [in Russian].

16 Biecek, P., Chlebus, M., Gajda, J., Gosiewska, A., Kozak, A., Ogonowski, D., Sztachelski, J., & Wojewnik, P. (2023). Enabling machine learning algorithms for credit scoring: Explainable artificial intelligence (XAI) methods for clear understanding complex predictive models. *arXiv preprint*, arXiv:2310.02956. URL: <https://arxiv.org/abs/2310.02956>.

^{1*}Ордабаева Ж.,

докторант, ORCID ID: 009-0009-8273-3147,

*e-mail: zhannaordabayeva@gmail.com

¹Ibrahim Rıza Hallaç,

қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0003-0568-3114,

e-mail: ibrahim.hallac@alanya.edu.tr

¹Молдагулова А.Н.,

ф.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-1596-561X,

e-mail: aiman.moldagulova@gmail.com

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы қ., Қазақстан

НЕСИЕЛІК ӨНІМДЕРДІҢ ӘР ТҮРІНЕ АРНАЛҒАН СКОРИНГТІК КАРТАЛАР

Аңдатпа

Несиелік скорингті дамыту – қаржы компанияларындағы несиелік тәуекелдерді басқарудағы негізгі тақырыптардың бірі. Алайда рейтингтік карталарды әзірлеудің бірыңғай тәсілі көбіне тиімсіз, өйткені несиелік өнімдер тәуекел деңгейі мен қаржыландыру мерзімі бойынша ерекшеленеді, сондай-ақ қарыз алушылар туралы ақпарат көлемі жеткіліксіз болуы мүмкін. Мақалада тұтынушылық несие, қайта қаржыландыру, шағын және орта бизнеске арналған несиелер, автокредиттер, ипотекалық несиелер, финтех технологиялары және P2P несие беру үшін скорингтік карталарды жасау ерекшеліктері қарастырылады.

Жұмыс қарыз алушының есеп айырысу кезінде дефолтқа ұшырау ықтималдығына әсер ететін маңызды факторларды салыстырмалы талдау ретінде ұсынылады. Зерттеуде сегменттер бойынша машиналық оқыту әдістерін қолдану және болжамның дәлдігін арттыруға мүмкіндік беретін балама деректер көздерін пайдалану мәселелері қарастырылады. Өртүрлі несиелік өнімдерге байланысты талдау скорингтік карталарды құрудың оңтайлы тәсілін таңдауға ұсыныстар жасауға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде қарыз алушының несиелік қабілетін болжаудың дәлдігін арттырып, дефолт тәуекелінің деңгейін төмендетеді.

Тірек сөздер: несиелік скоринг, скорингтік карталар, несиелік өнімдер, қайта қаржыландыру, машиналық оқыту, тәуекелдерді басқару, несиелік қабілеттілік, балама деректер.

¹***Ордабаева Ж.,**

докторант, ORCID ID: 009-0009-8273-3147,

*e-mail: zhannaordabayeva@gmail.com

¹**İbrahim Rıza Hallaç,**

ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0003-0568-3114,

e-mail: ibrahim.hallac@alanya.edu.tr

¹**Молдагулова А.Н.,**

к.ф.-м.н., ассоциированный профессор,

ORCID ID: 0000-0002-1596-561X, e-mail: aiman.moldagulova@gmail.com

¹Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

СКОРИНГОВЫЕ КАРТЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КРЕДИТНЫХ ПРОДУКТОВ

Аннотация

Развитие кредитного скоринга является одной из ключевых тем, на которые обращают внимание при управлении кредитными рисками в финансовых компаниях. Однако единый подход к созданию рейтинговых карт зачастую бесполезен, поскольку кредитные продукты различаются по уровню риска и срокам финансирования, а информации о заемщиках зачастую недостаточно. В статье рассматриваются особенности создания кредитных карт для потребительского кредитования, рефинансирования, малого и среднего бизнеса, автокредитования, ипотечного кредитования, финтеха и P2P-кредитования. Таким образом, настоящую работу можно рассматривать как приведенный выше сравнительный анализ наиболее важных элементов, влияющих на вероятность дефолта заемщика при расчетах по сегментам, вместе с рассмотрением методов машинного обучения и использованием альтернативных источников данных, которые могут повысить точность прогноза. В зависимости от обычного кредитного продукта анализ позволяет выработать рекомендации по выбору оптимального подхода к созданию скоринговых карт, что повышает точность прогнозирования кредитоспособности заемщика и снижает степень риска дефолта.

Ключевые слова: кредитный скоринг, скоринговые карты, кредитные продукты, рефинансирование, машинное обучение, управление рисками, кредитоспособность, альтернативные данные.

Article submission date: 13.02.2025

UDC 62-51
IRSTI 28.23.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-110-122>

^{1*}**Telgozhayeva F.,**

PhD student, ORCID ID: 0009-0004-2313-6952,

*e-mail: faridats@mail.ru

¹**Tyulepberdinova G.,**

Cand.Phys-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0002-4322-8983,

e-mail: tyulepberdinova@mail.ru

^{1,2}**Kunelbayev M.,**

Master's degree, ORCID ID: 0000-0002-5648-4476,

e-mail: murat7508@yandex.kz

¹Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan

²Institute of Information and Computational Technologies,
Almaty, Kazakhstan

MODELING HEATING DYNAMICS IN THE ROOM USING COMSOL MULTIPHYSICS

Abstract

In this study, a physical model of indoor air temperature change dynamics has been developed, considering heat transfer and convection. The system was modeled in COMSOL Multiphysics and tested in MATLAB, where the influence of external temperature, room area, number of radiator sections and air flow velocity were analyzed. The results showed a strong correlation between room temperature and external temperature (0.92), while weaker dependence was observed on the temperature of a radiator (0.2), height (0.1) and area of the room (0.11). However, number of sections and size of the radiator have the least impact on the room temperature (0.07). Additionally, initial temperature of the room does not have any significant correlation with final room temperature. The correlation, observed in simulations enabled us to develop transfer function of controlled object in MATLAB/Simulink. Nonlinear relay, used in resultant model, is used to turn actuator on and off to control room temperature. The results of the study can be used to create neural network to simulate the physical behavior of the room temperature in different initial conditions.

Keywords: room temperature control system, COMSOL Multiphysics, MATLAB, transfer function, reinforcement learning.

Introduction

Today comfortable living and working totally depend on automatic systems of the building services. These systems are used in different types of buildings: houses, commercial and industrial buildings. Global energy crisis and high attention to energy consumption efficiency make highly comfortable and efficient automatic building control systems strongly important [1].

In order to automatically maintain the indoor microclimate, sensors and actuators are used, which interact to create comfortable living conditions for humans. The sensors measure air temperature, humidity, and carbon dioxide levels and transmit the collected data to the control unit. After processing the received data, this unit decides on the further operation of heating, ventilation and air conditioning [2–7].

The rapid development of telecommunication technologies, the Internet of Things, and artificial intelligence allowed the systems not only to increase the efficiency of indoor climate control systems, but also to increase the accuracy and speed of these systems [8]. The use of artificial intelligence

and the Internet of Things makes it possible to respond to any changes in the environment, predict the consequences of these changes, and take preventive measures to eliminate these undesirable consequences through rapid processing and transmission of huge amounts of data [9–11].

Automated temperature control systems are becoming a backbone part of modern buildings, whether they are private homes, office buildings or industrial structures, helping to maintain comfort and reduce their energy consumption. According to the International Energy Agency (IEA), up to 40% of all energy in buildings is spent on heating, air conditioning and ventilation (HVAC), which increases the field of activity for the introduction of smart control systems that can reduce these costs by 20–30% [12–13].

When developing such systems, it is important to take into account many factors: building design features, regional climate, equipment characteristics, and even user preferences, for example, in regions with harsh winters, users will pay special attention to thermal insulation and integration of heating systems with renewable energy sources such as solar panels and heat pumps [14–16]. Automated temperature control systems are used not only in residential and office buildings, but also in specialized facilities such as hospitals, laboratories, and server rooms, where stable temperature is critically important because it affects operation of equipment and even human health, as well as reducing likelihood of errors and improving system reliability [17]. The development of automated systems plays an important role not only for individual users, but also for the whole society, contributing to the creation of "smart" cities and reducing negative impact on the environment [18–20].

One of the ways to solve the problem of automation of energy consumption and climate control in buildings is to create accurate mathematical models that predict indoor climate changes [21]. Another promising area is the use of artificial intelligence, which, based on the trained sample and the results of previous selections made by the system, is able to predict the future state of the system based on current state and choose actions to improve the future state. Modern research shows that machine learning algorithms, especially reinforcement learning, can significantly improve the efficiency of such systems.

The main problem of implementing microclimate management systems in buildings using reinforcement learning is the risks of financial, moral and technical damage in the process of AI training in a real building. In addition, the resulting model will be suitable for use only at the building where it was trained. Therefore, the most accurate digital model of a real room is needed, which will allow simulating various scenarios of the system operation [22–23].

There are three main approaches to modeling building energy consumption: white-box, black-box, and grey-box models [24]. In general, models for predicting building energy consumption are mathematical methods, often based on physical principles. In the early stages of development of such models, the main focus was on physical (white-box) approaches, which were widely used to calculate the energy performance of buildings [25].

With the progress in machine learning algorithms and artificial intelligence, alternative forecasting methods focused on data analysis, the so-called "black box" models, began to actively develop. Later, a hybrid approach appeared – "grey box" models, combining both physical equations and the processing of empirical data [26]. Each of these approaches has both advantages and limitations.

White box models are based on fundamental physical laws, such as the conservation of energy and mass. Their important advantage is the high opportunity to interpret the results using physical laws, which makes such models especially useful for analysis and verification. However, their correct work requires detailed full information about the building, which is often difficult to obtain [27].

Black box models are based on historical data on energy consumption and do not require deep knowledge of the physics of the building. They are highly flexible, can adapt to new data and constantly improve as they accumulate new data from environment [28]. However, their disadvantage is their high sensitivity to the quality of the input data.

Gray box models combine elements of both of the above approaches. They partially use physical principles, but in a simplified form, and at the same time actively use data analysis methods.

This approach allows to increased efficiency without significant loss of accuracy and explain ability [25, 29].

When creating models for predicting building energy consumption, uncertainties inevitably arise, which can be conditionally divided into three categories: the human factor, building properties, and climatic conditions.

During modeling building energy consumption certain uncertainties occur. They can be classified in three group: human, building and weather factors. Human factors uncertainties are related to perception of people of environmental conditions in the building and cannot be predicted accurately. Building uncertainties related to the geographic placement of building, materials of the wall and its degree of obsolescence. The final uncertainty factor is weather, which has very high impact on HVAC system itself and two mentioned parameters [30–31].

In this work, in order to create an accurate digital model, the COMSOL Multiphysics was used to simulate the dynamics of the air temperature of the room in different conditions, as it was validated in [32]. The influence of air temperature and capillary pressure on the properties of building materials was analyzed in the COMSOL Multiphysics environment, which helped to evaluate their thermal characteristics [33]. These data can be useful in designing new buildings and selecting suitable materials for heating systems, including underfloor heating [34–36]. As a result, the physical model of the room was created, which makes it possible to analyze the dynamics of indoor air temperature under various initial conditions, such as room size, initial air temperature, temperature and radiator size. This will become the basis for further development of AI, which will be able to adapt the microclimate of the building effectively.

Materials and methods

To study the dynamics of indoor temperature changes in this paper, the physical model was developed, which is based on numerical methods for calculating heat transfer and convection processes using the COMSOL Multiphysics software package. This model takes into account the following parameters: room area, number of radiator sections, ceiling height, radiator temperature, outdoor air temperature, and indoor air flow velocity. Determining the degree to which these factors are taken into account considering dynamics of indoor temperature changes will improve the accuracy of simulating the dynamics of temperature changes using a neural network. Modeling of heat transfer and convection is based on solving a system of equations describing the movement of heat flows in a room and on the surfaces of heated objects, which are the subject of research in the discipline of heat and mass transfer. To model such processes, the finite element method is used, which allows taking into account the geometry of rooms, the interaction of air flows, and heat transfer processes in gases and solids.

On the other hand, the dynamics of temperature change can be considered as an object of control and has the properties of an inertial link of the first order, to which the research methods used in the theory of automatic control can be applied.

Finally, since the dynamics of indoor temperature changes, although a nonlinear process, can generally be linearized and predicted with good accuracy, a digital model based on neural networks can be built that will be able to predict the final temperature and steady-state time based on the training sample, depending on the input parameters.

Mathematical model of the control object

We will construct heat balance equation for air in the room with window and radiator and consider the air in the room as control object. The control parameter will be the air temperature T near the wall opposite the radiator, since the room is a fairly large object and some temperature gradient will be observed in it. For simplicity, let's assume the dependence of the air temperature on the outside temperature T_{amb} and on the power of the heat flow the radiator g_0 , as shown in equation (1).

$$T = f(T_{amb}, g) \quad (1)$$

Due to the law of conservation of energy, part of the power P_1 goes to heating the air, part P_2 is dissipated by transferring heat the walls of the room, as shown in equation (2–3).

$$P_1 = c \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{1}{p} S(T - T_{amb}) \quad (3)$$

where p is the coefficient of resistance of the walls of the room to heat loss, which depends on the material and thickness of the walls, m^2K/W , S is the area of the walls. Let us consider that the sum of both powers is equal to the product of the power of the heat flow from the radiator and the area of this radiator, as shown in equation (4).

$$gS_0 = c \frac{dT}{dt} + \frac{1}{p} S(T - T_{amb}) \quad (4)$$

where S_0 is the surface area of the radiator. Let us write the equation for the static mode of the system (5):

$$gS_0 + \frac{S}{p} T_{amb0} = \frac{S}{p} T_0 \quad (5)$$

where T_{amb0} is the outside air temperature at time $t=0$, T_0 is the indoor air temperature at time $t=0$. Next, we will consider not absolute values, but their deviation and substitute them into the main equation (5) to get (9):

$$T = T_0 + T' \quad (6)$$

$$g = g_0 + g' \quad (7)$$

$$T_{amb} = T_{amb0} + T'_{amb} \quad (8)$$

$$(g_0 + g')S_0 = c \frac{d(T_0 + T')}{dt} + \frac{1}{p} S((T_0 + T') - (T_{amb0} + T'_{amb})) \quad (9)$$

Which gives us the following equation (10):

$$c \frac{dT'}{dt} + \frac{S}{p} T' = g'S_0 + \frac{S}{p} T'_{amb} \quad (10)$$

From the other hand to make the heat balance equation closer to the reality, we have to add ventilation heat and load heat (11).

$$C_p \rho V \frac{dT}{dt} = Q_{radiator} + Q_{vent} + Q_{load} - Q_{losses} \quad (11)$$

where C_p – specific heat capacity of air (J/kgK), ρ – air density (kg/m^3), V – room volume (m^3), T – indoor air temperature (K), $Q_{radiator}$ – radiator heat dissipation capacity (W), Q_{losses} – heat loss through ventilation (W), Q_{load} – internal heat input from people, equipment and lighting (W), Q_{losses} – heat loss through walls, window and door (W).

Heat loss through ventilation takes into account air consumption and temperature differences.

$$Q_{vent} = \rho C_p G (T_{vent} - T_{inter}) \quad (12)$$

where: G – ventilation air consumption (m^3/s); $R = \frac{cp}{S}$ – supply air temperature (K)

Now if we compare equations (10) and (11) we will see that constant value c depend on heat capacity of air, volume of room and density of air. The value Q_{losses} is determined by walls coefficient p , area of walls S and change of temperature T' as shown in equation (3). Radiator heat value depends on heat flow and surface area of radiator. We need to add ventilation heat which will be described by air flow velocity in the room v . So we get $Q_{vent} = C(T_{vent} - T)$, where $C = \rho C_p S_{vent} v$. Taking into account $T_{vent} = T_{amb}$ and S_{vent} – is ventilation window in the room, the equation (10) will be rewritten as following (13).

$$c \frac{dT'}{dt} + \frac{S}{p} T' + CT' = g' S_0 + \frac{S}{p} T'_{amb} + CT'_{amb} \quad (13)$$

Let R and K be as following $R = \frac{cp}{S}$, $K = \frac{S_0 p}{S}$ and $L = \frac{cp}{S}$ so in the end we will get the following equation (14):

$$R \frac{dT'}{dt} + T' + LT' = Kg' + T'_{amb} + LT'_{amb} \quad (14)$$

Control theory model

The radiator exerts the control effect, the external temperature exerts the disturbing effect. After the Laplace transformation we obtain (15):

$$RT'(s)s + T'(s) + LT'(s) = Kg'(s) + T'_{amb}(s) + LT'_{amb}(s) \quad (15)$$

We obtain the transfer function for the control action. Then, the disturbing action must be equal to 0 (16).

$$W_u^{CO} = \frac{T'(s)}{g'(s)} = \frac{K}{Rs+1+L} \quad (16)$$

We obtain the transfer function for the disturbing action. Then, the control action must be equated to 0 (17).

$$W_F^{CO} = \frac{T'(s)}{T'_{amb}} = \frac{1+L}{Rs+1+L} \quad (17)$$

The parameters of the control object (CO) R , K and L can be determined from experiments or simulations.

Results and discussion

In the COMSOL Multiphysics environment, a room with a radiator was modeled to simulate the dynamics of air temperature changes in various conditions, as shown in Figure 1. The following variables were set as input parameters: room area S (20–40 m^2), ceiling height H (2.5–3 m), temperature of the Trad radiator (273–303 K) and air flow velocity in the room (0.01–0.1 m/s). The output variable is the air temperature near the middle of the wall opposite the radiator at human height. The number of sections N of the radiator was calculated using empirical equation (18).

$$N = 1.2 \cdot SH \cdot \frac{Q_s}{Q_0} \quad (18)$$

where Q_s – heat amount needed to heat up 1 m^3 of air taking into account heat loss and Q_0 is heat amount of one section of radiator at certain temperature according to standard requirements for heating residential buildings. Width of the wrad aluminum radiator is calculated by multiplying the width of one section of radiator by calculated number of radiators. The height of radiator is constant

0.6 m. If Q_s will be 40 W/m^3 and Q_0 will be 200 W then number of radiators take values 12–29, width of radiator – (0.97–2.33 m) for given room areas.

A total of 41,850 simulations were run for 3,600 seconds, yielding a total of 2,511,000 rows of data. A correlation matrix was constructed to determine the dependence of the temperature over an hour on the specified input parameters.

Figure 1 shows a physical model of the room created in COMSOL Multiphysics in order to analyze the temperature distribution in the space with a radiator. As shown in Figure 1, the temperature near the radiator has high values close to the temperature of a radiator itself, about 343 K. Warm air flows tend to the ventilation and upward and cool down, which is clearly demonstrated in this figure.

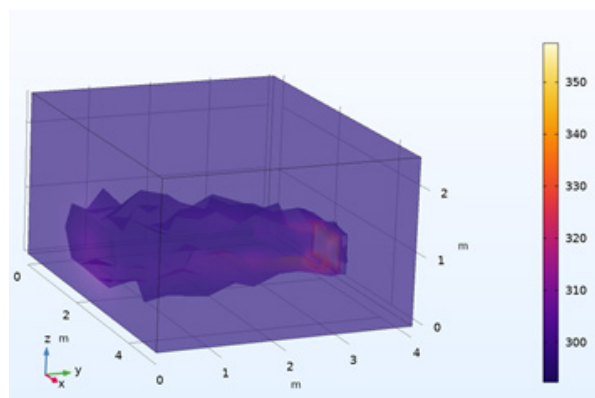


Figure 1 – Physical model of the room in COMSOL with radiator

Figure 2 presents the correlation matrix of data obtained from air temperature simulations under various initial conditions. The analysis reveals 92% correlation between outdoor temperature and the final indoor temperature, T_{max} , which aligns with results shown in [24–25]. Additionally, strong correlations are observed between room size, the number of radiator sections, and radiator width. This is due to how air circulation and radiator heat output influence temperature distribution – larger rooms take longer to heat up, while bigger radiators provide more heat output. In contrast, ceiling height has a significantly smaller impact on the final air temperature, showing only a 30% correlation, indicating a relatively low influence of convection processes within the room.

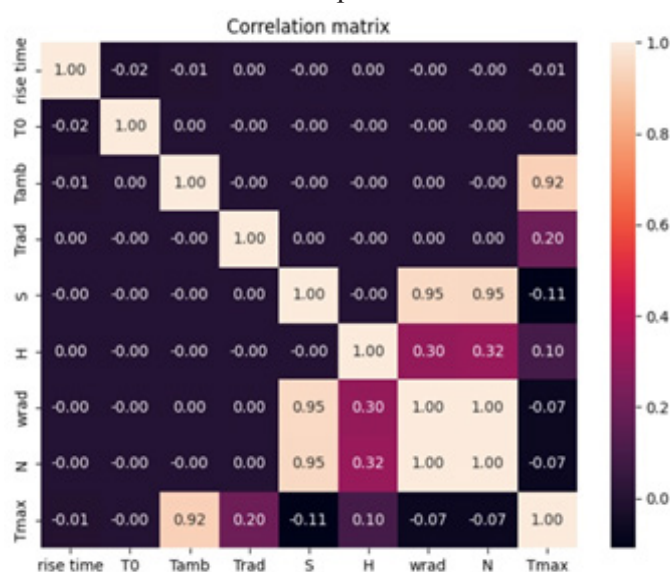


Figure 2 – Correlation matrix of variables of the room temperature

Parameters such as the area of the room (S) strongly correlates (0.95) with the size of the radiator (w_{rad}) and the number of sections, the height of the room (H) also shows a moderate correlation (0.30–0.32) with the size of the radiator (w_{rad}) and the number of radiator sections (N), which is justified by the standard requirements for a comfortable temperature in the heated room. Small negative correlations were also found between the final temperature and the size of the radiator and the number of its sections (about 7%) because the number of section and size of the radiator were precalculated for sizes of the room using equation (18). In addition, the room temperature is inversely proportional to the room area by 11% and depends on the radiator temperature by 20%. Thus, correlation analysis helps to determine the most significant input parameters which can be used to build the model of an automatic temperature control system, including ambient temperature, radiator temperature and size, room area and height, as well as temperature dynamics. The most uncertain parameter is the rise time, which is calculated from graphs of temperature versus time, and is the most important parameter in modeling, but its dependence on the above parameters is practically absent, which may indicate that this parameter depends on other parameters and cannot be determined analytically.

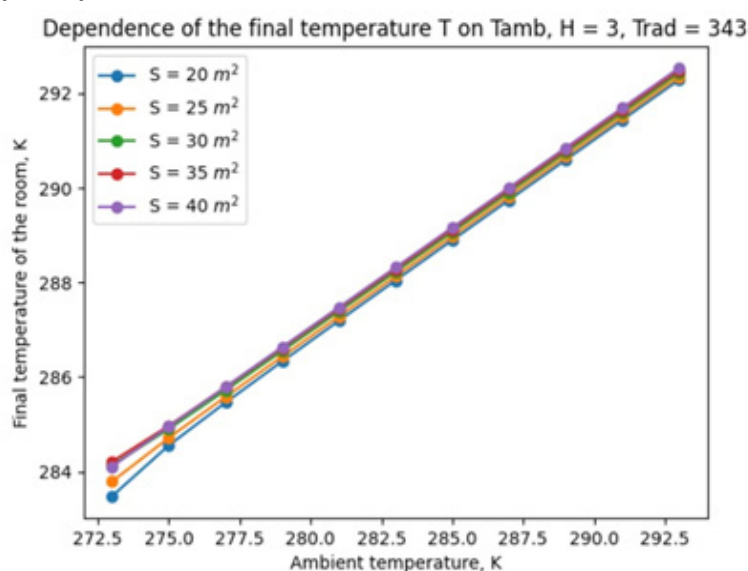


Figure 3 – Dependence of final temperature of the room temperature at height 3 m, radiator temperature 343 K in room with different area S

Figure 3 shows the dependence of the final room temperature on the ambient temperature for various area values. All the lines on the graph follow linear trend, which indicates a direct dependence of the final temperature on the ambient temperature, which agrees with experimental data.

The time constant R (rise time) is determined from the graph and is the abscissa of the intersection point of the tangent to the room temperature graph at point zero and the horizontal line passing through the final room temperature. The rise time for different rooms areas at radiator temperature 343 K and height of the room 3 m shown in Figure 4.

Figure 4 shows the dependence of heating time on ambient temperature for different areas (S) of the system. Each line on the graph represents data for a specific area of the system, ranging from 20 m² to 40 m². The figure shows that the heating time of the system is not linear and shows significant fluctuations depending on the ambient temperature.

As an example, consider heating the room of 25 m² in size, with a ceiling height of 3 m. The flow power is 3690 W/m² at an air flow rate of 0.01 m/s, with a radiator temperature of 343 K and an outside air temperature of 281 K. Figure 5 shows a graph of the temperature change in the room. At the beginning, there is a sharp increase in temperature from 276 K to 288 K in the first 600 seconds, after which the temperature stabilizes around 288 K with slight fluctuations. This type

of change may indicate the process of heating the system and then switching to a stationary mode. Minor fluctuations are caused by external processes and at higher amplitude could be described using second order differential equation with damper.

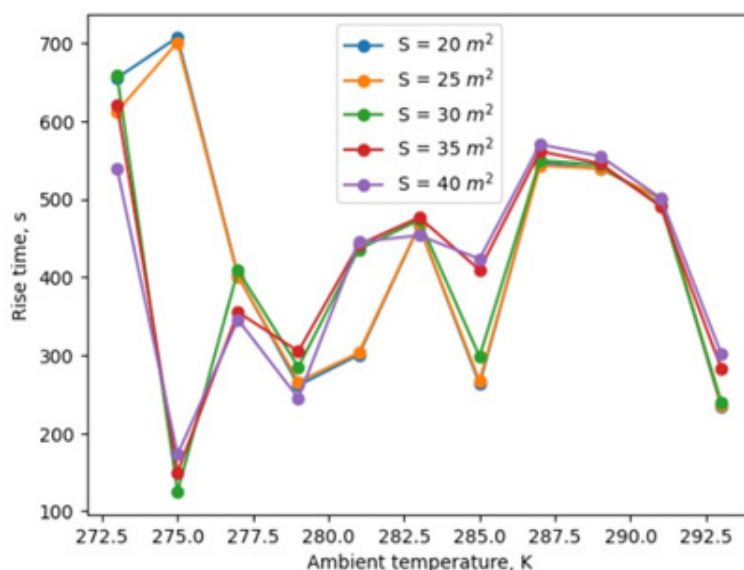


Figure 4 – Rise time at different areas of the room at height 3, radiator temperature 343 K

The mathematical expression for the transient response will look as shown in equation (19), as the transfer function of the room is an aperiodic link of the second order:

$$h(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{R}} \right) \quad (19)$$

K is obtained from the following equation (20):

$$K = \frac{T_{fin} - T_0}{gS_0} \quad (20)$$

The coefficient R is determined from the graph, it is equal to the time during which the tangent to the graph, passing through the initial temperature T_0 , will intersect T_{fin} . In this case applying described method we will get following value of $R=100$.

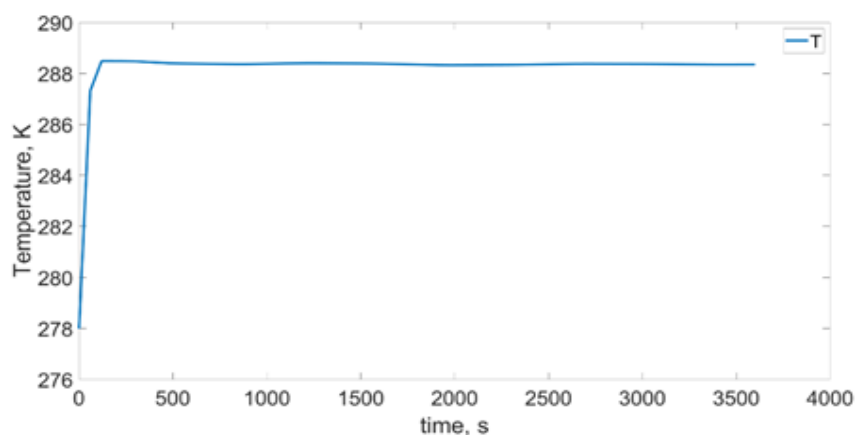


Figure 5 – Example of a graph of room temperature changes

Thus, the final transient response will look like the following equation (21):

$$h(t) = 0.0034 \left(1 - e^{-\frac{t}{100}} \right) \quad (21)$$

And the transfer function for the control action and the disturbing action will look like the following equations (22–23):

$$W_u^{CO} = \frac{T'(s)}{g'(s)} = \frac{0.0034}{100s + 1} \quad (22)$$

$$W_F^{CO} = \frac{T'(s)}{T'_{amb}(s)} = \frac{1}{100s + 1} \quad (23)$$

Development of an automatic control system in the MATLAB/Simulink development environment

In the MATLAB/Simulink environment, we will construct a nonlinear system for automatic control of the room temperature, as shown in Figure 6. Figure 7 shows the self-oscillations that occur during automatic temperature control. This circuit is designed to control the parameters of the smart home, including temperature, lighting, and power consumption/ the system uses dynamic filters of the first order, which allow taking into account the inertia of processes. The temperature is controlled through a heat transfer unit, and the lighting is adjusted depending on the input data and external conditions.

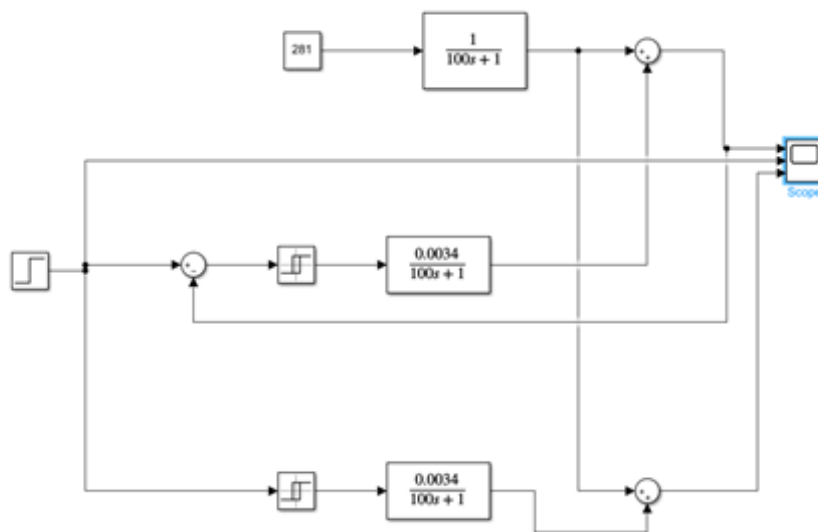


Figure 6 – Schematic diagram of a nonlinear room temperature control system

Figure 7 shows the dynamic of temperature changes in a room with and without a control system. The blue line indicates the desired temperature to be maintained in the room, which is represented by a Heaviside function with a final value of 285 K. As can be seen from the figure, in the absence of a monitoring system, the room temperature rises above the desired value. Using the relay characteristic turns off the radiator, which leads to a decrease in temperature and the creation of an auto oscillating process.

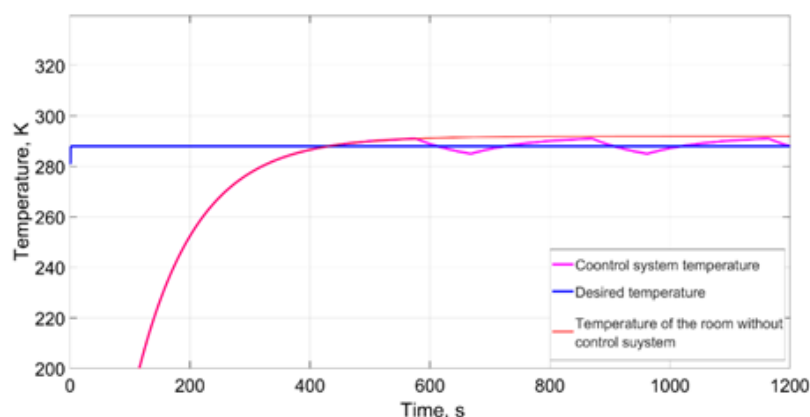


Figure 7 – Time diagram of self-oscillation in the control system

Conclusion

This paper shows the development of a model of a control object, which is the indoor air temperature. The research is aimed at creating an accurate model that simulates indoor air temperature at various parameters. For this purpose, a physical model was created in the COMSOL Multiphysics development environment and 41,850 simulations were performed and 2,511,000 rows of data were obtained. The data shows a 92% correlation of the final room temperature after an hour with the outside temperature of the space, as well as a correlation with the size of the room and the size of the radiator. The data obtained were used to develop a model of the control object and simulations of a nonlinear automatic control system were carried out. The results show important non-linear parameter R (rise time), which did not show dependence on other given parameters but has very high impact on model of control system. The results obtained show the possibility of further creating a neural network that simulates indoor air temperature based on physical simulations in COMSOL to create a highly efficient automatic control system.

REFERENCES

- 1 Halhoul Merabet, G., Essaaidi, M., Ben Haddou, M., Qolomany, B., Qadir, J., Anan, M., Al-Fuqaha, A., Riduan Abid, M., and Benhaddou, D. Intelligent building control systems for internal comfort and energy-efficiency: A systematic review of artificial intelligence-assisted techniques 144, 110969 (2021).
- 2 Smith, J., and Brown, T. Smart Climate Control System: A Review. *Energy Efficiency Journal*, 13(5), 987–1002 (2020).
- 3 Mirnaghi, M.S., and Haghighat, F. Fault detection and diagnosis of large-scale HVAC systems in buildings using data-driven methods: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, 229, 110492 (2020).
- 4 Simpeh, E.K. et al. Improving energy efficiency of HVAC systems in buildings: A review of best practices. *International Journal of Building Pathology and adaptation*, 40(2), 165–182 (2022).
- 5 Drgona, Jan, et al. All you need to know about model predictive control for building. *Annual Reviews in Control*, 50, 190–232 (2020).
- 6 Kusiak Andrew, Fan Tang and Guanglin Xu. Multi-objective optimization of HVAC system with evolutionary computation algorithm. *Energy*, 36(5), 2440–2449 (2011).
- 7 Johnson, L. Artificial Intelligence in HVAC Systems. *Journal of Sustainable Building Technology*, 15(3), 245–256 (2019).
- 8 Asim, N. et al. Sustainability of heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems in buildings – An overview. *International journal of environment research and public health*, 19(2), 1016 (2022).
- 9 Yao, Y., Shekhar, D.K. State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field. *Building and Environment*, 200, 107956 (2021).

- 10 Gunay, H. Burak, William Shen, and Guy Newsham. Data analytics to improve building performance: A critical review. *Automation in Construction*, 97, 96–109 (2019).
- 11 Afram Abdul, Farrokh Janabi-Sharifi. Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72, 343–355 (2014).
- 12 Zhang Tao and Khee Poh Lam. Practical implementation and evaluation of occupancy-based HVAC control for energy-efficient buildings. *Building and Environment*, 66, 183–193 (2013).
- 13 Zhao Heng and Frederic Magoules. A review on the predication of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3586–3592 (2012).
- 14 Yang Rui and Lingfeng Wang. Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control. *Sustainable Cities and Society*, 2(1), 1–7 (2012).
- 15 Ascione Fabrizio et al. Artificial neural networks to predict energy performance and retrofit scenarios for any member of a building category: A novel approach. *Energy*, 118, 999–1017 (2017).
- 16 Kampf Jerome H., Darren Robinson. A hybrid CMA-ES and HDE optimization algorithm with application to solar energy potential. *Applied Soft Computing*, 12(1), 239–251 (2012).
- 17 Garcia, M., Taylor, R. Automation in Critical Environment Temperature Control. *Journal of Building Performance*, 19(2), 334–349 (2022).
- 18 Alawadi, S. et al. A comparison of machine learning algorithms for forecasting indoor temperature in smart buildings. *Energy System*, 1–17 (2020).
- 19 Lu, C., Li, S., Lu, Z. Building energy predication using artificial neural networks: A literature survey. *Energy and Buildings*, 262, 111718 (2022).
- 20 Brandi, S. et al. Deep reinforcement learning to optimize indoor temperature control and heating energy consumption in building. *Energy and Buildings*, 224, 110225 (2020).
- 21 Telgozhayeva, F. et al. A mathematical Model of an Automated Control System for Heat Regulation in a Building. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 18, 231–242 (2023).
- 22 Elmaz, F., et al. CNN-LSTM architecture for predictive indoor temperature modeling. *Building and Environment*, 206, 108327 (2020).
- 23 Tagliabue, L.C. et al. Data driven indoor air prediction in educational facilities based on IoT network. *Energy and Buildings*, 236, 110782 (2021).
- 24 Franceschini, P.B., Neves, L.O. A critical review on occupant behaviour modelling for building performance simulation of naturally ventilated school buildings and potential changes due to the COVID-19 pandemic. *Energy and Buildings*, 258, 111831 (2022).
- 25 Yu, J., Chang, W.S., Dong, Y. Building energy prediction models and related uncertainties: A review. *Buildings*, 12(8), 1284 (2022).
- 26 Afram, A., Janabi-Sharifi, F. Review of modeling methods for HVAC systems. *Applied thermal engineering*, 67(1–2), 507–519 (2014).
- 27 Amasyali, K., El-Gohary, N.M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1192–1205 (2018).
- 28 Gunay, B., Shen, W., Newsham, G. Inverse blackbox modeling of the heating and cooling load in office buildings. *Energy and Buildings*, 142, 200–210 (2017).
- 29 Hamdaoui, M.A. et al. A review on physical and data-driven modeling of buildings hygrothermal behavior: Models, approaches and simulation tools. *Energy and Buildings*, 251, 111343 (2021).
- 30 Tian, W., De Wilde, P. Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections: A UK case study. *Automation in construction*, 20 (8), 1096–1109 (2011).
- 31 Liu, X. et al. Hourly occupant clothing decisions in residential HVAC energy management. *Journal of Building Engineering*, 40, 102708 (2021).
- 32 Lui, H. et al. Study on ventilation on indoor substation main transformer room on COMSOL software. 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). IEEE, pp. 296–300 (2017).
- 33 Maliki, M. et al. Two-dimensional transient modeling of energy and mass transfer in porous building components using COMSOL Multiphysics. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10(1), 319–328 (2017).
- 34 Charvatova, H., Prochazka, A., Zalesak, M. Computer simulation of temperature distribution during of the thermally insulated room. *Energies*, 11(11), 3205 (2018).
- 35 Gerlich, V. Modeling of heat transfer in buildings. *ECMS*, pp. 244–248 (2021).
- 36 Charraou, A. et al. Experimental study and numerical simulation of a floor heating system in a three-dimensional model: Parametric study and improvement. *Applied Thermal Engineering*, 233, 121151 (2023).

^{1*}Телгожаева Ф.С.,

докторант, ORCID ID: 0009-0004-2313-6952, *e-mail: faridats@mail.ru

¹Тюлепбердинова Г.А.,

ф.-м.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-4322-8983, e-mail: tyulepberdinova@mail.ru

^{1,2}Кунелбаев М.М.,

магистр, ORCID ID: 0000-0002-5648-4476,

e-mail: murat7508@yandex.kz

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты

Алматы қ., Қазақстан

COMSOL MULTIPHYSICS КӨМЕГІМЕН БӨЛМЕНІҢ ЖЫЛЫТУ ДИНАМИКАСЫН МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Бұл жұмыста жылу берілу мен конвекция үдерістерін ескере отырып, бөлмедегі ауа температурасының өзгеру динамикасының физикалық моделі жасалды. Жүйе COMSOL Multiphysics бағдарламасында модельденіп, MATLAB ортасында сынақтан өткізілді. Зерттеу барысында сыртқы температураның, бөлменің ауданының, радиатор секцияларының саны мен ауа ағыны жылдамдығының әсері талданды. Нәтижелер бөлме температурасы мен сыртқы температура арасындағы жоғары корреляцияны (0,92) көрсетті. Сонымен қатар, радиатор температурасына (0,2), бөлменің биіктігіне (0,1) және ауданына (0,11) әлсіз тәуелділік байқалды. Радиатор секцияларының саны мен оның жалпы көлемі бөлме температурасына ең аз әсер ететіні анықталды (0,07). Бастапқы бөлме температурасы мен соңғы температура арасында елеулі байланыс анықталмады. Модельдеу нәтижесінде байқалған корреляциялар MATLAB/Simulink ортасында басқарылатын жүйенің беріліс функциясын құруға негіз болды. Алынған модельде қолданылған сызықтық емес реле бөлмедегі температураны басқару мақсатында радиаторды қосу және өшіру үшін пайдаланылады. Бұл зерттеу нәтижелері әртүрлі бастапқы шарттар жағдайында бөлме температурасын болжау үшін нейрондық желі моделін құруда қолданылуы мүмкін.

Тірек сөздер: бөлме температурасын бақылау жүйесі, COMSOL Multiphysics, MATLAB, тасымалдау функциясы, нейрондық желілерді күшейту арқылы оқыту.

^{1*}Телгожаева Ф.С.,

докторант, ORCID ID: 0009-0004-2313-6952,

*e-mail: faridats@mail.ru

¹Тюлепбердинова Г.А.,

к.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0002-4322-8983,

e-mail: tyulepberdinova@mail.ru

^{1,2}Кунелбаев М.М.,

магистр, ORCID ID: 0000-0002-5648-4476,

e-mail: murat7508@yandex.kz

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Институт информационных и вычислительных технологий,

г. Алматы, Казахстан

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАГРЕВА В ПОМЕЩЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ COMSOL MULTIPHYSICS

Аннотация

В данной работе была разработана физическая модель динамики изменения температуры воздуха в помещении с учетом теплопередачи и конвекции. Система была смоделирована в COMSOL Multiphysics и

протестирована в MATLAB, где было проанализировано влияние внешней температуры, площади помещения, количества секций радиатора и скорости воздушного потока. Результаты показали сильную корреляцию между температурой в помещении и внешней температурой (0,92), в то же время наблюдалась более слабая зависимость от температуры радиатора (0,2), высоты (0,1) и площади помещения (0,11). Количество секций и размер радиатора оказывают наименьшее влияние на температуру в помещении (0,07). Кроме того, начальная температура помещения не имеет существенной корреляции с конечной температурой в помещении. Корреляция, наблюдаемая при моделировании, позволила разработать передаточную функцию управляемого объекта в MATLAB/Simulink. Нелинейное реле, используемое в результирующей модели, применяется для включения и выключения радиатора с целью управления температурой в помещении. Результаты исследования могут быть использованы для создания нейронной сети для моделирования динамики изменения температуры в помещении при различных начальных условиях.

Ключевые слова: система контроля температуры в помещении, COMSOL Multiphysics, MATLAB, передаточная функция, обучение с подкреплением.

Article submission date: 27.03.2025

UDC 004.7: 004.056
IRSTI 50.47.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-123-133>

^{1*}Sabeshuly I.

PhD student, ORCID ID: 0000-0002-9691-7993,

*e-mail: ilias.sabeshuly@gmail.com

¹Akzhalova A.,

Professor, PhD, ORCID ID: 0000-0002-1141-7595,

e-mail: a.akzhalova@kbtu.kz

²Sadok Ben Yahia,

Professor, PhD, ORCID ID: 0000-0001-8939-8948,

e-mail: say@mmmi.sdu.dk

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

²University of Southern Denmark, Sonderborg, Denmark

QUANTUM-ENHANCED BLOCKCHAIN SECURITY: INTEGRATING QUANTUM COMPUTING WITH NETWORK ATTACK DETECTION

Abstract

This paper describes a security framework that uses both blockchain technology and quantum-enhanced anomaly detection. We propose use of blockchain to create an unchangeable record of security events and smart contracts to automatically respond to threats that have been confirmed. A variational quantum circuit (VQC) is the basis for our system's hybrid quantum-classical model. The VQC processes information by turning classical data into quantum states, using parameterized gates to model complicated dependencies, and then measuring the result to classify it. We use a One-vs-Rest (OvR) method to find network attacks like Botnet, Brute Force, and Port Scan. We tested how well it worked in both perfect (noiseless) and simulated noisy quantum environments. The model was 93% accurate without noise and only 92% accurate with noise, which shows that it is strong. We found a major trade-off: the OvR method works well, but it costs a lot of computing power. This indicates that subsequent efforts should concentrate on creating more efficient quantum multiclass classification frameworks.

Keywords: variational quantum circuit (vqc), network anomalies, hybrid quantum-classical architecture, multi-class classification

Introduction

In the financial technology (fintech) sector, smart contracts play a transformative role by automating and securing financial transactions and services. They provide more efficient, transparent, and cost-effective operation. Smart contracts are self-executing agreements whose terms are spelled directly in the code. By embedding contract terms into code on the blockchain, smart contracts automatically enforce agreements without intermediaries.

Blockchains are distributed ledgers that help parties securely send transactions without the need for a trusted third party. Cryptographic technologies and consensus models, such as PoW, PoS, DPoS, PBFT, and PoA, have made blockchains possible [7]. The blockchain guarantees data integrity, as changes in the data can be verified using digital signatures and hash values.

This blockchain functionality ensures the integrity of attack logs and security data, rendering them immutable and available for forensic investigation and compliance verification. Just recording attacks is insufficient; thus, an automatic response system must be implemented to react immediately upon the detection of a security breach.

This can be accomplished via smart contracts to guarantee that designated actions are executed in reaction to identified threats. Besides autonomously countering attacks, blockchain-based smart contracts can administer a decentralized reputation system. A trust rating can be allocated to each IP address or organization, subject to dynamic modification based on its conduct. When a certain source repeatedly engages in malicious activities, its reputation rating diminishes, enabling other servers and security systems to obstruct ongoing interactions with that source.

The integration of AI-driven attack classification with blockchain enhances the effectiveness of this method, utilizing AI to improve threat detection through traffic analysis and reduction of false positives, while the blockchain element guarantees that security decisions are founded on verifiable and safeguarded real-time data. AI-enhanced technologies display efficiency through the utilization of quantum computing. An alternative to this methodology is Quantum Machine Learning (QML).

Quantum computing, through superposition and entanglement for concurrent computation, improves public blockchain networks by enhancing data security, transaction speed, and analytical proficiency. These developments are especially applicable to the multi-stage lifetime of a transaction, involving its progression from user generation and signing to final confirmation on the blockchain by miners. The last block verification phase is crucial for network security, and we will analyze its foundational mechanisms, starting with the traditional Proof of Work (PoW), to evaluate their merits and drawbacks.

PoW is the most classic consensus mechanism on the blockchain, first used by Bitcoin. Its main idea is that the system's participants (the miners) use their computing power to compete in a hash operation (SHA-256). The algorithm for searching for a suitable hash is the most energy-consuming for miners. Each node consumes energy to solve this problem in a large blockchain network, making it energy intensive.

The winner, who is the first to find a hash value below the stated goal, has the right to insert a new block into the blockchain and receive a certain amount of reward. This process requires significant computational resources and energy, making it a secure but resource-intensive consensus method.

Addressing energy challenges related to Proof-of-Work is more efficiently accomplished through alternative consensus processes, technological enhancements, and energy-conserving behaviors within the current classical computing paradigm [1, 5, 16, 17, 29].

Proof-of-Stake (PoS) differs from PoW in using stakes instead of mathematical puzzles, alleviating PoW's energy consumption problem. The term "stake" refers to the number of tokens a user allocates to participate in the validation process. Nodes do not need to solve a mathematical puzzle; instead, their participation in the consensus mechanism correlates with their stakes, and larger stakes exert a more significant impact on the validation of the subsequent block, thus improving both efficiency and energy conservation in consensus. The concerns of Proof of Stake include the risk of centralization and the "nothing at stake" attack, wherein validators may endorse numerous competing chains due to the negligible cost involved, potentially resulting in forks and security vulnerabilities. The Future Outlook underscores the need to create and integrate quantum-resistant cryptographic methods to guarantee enduring security [4, 8, 12, 15, 18, 19, 26].

Delegated Proof of Stake (DPoS) is a type of PoS in which participants use their tokens to select validators who verify and add blocks for rewards. DPoS usually helps to provide much faster transaction processing than PoW as PoS. As such, DPoS usually has some drawbacks, including a less decentralization and various security issues. The challenges of DPoS are the risk of centralization and Manipulation of Voting; due to votes in DPoS systems being based on the amount of cryptocurrency owned, wealthy participants can potentially influence or monopolize decision-making. Quantum computing can potentially alleviate some of the issues with DPoS by improving security, decentralization, and efficiency [9, 10, 20, 23].

Specific consensus mechanisms, such as Practical Byzantine Fault Tolerance and Proof of Authority, are used for private and protected blockchains.

Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) is a state machine replica copy algorithm that can be applied to synchronous network environments. PBFT has three essential components: view, primary,

and replica. The primary node initiates the voting process, and a replica node ensures its efficiency. When the primary node fails, the view rotation function is called to modify the current primary node. The challenges of PBFT are High Communication Overhead and Scalability Issues.

Quantum computation holds promise for alleviating PBFT's key problems by reducing communication overhead and improving scalability [6, 14, 21, 25, 27].

Proof of Authority (PoA) is an effective and swift consensus mechanism commonly utilized in private and regulated blockchains, like the POA Network, VeChain, and the Ethereum Kovan testnet. In a Proof of Authority (PoA) network, blocks and transactions are validated by authorized participants referred to as "validator nodes." The validator node can validate transactions, and valid transactions are passed on to the lead node for inclusion in new blocks. The proper functioning of PoA requires validator nodes to be uncompromising. Challenges of PoA are centralization, lack of anonymity, and risks related to trust in validators.

Quantum computing has the potential to mitigate many drawbacks of Proof of Authority by improving decentralization, security, privacy, and scalability. Significant contributions encompass quantum randomness for validator selection, quantum-resistant cryptography, and quantum machine learning for behavioral analysis [11, 24, 28].

Combining artificial intelligence, blockchain technologies, and quantum computing opens up new opportunities for creating more secure and effective systems for detecting and preventing attacks. This paper discusses methods for integrating quantum computing with network anomaly detection mechanisms to enhance the cybersecurity of blockchain systems.

This paper consists of the following sections: Introduction, Materials and methods (which details integration aspects and detection mechanisms), followed by sections on Results and Discussion and Conclusion.

Materials and methods

Modern network security uses advanced detection algorithms, including those based on machine learning and variational quantum circuits (VQC), to accurately identify and classify abnormal network traffic. Integrating these complex methods with blockchain technology forms a security ecosystem that ensures data integrity and consensus verification. Where detection results are verified and recorded on the blockchain, providing a reliable basis for analysis, these characteristics open up new opportunities to enhance network security by enabling the development of resilient and tamper-proof cybersecurity systems that seamlessly integrate advanced attack detection mechanisms with secure data management.

As noted above, smart contracts can automatically trigger actions, instant isolating affected nodes or blocking malicious IP addresses, when agents confirm the detection of network anomalies or attacks. To protect the network, smart contracts can distribute verified threat information between interconnected network segments or partner organizations, and can also initiate recovery protocols to restore normal operation after neutralizing the threat. This automation reduces reaction time and the number of human errors during critical security incidents.

Servers can log security events and network anomalies on the blockchain. This will increase transparency because incidents, such as distributed denial-of-service (DDoS) attacks, intrusion attempts, or suspicious activity, will be recorded as transactions in a block, which will create an immutable and reliable audit trail. This approach improves decentralization and distributes trust across the network reducing the number of points of failure and lowering the risk of manipulation by insiders.

Even though the combination of blockchain and network attack detection is promising, it is having trouble scaling up because networks need to be able to handle a lot of real-time security events without slowing down. There is also the problem of delay, since real-time verification is very important when threats are changing. Also, the need for good consensus mechanisms that can quickly check events so that a response can be made in a timely manner must be met. As a result, we

need to improve blockchain protocols for high-speed security applications, create quantum-resistant cryptographic methods, and look into adaptive smart contracts.

Security agents are very important in modern cybersecurity systems because they can adapt in real time, which makes networks more resilient and less likely to have performance problems. In this context, adding Quantum Machine Learning (QML) can speed up the processing of large amounts of data, which will help with accurate anomaly detection. Hybrid quantum-classical algorithms, which mix classical computations with quantum circuits, are the most promising solution, because physical quantum processors are affected by noise and decoherence, limiting their practical application.

Recent research shows a growing interest in QML. For example, [2] provides detailed guidance on the practical application of QML, while [3, 22] explores the vulnerabilities of quantum neural networks and discusses the potential limitations of these methods. Also, [2] demonstrates the effective application of QML in cybersecurity, specifically to detect network attacks [2].

This work utilizes a hybrid quantum-classical architecture based on a variational quantum circuit (VQC) for anomaly detection. The hybrid model combines the VQC with traditional preprocessing and a classification module, where we utilize a One-vs-Rest (OvR) methodology. Our VQC consists of three components, the first stage involves encoding input data and transforming classical information into a quantum state. The second stage consists of parameterized quantum gates, which form the crucial part of the circuit. Here, qubits undergo rotations and entanglement, enabling the modeling of complex nonlinear dependencies. The third stage involves measuring the output state, where quantum information is converted back to a classical representation, and the resulting data is used to update the circuit parameters.

The schematic of our hybrid quantum-classical architecture is outlined as follows:

The scaled input is then passed through a classical fully connected layer to reduce its dimensionality to match the number of qubits, n_{qubits} .

$$\mathbf{z} = \text{ReLU}(\mathbf{W}_{\text{fc}} \mathbf{x} + \mathbf{b}_{\text{fc}}). \quad (1)$$

The weights $\mathbf{W}_{\text{fc}}$ are initialized using the Xavier (Glorot) method to promote stable convergence. Layer normalization and dropout are applied to obtain the following:

$$\mathbf{z}_{\text{norm}} = \text{LayerNorm}(\mathbf{z}), \quad \mathbf{z}_{\text{drop}} = \text{Dropout}(\mathbf{z}_{\text{norm}}). \quad (2)$$

We apply [13] data reupload technique to improve the results. The quantum circuit encodes the classical features into a quantum state. For each qubit i , the initial encoding is performed by applying the following.

$$|\psi_0\rangle = \bigotimes_{i=1}^{n_{\text{qubits}}} RY(x_{\text{scaled},i})|0\rangle \quad (3)$$

The circuit then comprises n_{layers} variational blocks. In each block l and for each qubit i , we apply parameterized rotations:

$$|\psi_{l,i}\rangle = R_Y(\theta_{l,i} + 0.1)R_Z(\phi_{l,i} + 0.1)R_X(\gamma_{l,i} + 0.1)|\psi_i\rangle. \quad (4)$$

where $\theta_{l,i}$, $\phi_{l,i}$, and $\gamma_{l,i}$ are trainable parameters. The small offset of 0.1 improves stability during training. Following the rotations, a ring of CNOT gates is applied to entangle the qubits:

$$|\psi_{\text{ent}}\rangle = \left(\prod_{i=1}^{n_{\text{qubits}}-1} \text{CNOT}(i, i+1) \right) \text{CNOT}(n_{\text{qubits}}, 1)|\psi\rangle, \quad (5)$$

After the entangling layer, the input data is reuploaded by reapplying formula four as suggested in [13], with the RZ operator. After that, we add noise to correlate with the real environment of quantum computing. Unlike classical systems, where errors can be corrected using traditional

correction methods, quantum systems are subject to irreversible changes due to the anticloning theorem.

$$|\psi_0\rangle = \bigotimes_{i=1}^{n_{\text{qubits}}} RY(x_{\text{scaled},i})RZ((x_{\text{scaled},i})^2)|0\rangle \quad (6)$$

Depolarization means that a $1 - p$ qubit remains unchanged with probability p and with probability p it becomes a random state. It is modeled as applying Pauli operators with equal probability, meaning that depolarization noise destroys the superposition and randomly changes the qubit's state. A depolarizing channel is applied to each qubit with probability $p = 0.01$:

$$E(\rho) = (1 - p)\rho + p \frac{I}{2}. \quad (7)$$

In real quantum processors (such as IBM, Google, and Rigetti), noise is unavoidable, and its impact increases with the number of qubits. Therefore, noise modeling in quantum simulators makes it possible to test the stability of quantum algorithms, develop error correction methods, and optimize quantum circuits before running them on real quantum devices. Thus, noise simulation plays a key role in the development of quantum computing, ensuring the transition from theoretical models to the practical use of quantum algorithms.

The circuit concludes with getting the results and converting them to classical values using the Pauli operation:

$$z_i = \langle \psi_{\text{var}} | Z_i | \psi_{\text{var}} \rangle, \quad i = 1, \dots, n_{\text{qubits}}. \quad (8)$$

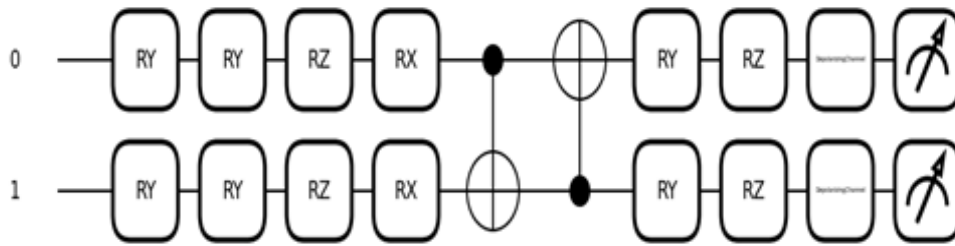


Figure 1 – Full quantum circuit diagram with two qubits, one layer, and noise simulation

The quantum circuit outputs a feature vector $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n_{\text{qubits}}}$, which is processed by a classical classifier:

$$\mathbf{h} = \text{ReLU}(W_1 \mathbf{q} + \mathbf{b}_1), \quad (9)$$

$$\text{logits} = W_2 \mathbf{h} + \mathbf{b}_2. \quad (10)$$

The predicted class is determined by:

$$\hat{y} = \text{argmax}(\text{logits}). \quad (11)$$

In our OvR strategy, a separate binary classifier is trained for each class k . For each binary classifier, the labels are defined as:

$$y_{\text{bin}} = \begin{cases} 1, & \text{if } y = k, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

Each binary classifier is trained using the binary cross-entropy loss:

$$\mathcal{L}_{\text{BCE}} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_{\text{bin}}^{(i)} \log(p^{(i)}) + (1 - y_{\text{bin}}^{(i)}) \log(1 - p^{(i)})], \quad (13)$$

where $p^{(i)} = \sigma(\text{logit}^{(i)})$ and σ denotes the sigmoid function. During inference, the final class prediction is made by selecting the class with the highest probability:

$$\hat{y}_{\text{OvR}} = \underset{k}{\operatorname{argmax}} p_k. \quad (14)$$

Results and discussion

This section presents the experimental results of the hybrid quantum-classical model for network anomaly detection. We evaluate multi-class classification of network threats, including Botnet, Brute Force, DoS/DDoS, Web Attack, Port Scan, and Normal traffic. Two scenarios are considered.: without noise and with noise introduced to simulate the realistic environment of quantum computing. The results are analyzed regarding precision, recall, and F1-score, followed by a comparative analysis and discussion of the findings.

For testing, we create a quantum model using the PennyLane framework to classify different types of attacks: Botnet, DoS/DDoS, Brute Force, Web Attack, and Port Scan. The testing environment utilizes a laptop with 32 GB of RAM, a 13th-gen Intel® Core™ i9-13980HX CPU, and an NVIDIA GeForce RTX 4090 laptop GPU. The model determines whether the input is an attack or not. In the event of an attack, the model triggers a defense activation function, which then records the IP address as blocked.

This work utilizes network traffic data from several publicly available sources to evaluate our hybrid quantum-classical classifier. The dataset is formed by concatenating multiple CSV files from the CIC IDS 2017 dataset (<https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html>) and the CIC-DDoS 2019 evaluation dataset available on Kaggle (www.kaggle.com/datasets/aymenabb/ddos-evaluation-dataset-cic-ddos2019/data/). These files contain traffic captures corresponding to various attack types (e.g., Port Scan, Web Attacks, DDoS, Infiltration) and normal traffic collected at different times and days.

Due to merging datasets with some different parameters, we needed these parameters for datasets that lack them, mainly synthetic IP addresses (Source IP and Destination IP) are generated. After merging the CSV files, the dataset undergoes preprocessing steps, including mean imputation for missing values, standard scaling, and class balancing via SMOTE. The final dataset comprises approximately 12000 samples, distributed evenly among six classes: Botnet, Brute Force, DoS/DDoS, Normal, Port Scan, and Web Attack. For testing, 20% of the dataset is used.

Table 1 – Classification Report Without Noise

Label	Precision	Recall	F1-score	Support
Botnet	0.92	0.97	0.94	439
Brute Force	0.90	0.99	0.94	439
DoS/DDoS	0.92	0.98	0.95	439
Normal	0.97	0.75	0.85	439
Port Scan	0.96	0.97	0.97	439
Web Attack	0.95	0.92	0.93	439
Accuracy			0.93	2634
Macro avg	0.93	0.93	0.93	2634
Weighted avg	0.93	0.93	0.93	2634

When evaluating the model's performance in a noise-free environment, it achieves an overall accuracy of 93% across all classes. The model demonstrates high reliability for the Botnet class with a precision of 0.92, a recall of 0.97, and an F1-score of 0.94, indicating minimal false positives. The model does a good job of finding Brute Force attacks, with a precision of 0.90 and a recall of 0.99, which means that it has a low false negative rate.

For DoS/DDoS attacks the model has a balanced precision of 0.92 and a recall of 0.98, which gives it a strong F1-score of 0.95. Port Scan detection is quite accurate, with a precision of 0.96 and a recall of 0.97. Web Attacks are classified effectively, with a precision of 0.95 and a recall of 0.92, which means that the system is both sensitive and specific. The accuracy for Normal traffic is good at 0.97, but the recall is much lower at 0.75, which means that there are some false negatives.

The model achieves 93% accuracy in a noise-free setting, which shows that it can generalize well across all classes. The macro-averaged precision, recall, and F1-score are 0.93, which shows that the classification performance is stable and trustworthy. These metrics show that the model can tell different forms of network traffic apart, with only small changes in performance between the classes. The results show that the hybrid quantum-classical model can accurately identify network threats in a perfect, noise-free environment. This proves that the variational quantum circuit architecture works well when used with classical preprocessing.

Table 2 – Classification Report with Noise

Label	Precision	Recall	F1-score	Support
Botnet	0.92	0.93	0.92	439
Brute Force	0.90	1.00	0.95	439
DoS/DDoS	0.86	0.97	0.92	439
Normal	0.97	0.75	0.84	439
Port Scan	0.93	0.98	0.95	439
Web Attack	0.94	0.88	0.91	439
Accuracy			0.92	2634
Macro avg	0.92	0.92	0.92	2634
Weighted avg	0.92	0.92	0.92	2634

The addition of noise changes how well different classes are classified. The model still has a high overall accuracy of 92%. For the Botnet class, precision stays the same at 0.92, but recall goes down a little to 0.93, which shows that noise has little effect. The Brute Force detection can still work even when there is noise, and it still has perfect recall at 1.00. When it comes to finding DoS/DDoS attacks, the accuracy drops to 0.86, which means there are more false positives, but the recall stays high at 0.97. Normal traffic classification has a high precision of 0.97 but a low recall of 0.75. This means that the noise did not have a big effect on how careful the model was. Port Scan detection is very reliable, with a precision of 0.93 and a recall of 0.98. Web Attack detection's recall goes down a little to 0.88, but its overall performance is still good, with an F1-score of 0.91. The macro-averaged precision, recall, and F1-score are all 0.92, which shows that the performance is stable across all classes. In general, the model is 92% accurate even when there is a lot of noise, which shows that it is very reliable even when the environment changes. The model still has high recall rates, which means that most attacks are still found, even though noise affects accuracy for some specific classes. The fact that the results stay the same even when there is noise shows that the model is strong and flexible, which shows that it could be useful in real-world quantum computing settings.

In terms of how well the model works, we can find numerous crucial indications by comparing the results we got with and without noise. Adding noise caused a little drop in overall accuracy, from 93% to 92%, which shows that the model's ability to classify things was only slightly affected.

The impact of noise differs by category. The recall rate for the Brute Attack class stays perfect at 1.00 in both cases, showing that the model is quite good at finding these kinds of attacks even when there is noise. For DoS/DDoS attacks, on the other hand, the accuracy drops from 0.92 to 0.86. This means that there are more false positives because of noise, but the recall number stays high at 0.97. For normal traffic, the same pattern can be seen, with a high precision of 0.97. The recall value, on the other hand, is lower at 0.75, which means that noise did not have a big effect on how the model classified normal requests.

The model has shown that it is stable in the Port Scan and Web Attack classes, keeping high levels of precision and recall even with noise. The results show that the model can handle interference well, especially when it comes to finding Brute Force, Port Scan, and Web Attacks. Even still, the higher number of false positives in DoS/DDoS attacks and the persistently poor recall for Normal traffic show that more optimization is needed to get a more even spread of indications across all classes. In general, the results demonstrate that noise might lower false alarms in certain areas but make others less sensitive. To increase performance in real-world situations, deliberate changes are needed.

Conclusion

This paper examines the integration of blockchain networks and smart contracts with quantum-enhanced anomaly detection systems to improve cybersecurity systems. We use a hybrid quantum-classical architecture with VQC. In silent and noisy environments, the model demonstrates an overall accuracy above 90% when classifying network anomalies such as Botnet, Brute Force, DoS/DDoS, Web Attacks, and Port Scans.

The model achieves an overall accuracy of 93% in a noiseless environment. However, due to the lower recall for normal traffic we can see an increase in false positives. In conditions of increased noise, the accuracy decreases slightly to 92%. Comparative analysis has shown that noise factors reduce false positives in some categories but reduce sensitivity in others. This indicates the need for further optimization to balance performance indicators in all classes.

A fundamental component of this research is the implementation of a binary classification strategy utilizing the OvR methodology. This technique trains different binary classifiers for each class, which lets the model handle difficult multiclass classification problems. But this method needs to train quantum circuits n times (where n is the number of classes), which costs a lot of computing power, and the accuracy improvement isn't much more than that of a single quantum multiclass model. This indicates that additional study is required to enhance the OvR technique for quantum circuits or to investigate more efficient designs for quantum multiclass classification. Consequently, subsequent research must enhance the OvR method, augment noise resilience, investigate more intricate quantum circuits, and create adaptive smart contracts for dynamic threat landscapes.

REFERENCES

- 1 Anita, N., Vijayalakshmi, M., and Shalinie, S. M. Proof-of-Improved-Participation: A New Consensus Protocol for Blockchain Technology. *Computer Systems Science and Engineering*, 44(3), 2007–2018 (2023).
- 2 Bellante, A., Fioravanti, T., Carminati, M., Zanero, S., and Luongo, A. Evaluating the potential of quantum machine learning in cybersecurity: A case-study on PCA-based intrusion detection systems. *Computers & Security*, 104341 (2025).
- 3 Du, Y., Wang, X., Guo, N., Yu, Z., Qian, Y., Zhang, K., Hsieh, M.-H., Rebentrost, P., and Tao, D. Quantum Machine Learning: A Hands-on Tutorial for Machine Learning Practitioners and Researchers. *arXiv:2502.01146 [quant-ph]* (2025).
- 4 Fitzi, M., Gazi, P., Kiayias, A., Russell, A., and Research, I. Proof-of-Stake Blockchain Protocols with Near-Optimal Throughput (2020).
- 5 Kim, H., and Kim, D. Adjusting the Block Interval in PoW Consensus by Block Interval Process Improvement. *Electronics*, 10(17), 2135 (2021).

- 6 Lao, L., Dai, X., Xiao, B., and Guo, S. G-PBFT: A Location-based and Scalable Consensus Protocol for IoT-Blockchain Applications. In 2020 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), 664–673 (2020).
- 7 Lin, Z. Comparative Analysis of Blockchain Consensus Algorithms. In Proceedings of the 2024 2nd International Conference on Image, Algorithms and Artificial Intelligence (ICIAAI 2024), 115, 264–276 (2024).
- 8 Li, A., Wei, X., and He, Z. Robust Proof of Stake: A New Consensus Protocol for Sustainable Blockchain Systems. *Sustainability*, 12(7), 2824 (2020).
- 9 Li, Y., Xia, C., Li, C., Zhao, Y., Chen, C., and Wang, T. HL-DPoS: An Enhanced Anti-Long-Range Attack DPoS Algorithm. *arXiv:2310.15460 [cs]* (2023).
- 10 Narayan, D. G., Arali, N., and Tejas, R. DPoSEB: Delegated Proof of Stake with Exponential Backoff Consensus Algorithm for Ethereum Blockchain. *Computer Science Journal of Moldova*, 32(2(95)), 262–288 (2024).
- 11 Naz, M. T., Elmedany, W., and Ali, M. Securing SCADA systems in smart grids with IoT integration: A Self-Defensive Post-Quantum Blockchain Architecture. *Internet of Things*, 28, 101381 (2024).
- 12 Neu, J., Sridhar, S., Yang, L., Tse, D., and Alizadeh, M. Longest Chain Consensus Under Bandwidth Constraint. *arXiv:2111.12332 [cs]* (2022).
- 13 Pérez-Salinas, A., Cervera-Lierta, A., Gil-Fuster, E., and Latorre, J. I. Data re-uploading for a universal quantum classifier. *Quantum*, 4, 226 (2020).
- 14 Qu, Z., Zhang, Z., Liu, B., Tiwari, P., Ning, X., and Muhammad, K. Quantum detectable Byzantine agreement for distributed data trust management in blockchain. *Information Sciences*, 637, 118909 (2023).
- 15 Sanda, O., Pavlidis, M., Seraj, S., and Polatidis, N. Long-Range attack detection on permissionless blockchains using Deep Learning. *Expert Systems with Applications*, 218, 119606 (2023).
- 16 Sayeed, S., and Marco-Gisbert, H. Assessing Blockchain Consensus and Security Mechanisms against the 51% Attack. *Applied Sciences*, 9 (9), 1788 (2019).
- 17 Hazari, S. S., and Mahmoud, Q. H. Improving Transaction Speed and Scalability of Blockchain Systems via Parallel Proof of Work. *Future Internet*, 12 (8), 125 (2020).
- 18 Sharma, T., Krishna, C. R., and Bahga, A. A Cost-Efficient Proof-of-Stake-Voting Based Auditable Blockchain e-Voting System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1099 (1), 012038 (2021).
- 19 Siddiqui, S., Srivastava, V., Maheshwari, R., and Gujar, S. QuickSync: A Quickly Synchronizing PoS-Based Blockchain Protocol. *arXiv:2005.03564 [cs]* (2023).
- 20 Sun, Y., Yan, B., Yao, Y., and Yu, J. DT-DPoS: A Delegated Proof of Stake Consensus Algorithm with Dynamic Trust. *Procedia Computer Science*, 187, 371–376 (2021).
- 21 Tang, S., Wang, Z., Jiang, J., Ge, S., and Tan, G. Improved PBFT algorithm for high-frequency trading scenarios of alliance blockchain. *Scientific Reports*, 12 (1), 4426 (2022).
- 22 Upadhyay, S., and Ghosh, S. Quantum Quandaries: Unraveling Encoding Vulnerabilities in Quantum Neural Networks. *arXiv:2502.01486 [quant-ph]* (2025).
- 23 Wang, B., Li, Z., and Li, H. Hybrid Consensus Algorithm Based on Modified Proof-of-Probability and DPoS. *Future Internet*, 12(8), 122 (2020).
- 24 Wang, Z., Li, J., Liu, A., Ota, K., Dong, M., and Chen, X. RQPoS: A random quantum PoA Consensus Mechanism in Blockchain Based on Quantum Methods (2024).
- 25 Weng, C.-X., Gao, R.-Q., Bao, Y., Li, B.-H., Liu, W.-B., Xie, Y.-M., Lu, Y.-S., Yin, H.-L., and Chen, Z.-B. Beating the fault-tolerance bound and security loopholes for Byzantine agreement with a quantum solution. *Research*, 6, 0272 (2023).
- 26 Wu, Y., Song, P., and Wang, F. Hybrid Consensus Algorithm Optimization: A Mathematical Method Based on POS and PBFT and Its Application in Blockchain. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–13 (2020).
- 27 Xiao, J., Luo, T., Li, C., Zhou, J., and Li, Z. CE-PBFT: A high availability consensus algorithm for large-scale consortium blockchain. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 36 (2), 101957 (2024).
- 28 Zhang, Y., Wang, W., and Shi, F. Reputation-based Raft-PoS Layered Consensus Protocol Converging UAV Network (2024).
- 29 PoW-BC: A PoW Consensus Protocol Based on Block Compression. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 15 (4) (2021).

^{1*}Сабешулы И.,

докторант, ORCID ID: 0000-0002-9691-7993,

*e-mail: ilias.sabeshuly@gmail.com

¹Ақжалова Ә.

профессор, PhD, ORCID ID: 0000-0002-1141-7595,

e-mail: a.akzhalova@kbtu.kz

²Sadok Ben Yahia,

профессор, PhD, ORCID ID: 0000-0001-8939-8948,

e-mail: say@mmmi.sdu.dk

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан²Оңтүстік Дания университеті, Сённерборг қ., Дания**КВАНТТЫҚ-КҮШЕЙТІЛГЕН БЛОКЧЕЙН ҚАУІПСІЗДІГІ:
ЖЕЛІЛІК ШАБУЫЛДАРДЫ АНЫҚТАУМЕН КВАНТТЫҚ
ЕСЕПТЕУЛЕРДІ БІРІКТІРУ****Аңдатпа**

Бұл мақалада блокчейн технологиясы мен кванттық-күшейтілген аномалияларды анықтауды біріктіретін қауіпсіздік жүйесі сипатталады. Біз қауіпсіздік оқиғаларының өзгермейтін жазбасын жасау үшін блокчейнді, ал расталған қауіп-қатерлерге автоматты түрде жауап беру үшін смарт-келісімшарттарды пайдалануды ұсынамыз. Вариациялық кванттық схема (VQC) біздің жүйеміздің гибриді кванттық-классикалық моделінің негізі. VQC ақпаратты классикалық деректерді кванттық күйлерге айналдыру, күрделі тәуелділіктерді модельдеу үшін параметрленген гейттерді қолдану және нәтижені жіктеу үшін өлшеу арқылы өңдейді. Біз Botnet, Brute Force және порттарды сканерлеу сияқты желілік шабуылдарды анықтау үшін «Біреуі бәріне қарсы» (OvR) әдісін қолданамыз. Біз оның өнімділігін идеалды (шусыз) және модельденген шулы кванттық орталарда тексердік. Модельдің дәлдігі шусыз ортада 93%-ды құрады және шулы ортада 92%-ға дейін ғана төмендеді, бұл оның тұрақтылығын көрсетеді. Біз маңызды ымыраны анықтадық: OvR әдісі тиімді, бірақ үлкен есептеуіш шығындарды қажет етеді. Бұл болашақтағы зерттеулерді кванттық көпкласты жіктеудің тиімдірек жүйелерін құруға бағыттау керектігін көрсетеді.

Тірек сөздер: вариациялық кванттық схема (VQC), желілік аномалиялар, гибриді кванттық-классикалық архитектура, көп класты жіктеу.

^{1*}Сабешулы И.

докторант, ORCID ID: 0000-0002-9691-7993,

*e-mail: ilias.sabeshuly@gmail.com

¹Ақжалова А.,

профессор, PhD, ORCID ID: 0000-0002-1141-7595,

e-mail: a.akzhalova@kbtu.kz

²Sadok Ben Yahia,

профессор, PhD, ORCID ID: 0000-0001-8939-8948,

e-mail: say@mmmi.sdu.dk

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан²Университет Южной Дании, г. Сённерборг, Дания**КВАНТОВО-УСИЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ БЛОКЧЕЙНА:
ИНТЕГРАЦИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ
С ОБНАРУЖЕНИЕМ СЕТЕВЫХ АТАК****Аннотация**

В данной статье описывается система безопасности, которая объединяет технологию блокчейн и квантово-усиленное обнаружение аномалий. Мы предлагаем использовать блокчейн для создания неизменяемой

записи событий безопасности, а смарт-контракты – для автоматического реагирования на подтвержденные угрозы. Вариационная квантовая схема (VQC) лежит в основе гибридной квантово-классической модели нашей системы. VQC обрабатывает информацию путем преобразования классических данных в квантовые состояния, использования параметризованных гейтов для моделирования сложных зависимостей и последующего измерения результата для его классификации. Мы используем метод «Один против всех» (OvR) для обнаружения сетевых атак, таких как Botnet, Brute Force и сканирование портов. Мы протестировали ее производительность как в идеальных (бесшумных), так и в симулированных шумных квантовых средах. Точность модели составила 93% в среде без шума и лишь незначительно снизилась до 92% в шумной среде, что демонстрирует ее устойчивость. Мы выявили существенный компромисс: метод OvR эффективен, но требует значительных вычислительных затрат. Это указывает на то, что последующие усилия должны быть сосредоточены на создании более эффективных систем квантовой многоклассовой классификации.

Ключевые слова: вариационная квантовая схема (VQC), сетевые аномалии, гибридная квантово-классическая архитектура, многоклассовая классификация.

Article submission date: 30.07.2025

UDC 004.896
IRSTI 28.23.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-134-148>

¹**Svambayeva A.S.,**

Master's degree, ORCID ID: 0009-0007-1350-4020,

e-mail: a.svambayeva@kbtu.kz

^{1*}**Zhabagin R.N.,**

student, ORCID ID: 0009-0006-3107-2412,

*e-mail: r_zhabagin@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

AI-BASED SOLUTIONS IN AGRICULTURE: FERTILIZER PREDICTION AND TOMATO DISEASE DETECTION USING MACHINE LEARNING AND COMPUTER VISION

Abstract

This research is aimed at using artificial intelligence to improve agricultural practice in Kazakhstan. It focuses on tomato leaf disease detection and fertilizer optimization. Deep learning models – including GoogleNet (InceptionV3), VGG16, ResNet50, MobileNetV2, and a custom Convolutional Neural Network (CNN) – were evaluated for disease detection. GoogleNet had the highest accuracy of 99.72%, which shows its capability to detect tomato leaf diseases. For the optimization of the fertilizer, different machine learning-based models, namely Decision Trees, K-Nearest Neighbors, CNN, Gradient Boosting Decision Tree, LogitBoost were assessed using various PCA features. The CNN model that used six PCA features achieved the best accuracy at 97.58%. This shows how good features can help in prediction. The results show using AI technologies can significantly increase the agricultural productivity and sustainability of Kazakhstan through precise detection of diseases and optimized use of resources. In the future studies, models should be deployed to the real-time system of agriculture and also should be expanded to more crops and conditions.

Keywords: optimization, computer vision, machine learning, deep learning, convolutional neural networks, agriculture, artificial intelligence, plant disease detection, fertilizer optimization, predictive modeling.

Introduction

Kazakhstan is undergoing transformation in agriculture which is an important element of the economy through technology. Greenhouse automation and precision agriculture, amongst these will enhance productivity, sustainability and resource efficiency. It is essential for greenhouse operators to conduct both plant and water diagnosis for better returns and low losses.

Kazakhstan's agriculture is a top-tier industry that could benefit from AI-based solutions tremendously. For example, the Turkestan region provided 34% of the country's tomato production in 2021 thanks to the ideal combination of warmth, nutrients in the soil and the infrastructure for irrigation. Nonetheless, faced with crop diseases and low resource efficiency, the region—and the country in general—faces problems. Due to those problems, people tried a lot of methods to manage the crops.

This study centers on the developing solution namely fertilizer prediction and tomato disease detection in agriculture using AI along with machine learning and computer vision. The objective of the research is to make use of a dataset, having N, P, and K in the soil, temperature, humidity, pH, and rainfall. Analyzing these factors can help in AI's prediction of the exact dosage of fertilizers to utilize for plants while preventing environmental hazards.

In addition, the research looks at how to detect tomato diseases, which influence tomato yield. The project looks at 10 types of diseases of tomatoes like yellow leaf curl virus and other diseases

along with healthy plants. This study compares various models using CNN (Convolution Neural Networks) with the most popular option being VGG16, ResNet50, MobileNetV2, and EfficientNetB0 to find the most efficient architecture for disease classification.

Kazakhstan has launched the greenhouse industry. In 2021, more than 2500 hectares of greenhouses were registered, including 300 hectares of high-tech complexes. But present-day greenhouse systems are labor-intensive for monitoring and intervention. AI tools like fertilizer prediction and automated disease diagnosis can greatly boost greenhouse automation. As a result, this allows for timely intervention and reduction of labor work.

The current study presents AI-powered insights for the management of resources and plant health with a view to furthering the greenhouse automation system development. Solutions which will best address problems in agriculture on one hand and solutions which will assist in sustainable agriculture in Kazakhstan on the other hand are proposed.

Machine learning and deep learning methods have made great strides in detecting and classifying plant diseases, particularly tomato plant diseases. Different methods have been explored by various researchers to obtain a disease detection system effectiveness and capability.

An innovative approach employing the Random Forest algorithm was explored by O. Rama Devi et al. fertilizer prediction is 99.27% based on the environment, soil and plant conditions. The study revealed that Random Forest outperforms the K-Nearest Neighbors model (75%), Decision trees (83%) and Support Vector Regression (88%) among other models. Even though the outcomes of the study were reliable but depending on a specific dataset from Kaggle will require it to be more generalized for data [1]. S. Vaishnavi et.al., in their dependency analysis of soil and environmental factors leading to fertilizer recommendations considered nitrogen, phosphorus, potassium, humidity, and rain and more. A comparison of machine learning algorithms like SVM, Random Forest, Decision Tree and Naïve. Their SVM achieved the highest accuracy of 97% [2].

Md Shahid Ali et al. performed an optimization with the AODE algorithm, which combined agriculture datasets that led to crop yield predictions and customized fertilizer recommendations. The objective of Precision Agriculture is to improve the different resource allocation and crop management strategies. According to the report, the level of accuracy of the model is 76.36%. The study gave us new knowledge about using machine learning in farms. But it also used certain datasets and therefore has limited generalization to other crops and farming conditions [3].

Recently, deep learning techniques have made the work more accurate and efficient. A deep learning model was proposed by Mohanty et al. using AlexNet and GoogleNet architectures. The GoogleNet attained accuracy of 99.35%. Although it was quick to classify, the model took a long time to train [4]. In a similar way, Sladojevic et al, used a Convolutional Neural Network (CNN), obtaining a classification accuracy of 96.3%, although fine-tuning of the model was needed [5].

Brahimi et al, achieved a significant 99.18% accuracy through CNN-based architectures. Even though CNN's ability to extract features automatically was efficient, it still had a computational cost [6]. Fuentes et al, used Faster R-CNN with VGG-16 for object detection techniques to improve accuracy and reduce false positives during training [7].

Durmus et al, assessed SqueezeNet and AlexNet in a lightweight model, which found AlexNet giving a better accuracy rate of 95.65%. SqueezeNet was computationally efficient but worked poorly with small batch sizes. Also, Rangarajan et al, used a pretrained deep learning model and achieved 97.49% accuracy with AlexNet with minimum execution time [8].

Recent studies have also focused on enhancement with optimization and augmentation. Zhang et al, explored using ResNet with stochastic gradient descent (SGD), and his achieved accuracy was 97.28%. They focused on computational efficiency through fine-tuning [9]. At the same time, Jiang et al, established the INAR-SSD model that achieves high real-time accuracy but less explored algorithm applications [10].

To overcome the issues with overfitting, Adhikari et al, used data augmentation in their CNN-based model and achieved an accuracy of 89% overall. Results showed that transfer learning can increase the classification results [11].

To sum up, the deep learning models having CNN architecture, namely VGGNet, ResNet, and AlexNet, are among the most noteworthy methods for tomato disease detection with accuracies over 99%. Yet computational complexity, training time, and real-time optimization are all critical issues. In the future, studies should involve lightweight models, advanced feature extraction, and transfer learning for high performance in large-scale agriculture.

Devi Priya and others invented ENSEMBLED CROPIFY, a scheme that recommends the crop, gives fertilizer suggestions, and detects leaf diseases. This system employs various machine learning models for crop recommendation, achieving impressive accuracies, as detailed in Table 9: Random Forest (99.67%), Naive Bayes (99.45%), and SVM (97.36%). For leaf disease classification, the system uses ResNet architecture. This combined method ensures exact suggestions and practical insights, resulting in increased agricultural productivity [12].

The problem statement of the research is formulated as follows: it is necessary to evaluate and analyze the performance of various machine learning and deep learning architectures to accurately identify and categorize diseases in tomato plants while also incorporating recommendations for crop selection and fertilizer usage. The study aims to develop and optimize models providing the most accuracy, precision, recall, and F1 score. The study aims to develop a reliable, efficient, and holistic solution for diagnosis of diseases and management of agricultural affairs by comparing different architectures and optimizing their parameters.

Materials and methods

Datasets

Tomato Disease Detection Dataset

In this research, the data set for the detection of tomato diseases contains 14529 images (256 x 256 pixels). These images are categorized into 10 classes based on tomato diseases and healthy leaves. All classes are kept in individual folders to make it easier to classify them. A serious problem associated with this dataset is that some classes have much more images while others are fewer. For example, one class has 4,286 images and another class contains only 299 images. If left uncorrected, this imbalance can cause the model to train poorly and lead to bias.

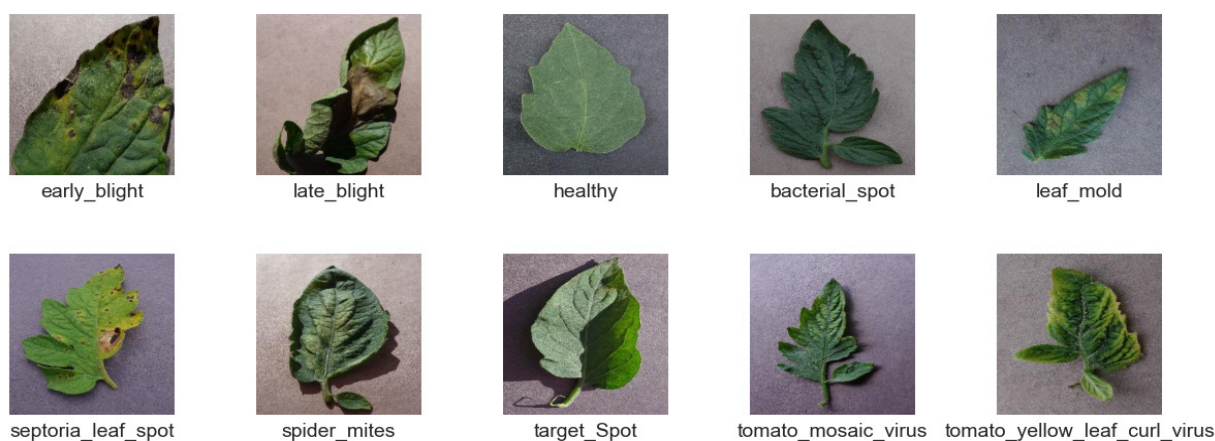


Figure 1 – Sample tomato leaf images from the dataset, showing healthy and diseased classes

The image shows examples of the tomato leaf dataset used for this research. It shows what each class looks like. The images show symptoms of many diseases, as well as healthy leaves, which can be used to develop models for image-based disease detection.

Fertilizer Prediction Dataset

The fertilizer prediction dataset contains seven key features crucial for determining crop health and growth. Their features are nitrogen, phosphorus and potassium content of the soil (kg/ha), along with environmental factors temperature (c), humidity (%), soil pH (0 to 14), and rainfall (mm). Each data point has been labelled with the crop most suitable for given conditions. This dataset is organized and designed for supervised learning tasks such as classification or regression.

The Figure of the table below shows some data of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), temperature, humidity, soil pH and rainfall along with the crop.

	Crop_recommendation							
1	N	P	K	temperature	humidity	ph	rainfall	label
2	90	42	43	20.87974371	82.00274423	6.502985292000001	202.9355362	rice
3	85	58	41	21.77046169	80.31964408	7.038096361	226.6555374	rice
4	60	55	44	23.00445915	82.3207629	7.840207144	263.9642476	rice
5	74	35	40	26.49109635	80.15836264	6.980400905	242.8640342	rice
6	78	42	42	20.13017482	81.60487287	7.628472891	262.7173405	rice
7	69	37	42	23.05804872	83.37011772	7.073453503	251.0549998	rice
8	69	55	38	22.70883798	82.63941394	5.70080568	271.3248604	rice
9	94	53	40	20.27774362	82.89408619	5.718627177999999	241.9741949	rice
10	89	54	38	24.51588066	83.53521629999999	6.685346424	230.4462359	rice
11	68	58	38	23.22397386	83.03322691	6.336253525	221.2091958	rice
12	91	53	40	26.52723513	81.41753846	5.386167788	264.6148697	rice
13	90	46	42	23.97898217	81.45061596	7.50283396	250.0832336	rice
14	78	58	44	26.80079604	80.88684822	5.108681786	284.4364567	rice
15	93	56	36	24.01497622	82.05687182	6.98435366	185.2773389	rice
16	94	50	37	25.66585205	80.66385045	6.94801983	209.5869708	rice
17	60	48	39	24.28209415	80.30025587	7.0422990689999985	231.0863347	rice

Figure 2 – Feature distributions in the fertilizer prediction dataset

Every row is a complete profile that is used to assess what crop would be most suitable under given environmental conditions.

Preprocessing Steps

Tomato Disease Detection Dataset Preprocessing

For each deep learning architecture (GoogleNet, VGG-Net, ResNet, MobileNet, Custom CNN), two models were trained: one with data augmentation and the other without. To overcome the unequal representation in the dataset, the augmented models used sizes of rotating flipping scaling and cropping to increase representation of underrepresented classes. The inclusion of semantic comprehension tasks contributed to a more diverse dataset and helped improve the robustness of the models. We changed the size of all images to 256×256 pixels. Similarly, we changed the pixel values from $[0, 256]$ to $[0, 1]$; to help faster convergence while training.

The training, validation, and test sets of the dataset adopted a stratified sampling approach. There was a proper distribution of classes in the train, validation and test sets. While training, learning rate, batch size, epoch, and other parameters were tuned for optimal performance. To further prevent overfitting in CNN architectures and improve generalization, overfitting dropout, and batch normalization techniques were integrated.

The image shows the different conditions of tomato leaves from the dataset. The states differ based on disease and healthy appearance. The pictures show how producing data was done by using rotating, flipping, scaling, and cropping in the data set. With the help of these manipulations robustness of the models is increased as they are provided with more varied examples of each class. The models learn more robust representations of each class.

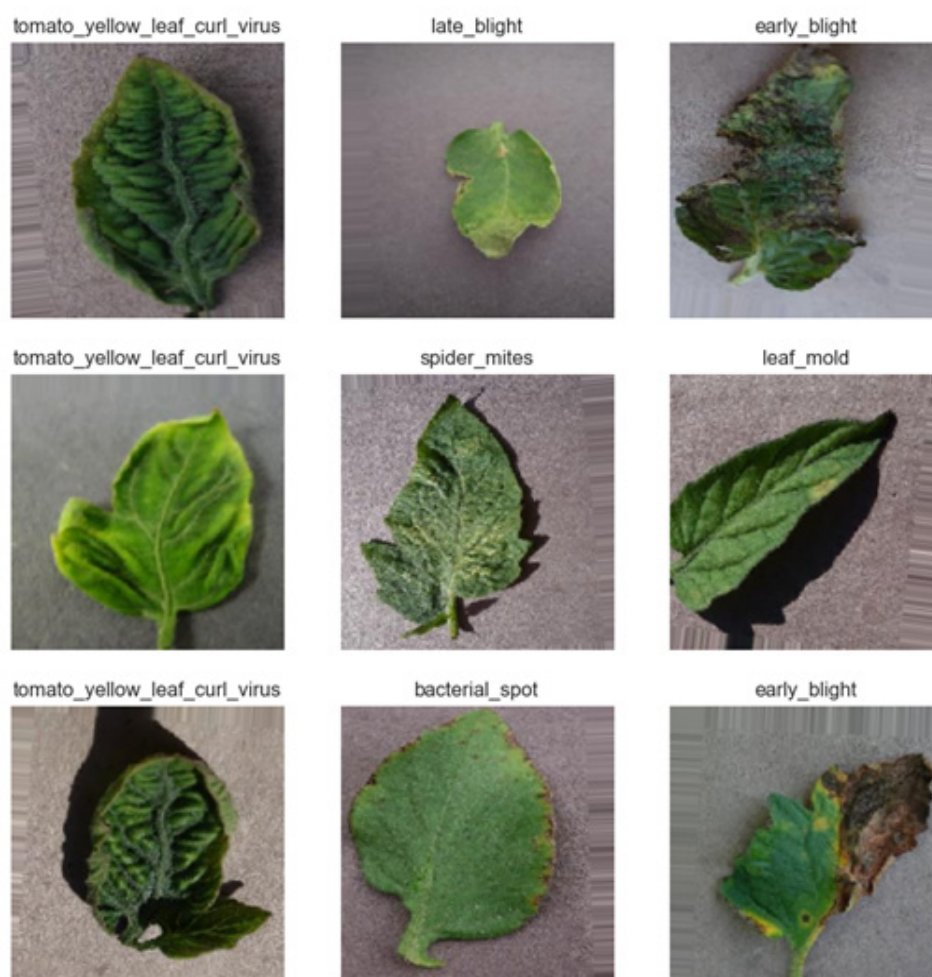


Figure 3 – Examples of Data Augmentation Techniques on Tomato Leaf Images

Fertilizer Prediction Dataset Preprocessing

The fertilizer prediction dataset underwent normalization to scale numerical features uniformly, improving model performance and preventing bias due to differing feature ranges. Principal Component Analysis (PCA) was used to reduce dimensions by retaining the most important features. Many experiments were done with combinations of six, five or four features (out of total seven) to identify best set of features which gives the best result in terms of accuracy, precision, recall and F1-score. We split the dataset into the training, validation, and testing subset to check the robustness of the models.

Evaluation Metrics

All models are evaluated using four metrics which include accuracy, precision, recall, and F1 score. The accuracy is the measure of how many classifiers were correct with answer predictions. Mathematically, the accuracy is defined as the sum of true positives and true negatives divided by total instances. Precision measures the proportion of positive samples accurately predicted from all samples predicted as positive and indicates the model's ability to reject negative samples. Recall, which is also called sensitivity, is the percentage of positives that were predicted out of the total actual positives. It assesses whether the model recognizes all relevant instances. F1-score balances precision and recall by calculating their harmonic mean, allowing for a more complete measure. The metrics for each model on the test dataset were calculated so that comparisons between architectures and machine learning methods are consistent and fair. We used the results to find the best configurations for the tomato disease detection and fertilizer prediction tasks.

$$Accuracy = \frac{\text{True Positives} + \text{True Negatives}}{\text{Total Number of Samples}}$$

$$Precision = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Positives}}$$

$$Recall = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Negatives}}$$

$$F1 \text{ Score} = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

Evaluation of Deep Learning Architectures for Tomato Disease Detection

Today, specially designed computer vision architectures help feature extraction, classification, and optimization make the computer vision systems more reliable and robust. This study analysed the connectivity and performance of GoogLeNet, VGG, ResNet, MobileNet, and Custom Convolutional Neural Network Architecture. Each architecture differs in design philosophy, computational complexity, and adaptability, making their evaluation essential for industrial applications.

GoogLeNet

GoogLeNet employs inception modules that concatenate multiple convolutional filters (1x1, 3x3, 5x5) to capture multi-scale spatial information. Having 22 layers and less parameter in comparison to VGG makes it perform well at reasonable cost. This structure is excellent for relying on high-quality error-free operations without too much hardware. Figure 1 shows GoogLeNet's design.

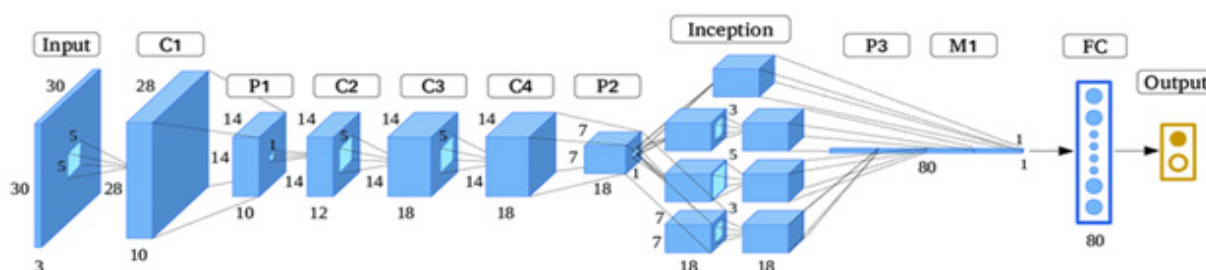


Figure 4 – GoogLeNet Architecture

This shows the GoogLeNet architecture which has inception modules which can deal with multi-scale spatial information at low parameters. This architecture can perform complex image recognition tasks while using less computational resources, making it useful for environments with low hardware capabilities. The image shows how different convolutional filters are stacked and combined in GoogLeNet which allows it to have higher accuracy with less computation.

VGG-Net

VGG uses a series of small (3x3) convolution filters and pooling layers sequentially to construct a deep network having an architecture of 16 or 19 layers. Even though it achieves high accuracy, it needs a lot of computations because it has a high number of parameters. This architecture is useful for feature extraction because it learns features in a hierarchical way. The VGG architecture is shown in Figure 2.

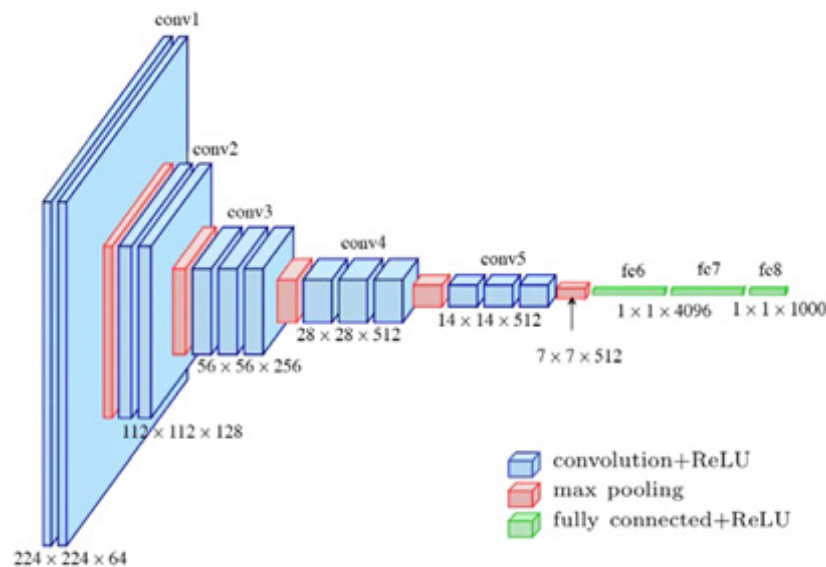


Figure 5 – VGG-Net Architecture

This figure displays the detailed structure of the VGG architecture, characterized by its deep layers of small 3x3 convolutional filters followed by max pooling layers. The image shows that as the more layers are used, the less spatial dimensions are used and more depth is used to extract and learn features. VGG makes use of high numbers of convolutional layers stacked on top of each other to get high accuracy. This accuracy, however, comes at the cost of high computation due to the high number of parameters.

ResNet

ResNet solves the vanishing gradient problem with residual connections that allow gradients to flow more readily through the network. Variants of ResNet-50, ResNet-101, and ResNet-152 allow scalability to deeper networks. ResNet performs excellently in cases where deep models are required, and it trains reliably and accurately. The structure of ResNet is shown in Figure 6

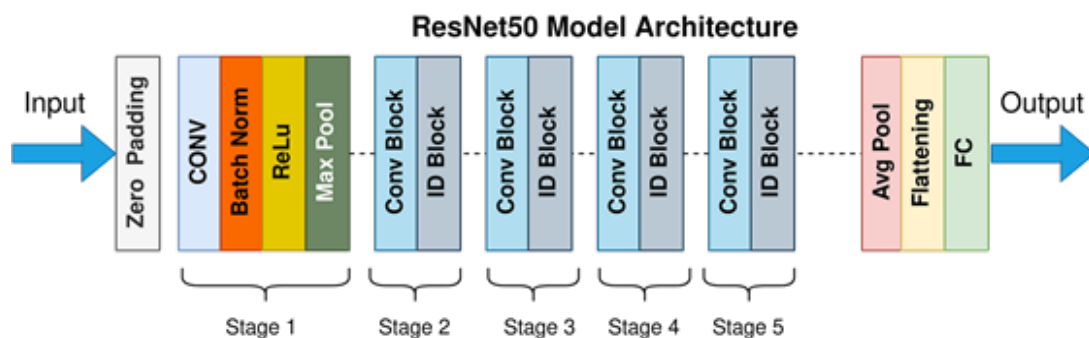


Figure 6 – ResNet Architecture

This diagram shows the architecture of ResNet and how it uses residual connections. These connections serve as transitions between layers, allowing gradients to skip over layers and flow to earlier layers, thus solving the vanishing gradient problem. The sequence of layers that make the core of ResNet include convolutional blocks and identity blocks. It trains the very deep networks. The ResNet architecture is capable of high accuracy, and training, offering high accuracy and training on deep learning on a variety of tasks.

MobileNet

MobileNet uses depthwise separable convolutions that drastically lower the cost but provide a high end performance. This is particularly useful for mobile embedded systems. This allows for deploying a neural network on a device with limited computing power—like a smartphone, IoT, or an embedded device.

MobileNet type lightweight networks can run self-sufficient tasks that require real-time decision making. Examples of use: real-time object detection, image classification, face recognition and edge computing. MobileNet is very powerful as it can compute quickly and take less power for its computation. MobileNet treads the fine path of efficiency that is speed and power.

MobileNet is a widely used architecture because of its simplicity and modularity. The process of applying depthwise separable convolution can be seen as a factorization of the standard convolution. This factorization includes two streamlined operations, depthwise convolution, and pointwise convolution. The former does spatial filtering and the latter combines features across channels.

By using this method the number of trainable parameters and the computing complexity has decreased considerably while still giving comparable performance to conventional architectures.

As we can see in figure 7, MobileNets are made up of depthwise separable convolutions. These operations have a lightweight architecture for efficient processing.

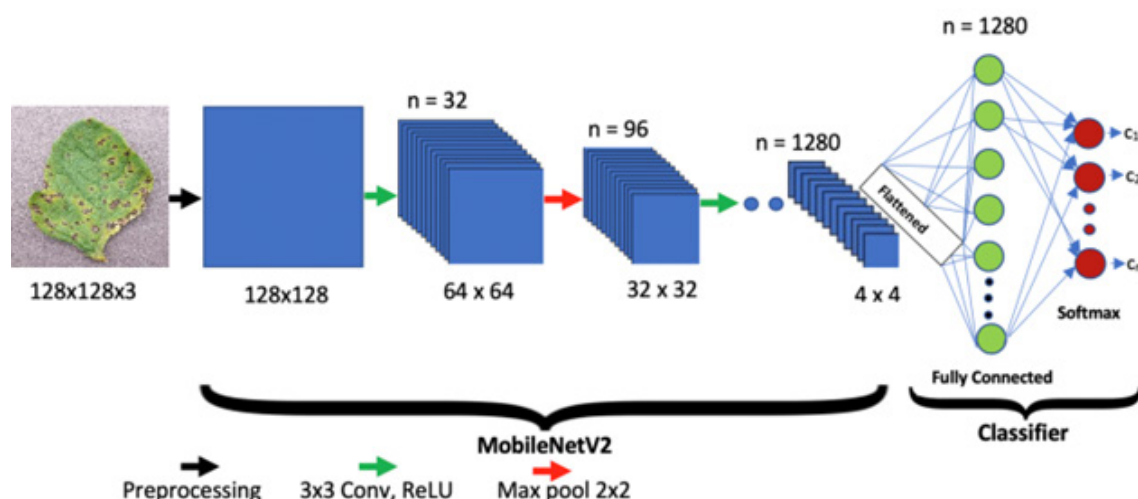


Figure 7 – MobileNet Architecture

MobileNet architecture is shown in this figure which is developed for better efficiency. It shows a use of depthwise separable convolutions which reduces the time complexity significantly while maintain efficiency. The flow starts from preprocessing and passes through various convolutional and pooling layers, finally reaching the full connection layer for classification. MobileNet's blocks have been optimized to make the model work with minimum resources making it a good option for speed and low power usage.

Custom Convolutional Neural Network

For this study, a custom-wise convolutional neural network (CNN) was developed which satisfied the requirements of the study. The design was carefully made to balance the model complexity and computation efficiency while ensuring robust performance and keeping the model light enough. The structure of the network involves four convolutional layers, which are layers that extract features, and is followed by max-pooling layers to reduce overfitting.

The model will make use of 32 filters in the first convoluted layer. The model will leverage this to get patterns and images from the input outlined image. In later layers, the number of filters in each layer gradually increases to 64. The layers learn more complex and abstract features as the layers

get deeper. By using max-pooling after every convolution block, high spatial information is retained while the computational cost is reduced.

To enhance generalization and reduce overfitting, we utilize a rescaling layer to preprocess the input images. This layer scales pixel values to the range $[0, 1]$. normalization helps in numerical stability and speeding up training process. Near the network's conclusion a dense layer having 64 neurons and ReLU activation gets high-level representations. The output layer contains 10 neurons having a softmax activation function. The neural network is therefore suitable for the multi-class classification problem.

The model uses the Adam optimizer and a sparse categorical cross-entropy loss function to optimize its performance and training. The training of the model gets stopped in case the model overfits. In this way, it performs better on unseen data.

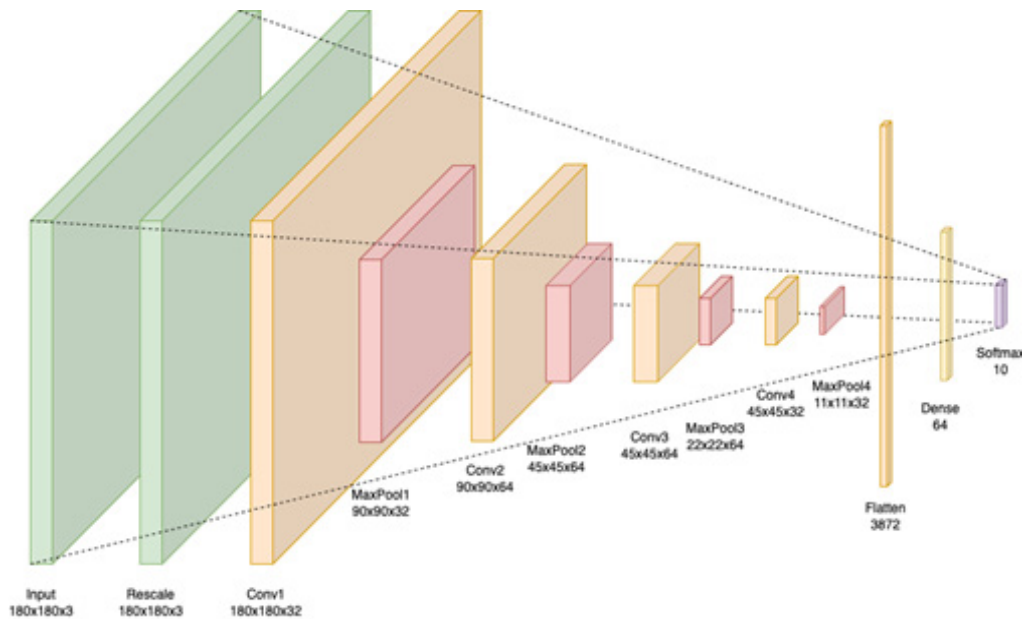


Figure 8 – Architecture of the Custom CNN

Figure 8 shows how the layers of the Custom CNN are arranged. While training, early stopping was employed that halts the training once the model has started to overfit.

This architecture creates a balance between depth and computational cost. Thus, it is very flexible for any industrial application. Such as, defect detection in production lines. It effectively extracts important features without being too complex.

Analysis of Machine Learning Models for Fertilizer Prediction

The fertilizer prediction task was approached using various machine learning techniques, each tailored to analyze the dataset's features and provide accurate predictions. The following sections summarize how we used different models and what they revealed.

K-Nearest Neighbors

K-Nearest Neighbors is a simple, instance-based learning algorithm that classifies a data point based on the classes of its nearest neighbors. KNN identifies the k neighbour points in the feature space and assigns the most common class among the neighbours which is to be assigned to the new point. The algorithm is non-parametric. It makes no assumptions about the data's distribution. It works best when the decision boundary is not well defined. The hyperparameter k is a crucial component that can impact a model's performance. When larger values of k are used, a smoother decision boundary is produced. Conversely, smaller values of k produce more flexible decision boundaries.

In this research, using KNN the crop suitability was predicted by using soil nutrients, temperature, humidity and pH features. The experimental determination of k was made to optimize the model.

Decision Tree

Decision Trees are tree-type classifiers. Here, each internal node is a feature (or attribute), each branch is a decision rule and each leaf node is an outcome (class label). To develop the tree, we continually split the data according to the feature that generates maximum information gain, or reduction in Gini impurity. Trees made from the Decision Tree model are easy to interpret as the tree can be visualized easily and traced accordingly to understand the decision made for any data points.

For our purpose, we applied Decision Trees to predict the type of crops a farmer should grow relative to soil nutrients and environment. The tree classifies the best crop for a given set of conditions by splitting on features like nitrogen levels or rainfall.

Convolutional Neural Network

While CNNs generally function on image data, this tabular dataset was experimented with by converting its features to be arranged in a matrix. By employing such a method, CNNs managed to benefit from their structural arrangement for gathering features. Even though CNNs applied a new application, tabular-specific models still did better.

K-Means Clustering

The K-means algorithm was used as an unsupervised learning technique to find hidden patterns. K-Means helped in discovering the potential relationship between features and distribution of the cluster by clustering the similar data points together. Nonetheless, it needed precise tuning of number of clusters (k) to fit with the structure of the data.

Gradient Boosted Decision Trees

Gradient Boosted Decision Trees make a strong predictive model by combining a number of weak decision tree learners. There was a high performance of GBDT after minimizing errors and optimizing weights on fertilizer dataset. It handles feature interactions and imbalanced data really well and therefore, the best out of all other models tested.

Gradient Descent Applied to Logistic Regression

Logistic regression model basically computes the logits that are the computed value the value is obtained by multiplying the input features with weights and adding bias. The softmax function translates these logits into probabilities in deep learning algorithms. The softmax function takes the raw scores and normalize those to obtain probabilities of each class. The softmax function is used for multi-class classification. For multi-class classification, the softmax function is defined as:

$$P(y = k | x) = \frac{\exp(\text{logit}_k)}{\sum_{k=1}^K \exp(\text{logit}_k)}$$

where logit_k is the raw score for class k , and $P(y = k | x)$ is the predicted probability for class k .

Gradient descent works by adjusting the model's parameters repeatedly to minimize the difference between predicted probabilities and true labels. We determine the error by subtracting the true label (one-hot encoded) from the predicted probabilities. After this, we compute the gradients of the weights and bias by evaluating the cost function cross entropy loss's derivatives. The cost function helps measure how accurate our model is. The gradients show how much each parameter contributes to the error, so to reduce the error the change in each parameter needs to occur in the negative gradient direction.

At each epoch of the gradient descent process, the weights and bias are updated using the calculated gradients. The update rule for the weights and bias is as follows:

$$\begin{aligned} \text{weights} &= \text{weights} - \eta \cdot \nabla_{\text{weights}} \\ \text{bias} &= \text{bias} - \eta \cdot \nabla_{\text{bias}} \end{aligned}$$

where learning rate is represented by η , which is a hyperparameter that governs the step size of the learning algorithm. The process is done for a fixed number of epochs until there is no improvement in the accuracy of the model.

Results

In this research, performance of various deep learning models for detecting tomato leaf diseases was evaluated. The evaluated models are GoogleNet (Inception V3), VGG16, ResNet50, MobileNetV2, and Custom CNN. Each model was trained using a specific learning rate. Subsequently, the metrics were calculated on their performance. These metrics include accuracy, precision, recall and F1 score.

The results are provided in the Table 1.

Table 1 – Deep Learning Model Metrics for Tomato Leaf Disease

Model	Learning Rate	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
GoogleNet(InceptionV3)	0.00001	0.9972	0.9972	0.9972	0.9972
VGG16	0.001	0.9649	0.9654	0.9649	0.9650
ResNet50	0.001	0.9833	0.9833	0.9833	0.9833
MobileNetV2	0.001	0.9271	0.9269	0.9271	0.9263
Custom CNN	0.001	0.9588	0.9589	0.9588	0.9586

The results show that GoogleNet (InceptionV3) achieved the highest accuracy at 99.72% and ResNet50 at 98.33%. The Custom CNN, as well as VGG16, performed well with accuracies of 95.88% and 96.49% after fine-tuning the model. To me MobileNetV2 had the least accuracy out of these models. It is 92.71%. Results suggest a deeper architecture such as GoogleNet or ResNet50 may work better for tomato leaf disease detection tasks.

Using these effective models in farming could help find and manage tomato leaf diseases quicker. This could improve growing production and lower losses. Future research may focus on implementing these models in real-time systems and use in precision farming.

I also looked at how machine learning models can help use fertilizers better. I also used PCA to reduce feature dimensions. Models like Decision Tree (DT), K Nearest Neighbors (KNN), Convolutional Neural Network (CNN), Gradient Boosting Decision Tree (GBDT) and LogitBoost(Logistic Regression with Gradient Descent) were trained with different numbers of PCA features. Table 2 shows how well they performed.

Table 2 – Model Performance with PCA Features for Fertilizer Optimization

Model	PCA features	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
DT	3	0.6833	0.6920	0.6892	0.6826
DT	4	0.8303	0.8358	0.8341	0.8319
DT	5	0.8394	0.8415	0.8379	0.8377
DT	6	0.8833	0.8902	0.8888	0.8863
KNN	3	0.7470	0.7476	0.7470	0.7429
KNN	4	0.8848	0.8924	0.8848	0.8842
KNN	5	0.9273	0.9340	0.9273	0.9266
KNN	6	0.9636	0.9670	0.9636	0.9631
CNN	3	0.7470	0.7556	0.7470	0.7478
CNN	4	0.8864	0.8873	0.8864	0.8853

Continuation of the Table 2

Model	PCA features	Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
CNN	5	0.9333	0.9353	0.9333	0.9332
CNN	6	0.9758	0.9765	0.9758	0.9758
GBDT	4	0.8076	0.8242	0.8076	0.8046
GBDT	5	0.8500	0.8580	0.8500	0.8493
GBDT	6	0.8803	0.8852	0.8803	0.8789
GBDT	7	0.9379	0.9405	0.9379	0.9384
LogitBoost	5	0.7985	0.8174	0.7985	0.7838
LogitBoost	6	0.8803	0.8852	0.8803	0.8789
LogitBoost	7	0.9015	0.9090	0.9015	0.8995

Fertilizer Optimization, model performance generally improved with the increase in number of PCA features. The accuracy of Decision Tree model improved from 68.33% to 88.33% with the three PCA features and the six PCA features respectively. Likewise, as the PCA features increased from three to six the accuracy of K-Nearest Neighbors model increased from 74.70% to 96.36%. The Convolutional Neural Network achieved an accuracy of 97.58% with six PCA features. The performance of Gradient Boosting Decision Trees and LogitBoost also improved as more PCA features were used.

The findings suggest that using the best amount of PCA features can greatly improve the prediction performance of many machine learning models in fertilizer optimization. But the number of features should be balanced to avoid overfitting. Overfitting is especially true in high variance models.

In summary, using deep learning for detecting tomato leaf disease and using the PCA technique with a machine learning model for fertilizer optimization will be useful for precision agriculture in Kazakhstan. By using these technologies experts say more efficient utilization of resources, timely disease control, and ultimately increased crop yield which may boost the economy of the area.

Discussion

The integration of AI-driven solutions in agriculture presents significant opportunities for enhancing productivity and sustainability, particularly in regions like Kazakhstan. This research looked at how well different deep learning models could detect tomato leaf diseases and machine learning models that used Principal Component Analysis (PCA) features could optimize fertilizers.

GoogleNet (InceptionV3) and ResNet50 models were found to be among the best-performing methods in tomato leaf disease detection with the accuracy of 99.72% and 98.33%. The previous studies that show how deep convolutional neural networks are effective in plant disease identification have found similar results. The excellent precision and recall values further demonstrate the robustness of these models in classifying tomato leaf diseases accurately.

To improve fertilizer, using the right number of PCA features helped make a good prediction of machine learning models. The Convolutional Neural Network attained an accuracy score of 97.58% with six PCA features. This indicates that using fewer but relevant features help improve the outcome of the task. This method conforms with research that highlights the importance of feature tuning to improve crop yield prediction models.

Conclusion

This study shows how AI solutions can change farming in Kazakhstan to become more precise. GoogleNet(InceptionV3) and ResNet50 have proved to be 99.72% and 98.33% accurate, respectively, in the assessment of tomato leaves diseases by using deep learning models. Such high precision allows early disease detection, which allows for interventions that will significantly decrease crop damage and improve quality.

Using PCA features has improved the performance of machine learning models for fertilizer optimization even more than basic data features do. The Convolutional Neural Network had an accuracy of 97.58% with six PCA features. Thus, dimensionality reduction can enhance model's efficacy significantly.

It helps to apply fertilizer correctly, thereby facilitating sustainable farming and reducing environmental impacts with limited resources.

Using these AI technology trend is align with world trend in smart agriculture data-driven decisions sustainable crop management. With such models doing well in Kazakhstan's agricultural landscape, they promise better productivity besides making Kazakhstan a leader in innovative sorghum farming solutions.

In the future, models should be deployed for the practical use in real-life agricultural sites, which can be studied in varying environments and diverse types of crops. Moreover, making dataset larger so it covers more diseases and other crops will increase the strength and universality of the models. Working together with farming professionals who live in Kazakhstan will help make sure that the AI solutions are exactly what the country needs.

To sum up, ai will be important in enhancing food and economic security in Kazakhstan if used in agriculture. Agriculture industry without new and advanced technology cannot move forward. New technology adoption is a must. Only with new technology will agriculture more efficient and productive to meet the growing needs of society.

REFERENCES

- 1 Rama Devi, O., Naga Lakshmi, P., Naga Babu, S., Vinaya Sree Bai, K., Sowmya, and Akansha. Fertilizer Forecasting using Machine Learning. Proceedings of the 2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Lalitpur, Nepal, April 2023. <https://doi.org/10.1109/ICICT57646.2023.10134061>.
- 2 Vaishnavi, S., Shanmugam, N., Kiran, G., and Saraswathi Priyadharshini, A. Dependency analysis of various factors and ML models related to Fertilizer Recommendation. Proceedings of the 2023 Third International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC), Jalandhar, India, May 2023. <https://doi.org/10.1109/ICSCCC58608.2023.10176974>.
- 3 Ali, Md S., Rohit, B., Roshith, R., Biradar, V., and Jabbar, M.A. Crop Prediction & Fertilizer Recommendation using AODE Algorithm. Proceedings of the 2024 IEEE 9th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Pune, India, April 2024. <https://doi.org/10.1109/I2CT61223.2024.10543894>.
- 4 Mohanty, S.P., Hughes, D.P., and Salathé, M. Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1419 (2016). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>.
- 5 Sladojevic, S., et al. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016, Article ID 3289801 (2016). <https://doi.org/10.1155/2016/3289801>.
- 6 Brahimi, M., Boukhalfa, K., and Moussaoui, A. Deep learning for tomato diseases: classification and symptoms visualization. *Applied Artificial Intelligence*, 31 (4), 299–315 (2017). <https://doi.org/10.1080/08839514.2017.1315516>.
- 7 Fuentes, A., et al. A robust deep-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition. *Sensors*, 17 (9), 2022 (2017). <https://doi.org/10.3390/s17092022>.

8 Durmuş, H., Güneş, E.O., and Kırıcı, M. Disease detection on the leaves of the tomato plants by using deep learning. Proceedings of the 2017 6th International Conference on Agro-Geoinformatics, Fairfax, VA, USA, 2017. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2017.8047016>.

9 Zhang, Keke, et al. «Can deep learning identify tomato leaf disease?» Advances in Multimedia 2018 (2018). <https://doi.org/10.1155/2018/6710865>.

10 Jiang, P., et al. Real-time detection of apple leaf diseases using deep learning approach based on improved convolutional neural networks. IEEE Access, 7, 59069–59080 (2019). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2914929>.

11 Adhikari, S., et al. Tomato plant diseases detection system using image processing. Proceedings of the 1st KEC Conference on Engineering and Technology, Lalitpur, Nepal, Vol. 1, 2018.

12 Priya, K.D., et al. ENSEMBLED CROPIFY – Crop & Fertilizer Recommender System with Leaf Disease Prediction. Proceedings of the 2023 International Conference on Innovative Data Communication Technologies and Application (ICIDCA), Tirunelveli, India, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICIDCA56705.2023.10100117>.

¹Свамбаева А.С.,

магистр, ORCID ID: 0009-0007-1350-4020,

e-mail: a.svambayeva@kbtu.kz

^{1*}Жабагин Р.Н.,

студент, ORCID ID: 0009-0006-3107-2412,

*e-mail: r_zhabagin@kbtu.kz

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫНДАҒЫ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ ШЕШІМДЕР: МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ЖӘНЕ КОМПЬЮТЕРЛІК КӨРУ АРҚЫЛЫ ТЫҢАЙТҚЫШТАРДЫ БОЛЖАУ ЖӘНЕ ҚЫЗАНАҚ АУРУЛАРЫН АНЫҚТАУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу Қазақстанда ауыл шаруашылығын жетілдіру мақсатында жасанды интеллекттің қолданылуын зерттейді. Негізгі назар екі бағытқа аударылды: қызанақ жапырақтарының ауруларын анықтау және тыңайтқыштарды оңтайландыру. Ауруларды анықтау үшін GoogleNet (InceptionV3), VGG16, ResNet50, MobileNetV2 және арнайы конволюциялық нейрондық желілер (CNN) сияқты терең оқыту модельдері бағаланды. GoogleNet моделі 99,72% дәлдікпен ең жоғары нәтижеге қол жеткізіп, қызанақ жапырақтарының ауруларын анықтауда үздік қабілетін көрсетті. Тыңайтқыштарды оңтайландыруда шешім ағаштары, ең жақын көршілер әдісі (K-Nearest Neighbors), CNN, градиенттік күшейту ағаштары (Gradient Boosting Decision Trees) және LogitBoost сияқты машиналық оқыту модельдері негізгі компоненттерді талдау (PCA) арқылы түрлі ерекшеліктермен тексерілді. Алты PCA ерекшелігі бар CNN моделі 97,58% дәлдікке қол жеткізіп, болжамдық модельдеу үшін ерекшеліктерді оңтайландырудың тиімділігін көрсетті. Бұл нәтижелер жасанды интеллект технологияларын ауыл шаруашылығына интеграциялау Қазақстанда өнімділік пен тұрақтылықты айтарлықтай арттыра алатынын, ауруларды дәл анықтауға және ресурстарды оңтайлы пайдалануға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Болашақ зерттеулер бұл модельдерді нақты ауыл шаруашылығы жағдайларында енгізуге және оларды басқа дақылдар мен экологиялық жағдайларға бейімдеуге бағытталуы тиіс.

Тірек сөздер: оңтайландыру, компьютерлік көру, машиналық оқыту, терең оқыту, конволюциялық нейрондық желілер, ауыл шаруашылығы, жасанды интеллект, өсімдік ауруларын анықтау, тыңайтқыштарды оңтайландыру, болжамдық модельдеу.

¹Свамбаева А.С.,
магистр, ORCID ID: 0009-0007-1350-4020,
e-mail: a.svambayeva@kbtu.kz

^{1*}Zhabagin R.N.,
студент, ORCID ID: 0009-0006-3107-2412,
e-mail: r_zhabagin@kbtu.kz

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УДОБРЕНИЙ И ОБНАРУЖЕНИЕ БОЛЕЗНЕЙ ТОМАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация

Это исследование направлено на использование искусственного интеллекта для улучшения сельскохозяйственной практики в Казахстане. Оно сосредоточено на обнаружении болезней листьев томатов и оптимизации удобрений. Модели глубокого обучения, включая GoogleNet (InceptionV3), VGG16, ResNet50, MobileNetV2 и пользовательскую сверточную нейронную сеть (CNN), были оценены для обнаружения болезней. GoogleNet показала самую высокую точность – 99,72%, что показывает ее способность обнаруживать болезни листьев томатов. Для оптимизации удобрения были оценены различные модели на основе машинного обучения, а именно деревья решений, K-ближайшие соседи, CNN, дерево решений Gradient Boosting, LogitBoost с использованием различных функций PCA. Модель CNN, которая использовала шесть функций PCA, достигла наилучшей точности – 97,58%. Это показывает, как хорошие функции могут помочь в прогнозировании. Результаты показывают, что использование технологий ИИ может значительно повысить производительность сельского хозяйства и устойчивость Казахстана за счет точного обнаружения болезней и оптимизированного использования ресурсов. В будущих исследованиях модели следует внедрить в систему сельского хозяйства в режиме реального времени, а также расширить их на большее количество культур и условий.

Ключевые слова: оптимизация, компьютерное зрение, машинное обучение, глубокое обучение, сверточные нейронные сети, сельское хозяйство, искусственный интеллект, обнаружение болезней растений, оптимизация удобрений, предиктивное моделирование.

Article submission date: 28.02.2025

УДК 004.89
МРНТИ 28.23.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-149-160>

¹**Джураев Д.Б.,**
бакалавр, ORCID ID: 0009-0008-5800-9960,
e-mail: doninadirov@mail.ru

^{1*}**Уалиева И.М.,**
к.ф.-м.н., ассоциированный профессор, ORCID ID 0000-0003-3853-8896,
*e-mail: i.ualiyeva@gmail.com

²**Акжалова А.Ж.,**
доктор PhD, профессор, ORCID ID 0000-0002-1141-7595,
e-mail: a.akzhalova@kbtu.kz

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСФОРМЕРОВ И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЗАБОЛЕВАНИЙ РИСА

Аннотация

В данной статье представлен сравнительный анализ современных архитектур нейросетей, сверточных нейронных сетей (CNN) и трансформеров для автоматической диагностики заболеваний листьев риса. В рамках экспериментов были обучены и протестированы модели DenseNet121, ResNet, Vision Transformer (ViT) и MaxViT, после чего проведена их оценка по точности и вычислительной эффективности. Исследование выполнено на основе крупномасштабного датасета, включающего реальные изображения больных и здоровых листьев риса, что делает результаты актуальными для сельскохозяйственной науки и практики. Эксперименты включали оптимизацию гиперпараметров, применение методов аугментации данных, а также использование функций потерь и методов регуляризации с целью повышения обобщающей способности моделей. Для оценки качества использовались метрики точности классификации, F1-мера, а также показатели вычислительной эффективности, такие как время предсказания и объем потребляемых ресурсов. Полученные результаты показали, что модели на основе трансформеров, в частности MaxViT, достигают точности до 94,10%. Это связано с их способностью эффективно моделировать как локальные, так и глобальные признаки изображений за счет механизмов внимания и глубокой контекстуализации. В то же время CNN-архитектуры, такие как DenseNet121 и ResNet, демонстрируют высокую скорость работы и устойчивость в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: глубокое обучение, сверточные нейронные сети, Vision Transformer, MaxViT, диагностика растений, рис, классификация изображений.

Введение

Задача эффективной диагностики такой сельскохозяйственной культуры, как рис, играет важную роль в мировом продовольственном обеспечении. Болезни листьев риса наносят значительный урон урожаям, что ведет к экономическим потерям. Традиционные методы диагностики характеризуются высокой временной затратностью и значительными потребностями в человеческих ресурсах, что обуславливает актуальность применения автоматизированных систем, основанных на нейронных сетях, в качестве перспективного направления развития.

Классификация заболеваний растений в сельском хозяйстве с использованием методов машинного обучения широко распространена [2], но и применение нейронных сетей также растет постоянно. Сверточные нейронные сети (CNN), включая такие архитектуры, как DenseNet121, Inceptionv3, MobileNetV2, ResNeXt101, ResNet152V и SE-ResNeXt101, проде-

монстрировали высокую результативность при классификации заболеваний риса. Кроме того, в исследованиях рассматриваются ансамблевые решения, например модель DEX, объединяющая DenseNet121, EfficientNetB7 и Xception [3].

Трансформеры стали мощной альтернативой CNN, особенно благодаря способности учитывать дальнедействующие зависимости в изображениях [4].

Ashraful Haque и соавт. [5] продемонстрировали эффективность применения архитектуры Vision Transformer для задачи классификации изображений риса. Авторы использовали датасеты, собранные в различных регионах, и внедрили методы аугментации данных, что позволило повысить обобщающую способность и устойчивость модели. Предложенная авторами сеть, состоящая из четырех энкодеров трансформера с механизмом многоголовой самовнимательности и плотными слоями, показала точность 98.83% и F1-меру 98.87%.

Ali Mhaned и соавт. [6] показали, что архитектуры Vision Transformer (ViT) эффективно классифицируют 55 классов заболеваний растений, что делает их перспективным инструментом для точного земледелия.

Улучшенная модель ViT с механизмами самовнимательности, предложенная Zhang и соавт. [7], достигла точности 99.21% при классификации заболеваний риса.

Tharani Pavithra P. и соавт. [8] предложили гибридную модель ViT-CNN для классификации заболеваний листьев риса, обученную на ~8000 изображениях, включая пирикулез (Blast), бурую пятнистость (Brown Spot), тунгро (Tungro), ложную головню (False Smut) и бактериальный ожог влагалища листа (Bacterial Sheath Blight). Предложенная архитектура достигла точности (precision) 93.84% и точности top-5 100%.

Sumaya Mustofa и соавт. [9] продемонстрировали, что архитектура MaxViT является наиболее эффективной трансформерной моделью для классификации заболеваний листьев томата, что связано с более стабильной и плавной кривой обучения по сравнению с другими трансформерными архитектурами.

В рамках данного исследования проведено сравнение сверточных (CNN) и трансформерных (ViT, MaxViT) нейронных сетей для классификации заболеваний листьев риса на крупном клиническом датасете, содержащем изображения наиболее распространенных заболеваний риса.

Эксперименты показали, что все модели достигают высокой точности, однако трансформеры в определенных сценариях демонстрируют преимущества в точности благодаря возможности учета глобальных зависимостей. Результаты подтверждены графиками изменения точности и потерь во время обучения.

Особенно эффективной оказалась модель MaxViT, которая смогла не только обеспечить высокую точность, но и продемонстрировать стабильную работу в условиях реальных данных. Традиционные CNN, такие как DenseNet121 и ResNet, также показали хорошие результаты и имеют преимущества в вычислительной скорости.

Постановка задачи. Основной целью работы являлась разработка и оценка модели автоматической классификации заболеваний риса на базе архитектур CNN и трансформеров, включая DenseNet121, ResNet, ViT и MaxViT. Для достижения поставленной цели необходимо было: 1) сделать анализ существующих методов классификации изображений; 2) сделать анализ ключевых особенностей выбранных архитектур для распознавания болезней риса; 3) провести сравнительный эксперимент по точности и эффективности каждого метода; 4) оценить практическую применимость данных решений.

Материалы и методы

Сверточные нейронные сети. Сверточные нейронные сети [10] являются одним из наиболее эффективных и наиболее часто используемых инструментов при работе с изображениями, их обработке и анализе. Они были разработаны специально для извлечения высокоуровневых и низкоуровневых признаков из изображений и продемонстрировали выдающуюся

производительность в задачах компьютерного зрения, таких как классификация, детекция объектов и сегментация.

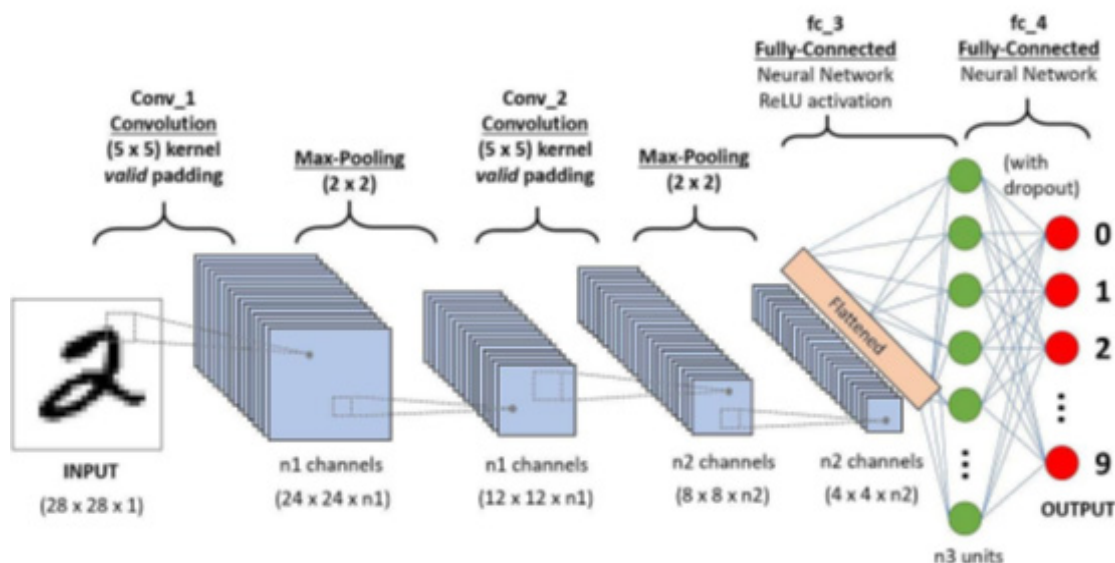


Рисунок 1 – Архитектура сверточных нейронных сетей

В отличие от классических полносвязных архитектур, CNN используют сверточные слои, в которых обучаемые фильтры (ядра) позволяют автоматически извлекать информативные признаки, начиная от простых элементов, таких как линии и границы, до более сложных структур – текстур и форм. Количество сверточных слоев в архитектуре варьируется от 5 до 30 и зависит от конкретной модели (рисунок 1). Первые слои преимущественно выделяют низкоуровневые характеристики изображения, тогда как более глубокие слои фиксируют высокоуровневые признаки. Оптимальный выбор числа слоев свертки является важным фактором, влияющим на итоговую производительность модели. После этапа свертки признаки преобразуются в векторное представление и передаются на полносвязанные слои, где выполняется окончательная классификация. На рисунке 2 показан процесс свертки на примере наложения ядра свертки размером 3 на 3.

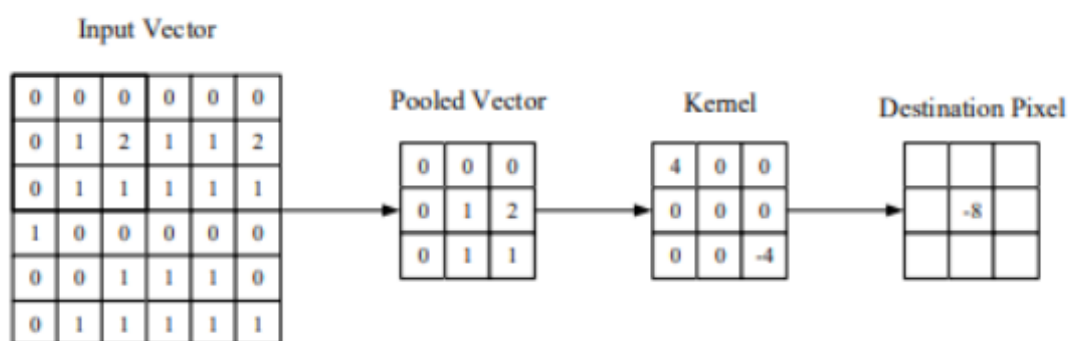


Рисунок 2 – Процесс свертки

Ключевые компоненты сверточного слоя включают: ядра свертки, padding, stride, pooling и функцию активации. Ядра свертки представляют собой небольшие матрицы (обычно 3×3 или 5×5), веса которых оптимизируются с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. При их применении осуществляется операция скользящего окна с поэлемент-

ным умножением и суммированием. Чтобы сохранить размерность входных данных после операции свертки, применяют padding, который представляет собой дополнение краевых областей изображения нулями. При перемещении по изображению можно определить величину шага фильтра. Этот параметр называют stride. Операция Pooling понижает размерность карты признаков и уменьшает чувствительность к шумам. Наиболее распространены методы максимального, минимального и усредняющего пулинга. Функция активации вносит нелинейность в модель. На практике чаще всего используется ReLU, которая зануляет отрицательные значения, ускоряет обучение и позволяет избежать проблемы исчезающих градиентов.

Модель Vision Transformer (ViT). Архитектура глубокой нейронной сети Vision Transformer (ViT) [11] использует Transformer encoder. Модель сегментирует изображение на патчи фиксированного размера и эффективно выявляет сложные зависимости между ними, обеспечивая высокую точность в задачах классификации изображений (рисунок 3).

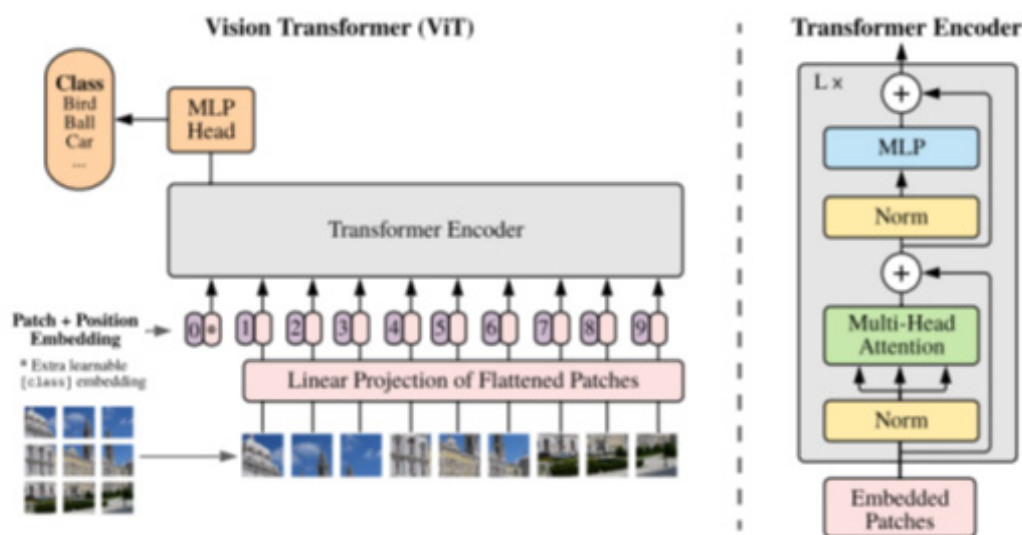


Рисунок 3 – Обзор Vision Transformer

В модели ViT изображение разбивается на непересекающиеся фрагменты фиксированного размера, которые преобразуются в векторы признаков. Для сохранения пространственной информации к ним добавляются позиционные эмбединги. Далее векторы обрабатываются в модуле Transformer Encoder, включающем механизмы многоголового самовнимания (MHSA), нормализацию слоев (LN) и многослойный перцептрон (MLP). Самовнимание обеспечивает взаимодействие между всеми патчами изображения, выполняя роль, аналогичную сверткам. Итоговое представление поступает в полносвязный слой, где осуществляется классификация с использованием функции softmax.

Модель MaxViT. В качестве основы для решения задачи классификации заболеваний листьев риса в данной работе использовалась архитектура MaxViT (Multi-Axis Vision Transformer), представляющая собой усовершенствованную модификацию Vision Transformer. В отличие от классического ViT, MaxViT сочетает механизмы свертки и трансформеров, что позволяет учитывать как локальные, так и глобальные признаки изображения при сниженных вычислительных затратах.

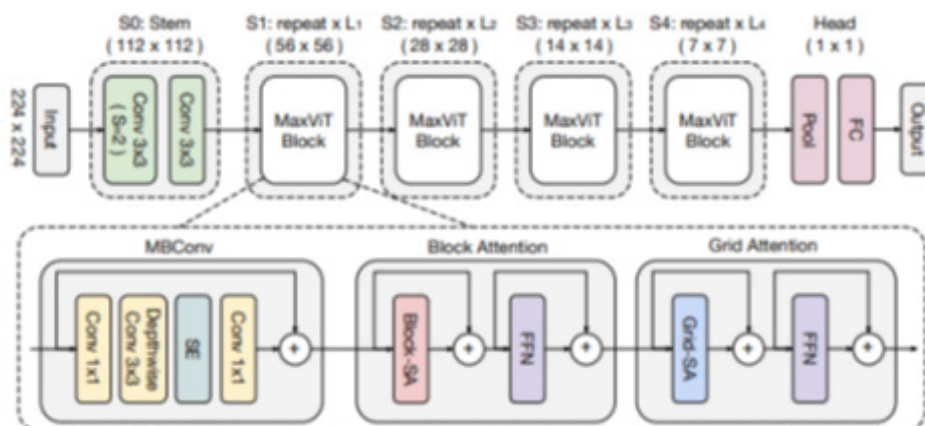


Рисунок 4 – Архитектура MaxViT

Механизм многоосевого внимания (multi-axis attention), как ключевой компонент MaxViT, включает два уровня: Block Attention, извлекающий локальные зависимости в пределах ограниченных областей изображения, и Axial Attention, обеспечивающий эффективный обмен информацией между патчами по строкам и столбцам. Такое сочетание позволяет одновременно анализировать мелкие детали и общий контекст изображения, что критически важно при распознавании визуально сложных патологий растений.

Дополнительной особенностью архитектуры является использование сверточных слоев совместно с трансформерными блоками. Интеграция сверток способствует более качественной обработке низкоуровневых признаков, уменьшает вычислительные затраты и снижает требования к ресурсам. Благодаря этому MaxViT демонстрирует высокую эффективность и масштабируемость при работе с изображениями высокого разрешения, обеспечивая улучшенную точность классификации по сравнению с классическим ViT.

В контексте задач точного земледелия, и в частности анализа заболеваний риса, MaxViT формирует иерархическое представление изображений, позволяя выявлять даже небольшие и неравномерно распределенные повреждения листьев, связанные с патологическими изменениями.

Датасет

Для проведения экспериментов были взяты изображения наиболее распространенных заболеваний листьев риса, любезно предоставленные нам авторами статьи [12]. Датасет содержит девять классов заболеваний листьев риса, где в каждом заболевании представлено сто изображений (рисунок 5).

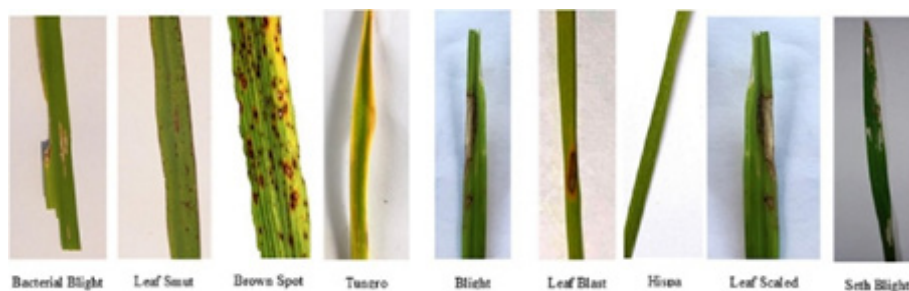


Рисунок 5 – Изображения больных листьев риса

В датасет включены наиболее опасные заболевания листьев, такие как Bacterial Leaf Blight, вызываемое *Xanthomonas oryzae* и способное снижать урожайность до 50–80%, а также Bacterial Panicle Blight, вызванное *Burkholderia glumae* и *B. gladioli*, которое приводит к потемнению метелок и гниению зерна. Заболевание Brown Spot, вызываемое *Bipolaris oryzae*, проявляется темными овальными пятнами на листьях, тогда как насекомое-вредитель *Hispa* (*Dicladispa armigera*) повреждает эпидермис листьев. Leaf Scald (*Microdochium oryzae*), вызывает ожогоподобные поражения, и Leaf Smut (*Entyloma oryzae*), характеризуется темными пятнами и ложными спорообразованиями. Leaf Blast аналогично Sheath Blight вызывается *Rhizoctonia solani* и может приводить к потерям урожая до 15%, при этом Sheath Blight преимущественно поражает влагалища листьев и широко распространено в Бангладеш. И последний тип – это вирусное заболевание Tungro, переносимое насекомыми (*Nephotettix virescens*), которое приводит к замедлению роста и деформации листьев.

После проведенной аугментации изображений объем датасета вырос до 42 876 изображений, которые мы разделили на обучающие и валидационные.

Результаты и обсуждение

В ходе обучения модели была выбрана вычислительная среда Kaggle Notebooks благодаря ее удобству для работы с данными в формате TFRecord и наличию бесплатных ресурсов на базе графических процессоров NVIDIA T4. Все модели были обучены на предварительно обученных весах на датасете ImageNet. В качестве основного фреймворка был выбран PyTorch за счет его гибкости и широкой функциональности для построения и обучения моделей компьютерного зрения. Для унификации процесса обработки данных были разработаны функции для парсинга TFRecord файлов, создания собственных классов Dataset и организации загрузки данных через DataLoader, что обеспечило корректное сравнение эффективности различных архитектур.

Для модели Vision Transformer (ViT) была использована предобученная версия ViT-BasePatch16-224, модифицированная заменой выходного слоя на полностью связанный слой с девятью нейронами для решения задачи многоклассовой классификации заболеваний риса (рисунок 6).

```
# Загрузка и настройка модели ViT
model = ViTForImageClassification.from_pretrained("google/vit-base-patch16-224")
model.classifier = torch.nn.Linear(model.config.hidden_size, 9) # 9 классов
model.to(device)

# Функция потерь и оптимизатор
criterion = torch.nn.CrossEntropyLoss()
optimizer = torch.optim.AdamW(model.parameters(), lr=1e-5, weight_decay=1e-4)
```

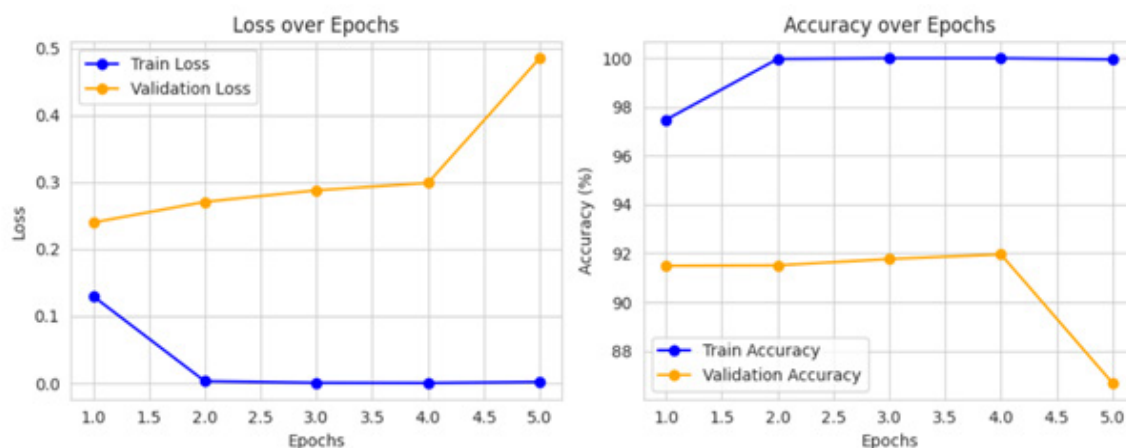
Рисунок 6 – Загрузка модели ViT. Функции потерь и оптимизатор

В процессе обучения проводился систематический подбор гиперпараметров, таких как скорость обучения, размер батча, количество эпох, выбор оптимизатора и параметры регуляризации, с целью улучшения точности модели и ее устойчивости к переобучению (рисунок 7).

```
for epoch in range(epochs):
    model.train()
    running_loss, correct, total = 0.0, 0, 0
    for images, labels in tqdm(train_loader, desc=f"Epoch {epoch+1}/{epochs}"):
        images, labels = images.to(device), labels.to(device)
        optimizer.zero_grad()
        outputs = model(images).logits
        loss = criterion(outputs, labels)
        loss.backward()
        optimizer.step()
        running_loss += loss.item()
        _, predicted = outputs.max(1)
        total += labels.size(0)
        correct += predicted.eq(labels).sum().item()
    train_acc = 100 * correct / total
    train_losses.append(running_loss / len(train_loader))
    train_accuracies.append(train_acc)
    print(f"Epoch {epoch+1}, Train Loss: {train_losses[-1]:.4f}, Train Accuracy: {train_acc:.2f}%")
```

Рисунок 7 – Обучение модели ViT

На рисунке 8 представлена диаграмма изменения функции потерь и точности. Из графиков видно, что сохранение наилучшей модели по результатам на валидационной выборке обеспечивает значительное преимущество, позволяя избежать переобучения и повысить обобщающую способность. Максимальная достигнутая точность составила 91.21%, а минимальное значение функции потерь – 0.2292.

Рисунок 8 – Изменение функции потерь и точности
(лучшие значения: Accuracy = 91.21%, Loss = 0.2292).

В качестве функции потерь применялась кросс-энтропия, а для оптимизации весов использовался алгоритм AdamW с L2-регуляризацией. Проведенные эксперименты позволили повысить точность модели с первоначальных 87% до 91.21%.

Для обучения модели использовалась предварительно натренированная архитектура MaxViT-T (версия IMAGENET1K_V1), в которой выходной полносвязанный слой был модифицирован для решения задачи классификации девяти классов заболеваний. Общая численность параметров модели составила 32,1 млн. Процесс обучения проводился в течение 10

эпох с использованием L2-регуляризации и функции потерь на основе кросс-энтропии. Для оптимизации весов применялся алгоритм AdamW. Дополнительно были реализованы механизмы ранней остановки и сохранения лучшей версии модели по результатам на валидационной выборке. По итогам экспериментов с различными модификациями наилучшая точность на валидационном наборе данных составила 94.10%.

Результаты следующего эксперимента продемонстрировали более стабильное обучение и сбалансированные значения метрик Precision и Recall для большинства классов, что свидетельствует о повышенной устойчивости обобщающих свойств модели. Несмотря на то что разница в 0.36% выглядит незначительной, она имеет существенное значение при решении задачи классификации заболеваний риса. На рисунке 9 представлена динамика изменения функции потерь и точности в процессе обучения модели на архитектуре MaxViT.

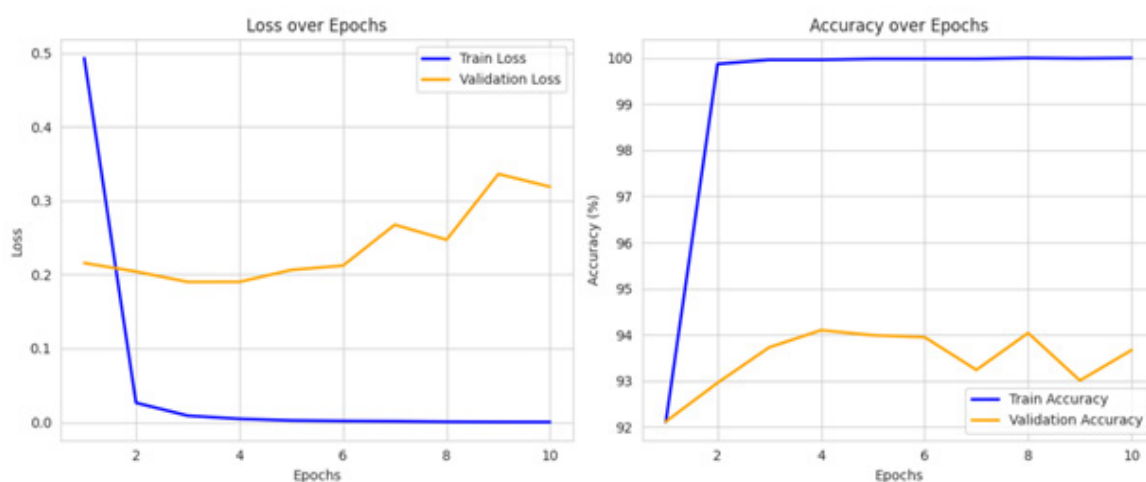


Рисунок 9 – Изменение точности и функции потерь при обучении модели MaxViT (разница 0.36% имеет значение для классификации заболеваний риса)

Для сравнения с трансформерами были обучены архитектуры сверточных нейронных сетей ResNet и DenseNet121.

Модель ResNet в среднем продемонстрировала точность положительных классификаций на уровне 90.26%, полноту 87% и значение F1-меры 88.93% по всем классам заболеваний, что свидетельствует о достаточно хорошей способности к обобщению. Наиболее высокие результаты получены для заболеваний Blight, Bacterial Leaf Blight и Tungro, где все три метрики близки к оптимальным значениям. Однако на заболевании Leaf Smut модель показала низкий уровень точности (58.96%), что можно считать неприемлемым для задач, связанных с выявлением патологий растений. На рисунке 10 представлена динамика изменения функции потерь и точности в процессе обучения модели на архитектуре ResNet.

На рисунке 11 представлена динамика изменения функции потерь и точности в процессе обучения модели на архитектуре DenseNet121. Итоговая точность для архитектуры ResNet составила 90.33%, в то время как DenseNet121 показала более высокое значение – 93.75%.

В таблице 2 приведены итоговые показатели точности и значения функции потерь для каждой из исследованных архитектур нейронных сетей на валидационном наборе данных. Поскольку модели не обучались на валидационной выборке, данная оценка является объективной, так как разделение набора данных осуществлялось в пропорции 70:30.

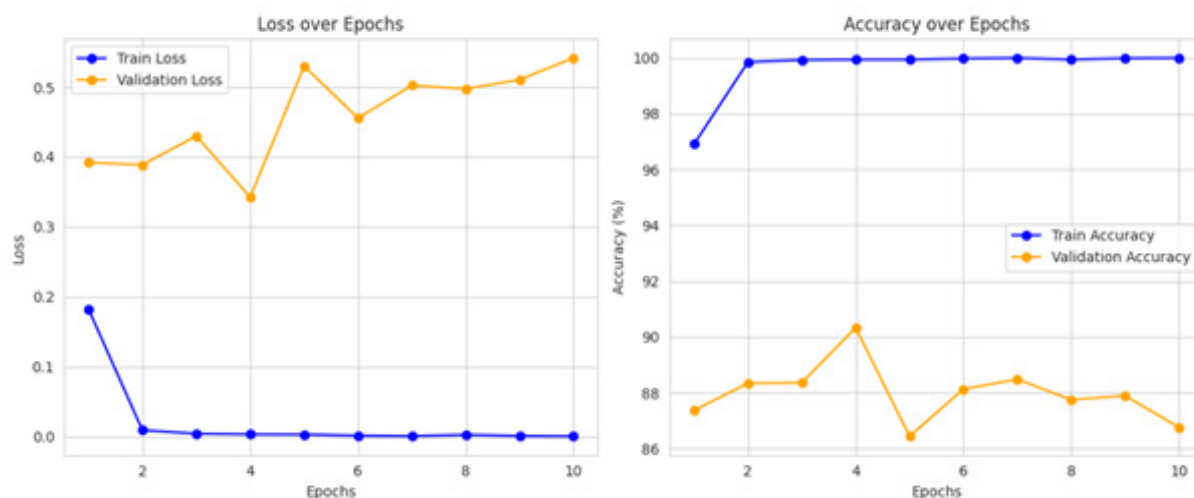


Рисунок 10 – Изменение точности и функции потерь при обучении модели ResNet (средняя точность 90.26%, низкая для Leaf Smut – 58.96%)

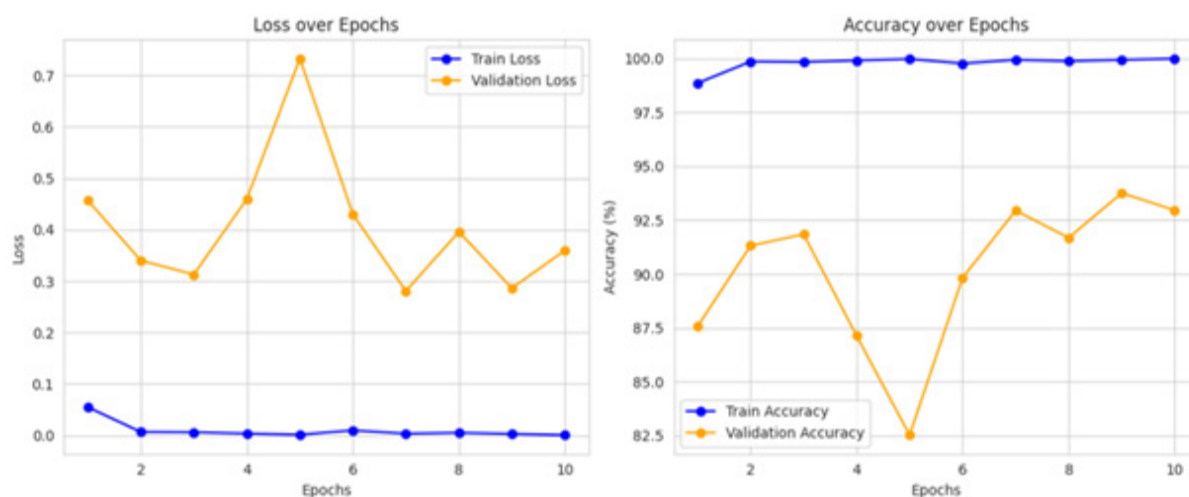


Рисунок 11 – Изменение точности и функции потерь при обучении модели DenseNet121 (средняя точность 93.75%).

Таблица 2 – Диаграмма изменения точности и потерь для каждой архитектуры

	ResNet	DenseNet121	ViT	MaxViT
Precision	90.26	94.09	91.69	93.97
Recall	87	93.74	91.29	93.83
F1-score	88.93	93.50	90.49	93.75
Accuracy	90.33	93.75	91.21	94.10

Заключение

Авторами были проведены эксперименты по обучению и сравнению четырех различных архитектур нейронных сетей: DenseNet121, ResNet, ViT (Vision Transformer) и MaxViT. Результаты показали, что модели MaxViT достигли наибольшей точности (94.10%), благодаря своей способности учитывать как локальные, так и глобальные признаки изображений. Трансформеры демонстрируют преимущества в точности благодаря возможности учитывать глобальные зависимости, а сверточные сети обладают высокой скоростью вычислений и стабильностью в условиях ограниченных данных. Внедрение подобных технологий в сельское хозяйство может значительно повысить эффективность диагностики болезней риса, ускорить принятие решений и снизить потери урожая, делая мониторинг более точным и автоматизированным.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ahad, M.T., Li, Y., Song, B., Bhuiyan, T. Comparison of CNN-based deep learning architectures for rice diseases classification. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 9, 22–35 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2023.07.001>.
- 2 Sethy, P.K., Barpanda, N.K., Rath, A.K., Behera, S.K. Deep feature based rice leaf disease identification using support vector machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105527 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105527>.
- 3 Simhadri, C.G., Kondaveeti, H.K., Vatsavayi, V.K., Mitra, A., Ananthachari, P. Deep learning for rice leaf disease detection: A systematic literature review on emerging trends, methodologies and techniques. *Information Processing in Agriculture* (2024, May). <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2024.04.006>.
- 4 Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T. et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint* (2020). URL: <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.
- 5 Haque, M.A., Pastor-Escuredo, D., Brigui, I., Kesswani, N., Bordoloi, S., Ray, A. K. Rice disease identification using Vision Transformer (ViT) based network. *The Future of Artificial Intelligence and Robotics* (Cham: Springer, 2024), pp. 732–741. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60935-0_63.
- 6 Mhaned, A., Salma, M., El Haji, M., Jamal, B. Plant disease detection using vision transformers. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 15 (2), 2334–2344 (2025). <https://doi.org/10.11591/ijece.v15i2>.
- 7 Zhang, H. Attention-based feature enhancement for rice leaf disease recognition. *Proc. 2nd Int. Conf. Artificial Intelligence and Automation in High-Performance Computing (AIAHPC 2022)*, pp. 41–49. <https://doi.org/10.1117/12.2641832>.
- 8 Tharani, P., Baranidharan, B. A hybrid ViT-CNN model premeditated for rice leaf disease identification. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 12 (1), 35–43 (2024). <https://doi.org/10.18280/ijcmem.120104>.
- 9 Mustofa, S., Munna, M., Emon, Y., Rabbany, G., Ahad, M. A comprehensive review on plant leaf disease detection using deep learning // *arXiv preprint* (2023). URL: <https://arxiv.org/abs/2308.14087>.
- 10 Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., Zhou, J. A survey of convolutional neural networks: Analysis, applications, and prospects. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems* (2021), pp. 1–21. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3084827>.
- 11 Tu, Z., Talebi, H., Zhang, H., Yang, F., Milanfar, P., Bovik, A., Li, Y. MaxViT: Multi-axis vision transformer. *arXiv preprint* (2022). URL: <https://arxiv.org/abs/2204.01697>.
- 12 Ahad, Md & Li, Yan & Song, Bo & Bhuiyan, Touhid. Comparison of CNN-based deep learning architectures for rice diseases classification. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 9, 22–35 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2023.07.001>.

¹Джураев Д.Б.,

бакалавр, ORCID ID 0009-0008-5800-9960, e-mail: doninadirov@mail.ru

^{1*}Уалиева И.М.,

ф.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0003-3853-8896,

*e-mail: i.ualiyeva@gmail.com

²Акжалова А.Ж.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-1141-7595, e-mail: a.akzhalova@kbtu.kz

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

КҮРІШ ЖАПЫРАҚТАРЫНЫҢ АУРУЛАРЫН АВТОМАТТЫ ЖІКТЕУ ҮШІН ТРАНСФОРМЕР ЖӘНЕ СВЕРТКІШ НЕЙРОЖЕЛІ АРХИТЕКТУРАЛАРЫНЫҢ ӘСЕРЛІЛІГІН САЛЫСТЫРА ТАЛДАУ

Андатпа

Бұл мақалада заманауи нейрондық желі архитектуралары – конволюциялық нейрондық желілер (CNN) және трансформерлер – күріш жапырақтарының ауруларын автоматты түрде диагностикалаудағы салыстырмалы талдауы ұсынылады. Эксперименттер барысында DenseNet121, ResNet, Vision Transformer (ViT) және MaxViT модельдері оқытылып, сыналды, содан кейін олардың дәлдігі мен есептеу тиімділігі тұрғысынан бағаланды. Зерттеу шынайы сау және ауру күріш жапырақтарының бейнелерінен құралған ірі ауқымды деректер жиыны негізінде жүргізілді, бұл нәтижелерді ауыл шаруашылығы ғылымы мен тәжірибесі үшін аса өзекті етеді. Эксперименттер гиперпараметрлерді оңтайландыруды, деректерді аугментациялау әдістерін қолдануды, сондай-ақ модельдердің жалпылау қабілетін арттыру мақсатында шығын функциялары мен регуляризация әдістерін пайдалануды қамтыды. Бағалау метрикаларына классификация дәлдігі, F1-мера, сондай-ақ есептеу тиімділігінің көрсеткіштері – болжам жасау уақыты мен ресурстарды тұтыну кірді. Нәтижелер көрсеткендей, трансформерлер негізіндегі модельдер, әсіресе MaxViT, 94,10%-ға дейін дәлдікке қол жеткізді. Бұл олардың назар механизмдері мен терең контекстуализация арқылы кескіндердің жергілікті және ғаламдық белгілерін тиімді модельдей алу қабілетіне байланысты. Сонымен қатар, DenseNet121 және ResNet сияқты CNN архитектуралары шектеулі есептеу ресурстары жағдайында жоғары жылдамдық пен тұрақтылық көрсетті.

Тірек сөздер: терең оқыту, сверткіш нейрондық желілер, Vision Transformer, MaxViT, өсімдіктерді диагностикалау, күріш, кескіндерді жіктеу.

¹Jurayev D.B.,

Bachelor student, ORCID ID 0009-0008-5800-9960, e-mail: doninadirov@mail.ru

^{1,2*}Ualiyeva I.M.,

Cand.Phys.-Math.Sc., Associate Professor, ORCID ID 0000-0003-3853-8896,

*e-mail: i.ualiyeva@gmail.com

²Akzhalova A.Zh.,

PhD, professor, ORCID ID 0000-0002-1141-7595, e-mail: a.akzhalova@kbtu.kz

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF TRANSFORMER AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK ARCHITECTURES FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF RICE LEAF DISEASES

Abstract

This article presents a comparative analysis of modern neural network architectures, convolutional neural networks (CNNs) and transformers, for the automatic diagnosis of rice leaf diseases. In the experiments,

DenseNet121, ResNet, Vision Transformer (ViT), and MaxViT models were trained and tested, followed by their evaluation in terms of accuracy and computational efficiency. The study was conducted on a large-scale dataset containing real images of healthy and diseased rice leaves, which makes the results highly relevant for agricultural science and practice. The experiments included hyperparameter optimization, application of data augmentation techniques, and the use of loss functions and regularization methods to improve the generalization ability of the models. The evaluation metrics comprised classification accuracy, F1-score, as well as computational efficiency indicators such as prediction time and resource consumption. The results showed that transformer-based models, particularly MaxViT, achieve accuracy of up to 94.10%. This is attributed to their ability to effectively capture both local and global image features through attention mechanisms and deep contextualization. At the same time, CNN architectures such as DenseNet121 and ResNet demonstrate high processing speed and robustness under limited computational resources.

Keywords: deep learning, convolutional neural networks, Vision Transformer, MaxViT, plant disease diagnosis, rice, image classification.

Дата поступления статьи в редакцию: 29.08.2025

ӘОЖ 004.04; 004.8
FTAMP 28.23.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-161-175>

^{1,2}**Смурыгин В.В.,**

бакалавр, бағдарламалық жасақтама инженері, ORCID ID: 0009-0009-8699-159X,
e-mail: valentinsmurygin@gmail.com

^{2*}**Еримбетова А.С.,**

PhD, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-2013-1513,
*e-mail: aigerian@mail.ru

^{1,2}**Кучин Я.,**

магистр, аға ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0000-0002-5271-9071,
e-mail: ykuchin@mail.ru

^{1,2}**Сымагулов А.,**

магистр, бағдарламалық жасақтама инженері, ORCID ID: 0000-0001-9974-3215,
e-mail: asmogulove00@gmail.com

¹Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

²ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеу технологиялары институты,
Алматы қ., Қазақстан

ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДТАУ МЕН КОМПЬЮТЕРЛІК КӨРУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ КАРТОГРАФИЯ ЖӘНЕ ФАКТОРЛАРДЫ ТАҢУ ЖҮЙЕСІ

Аңдатпа

Қазіргі ауыл шаруашылығы климаттың өзгеруі, топырақ құнарлылығының төмендеуі, су ресурстарының тапшылығы, биологиялық қатерлер және антропогендік факторлардың теріс әсері сияқты бірқатар маңызды сын-қатерлерге тап болып отыр. Бұл мәселелердің ішінде егіс алқаптарының арамшөптермен ластануы ерекше орын алады, ол нақты мониторинг пен уақытылы әрекет етуді қажет етеді. Осы зерттеу ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) деректері негізінде арамшөптерді жоғары геокеңістікті дәлдікпен автоматты түрде тану және картографиялау жүйесін әзірлеуге бағытталған. Ұсынылған тәсіл арамшөптерді анықтау үшін компьютерлік көру алгоритмдерін қолдануды, тану сапасын арттыру үшін деректерді аугментациялау әдістерін және анықталған арамшөптердің геобайланысын қамтамасыз етуге арналған авторлық карталарды біріктіру әдісін қамтиды. Эксперименттік сынақтар әзірленген жүйенің арамшөптерді автоматты түрде анықтау және олардың таралуының геобайланысты карталарын құрудағы тиімділігін көрсетті. Бұл жүйені енгізу ауыл шаруашылығы өндірушілеріне арамшөптер басқан жерлерді нүктелік өндеуге, гербицидтерді тиімді пайдалануға және арамшөптерге қарсы күрестің нәтижелілігін арттыруға мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: картаға түсіру, қашықтықтан зондтау, ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА), компьютерлік көру, деректерді аугментациялау.

Кіріспе

Қазіргі ауыл шаруашылығы агроөнеркәсіп өндірісінің өнімділігі мен тұрақтылығына теріс әсер ететін көптеген факторларға тап болуда. Топырақтың жай-күйі, су ресурстарының тапшылығы, зиянкестер мен өсімдік ауруларының таралуы, сондай-ақ арамшөптердің белсенді көбеюі – мұның барлығы ауыл шаруашылығы өндірушілері үшін елеулі сын-қатерлер туындатады.

Топырақ құрылымының бұзылуы, қоректік заттардың жетіспеушілігі, қышқылдылықтың артуы және эрозия сияқты мәселелер өнімділіктің төмендеуіне, ауыл шаруашылығы өнімдерінің

сапасының нашарлауына алып келеді. Ал судың жетіспеушілігі топырақтың деградациясына және оның құнарлылығының төмендеуіне одан да жойқын әсер етеді. Сонымен қатар, өсімдік зиянкестері мен аурулары, сондай-ақ арамшөптер мәдени дақылдармен ресурстар үшін бәсекелесе отырып, өнімділікті едәуір төмендетеді. Бұл жағдайлар уақытылы әрі тиімді бақылау шараларын талап етеді.

Топырақты өңдеу, суару, химиялық заттар мен гербицидтерді қолдану сияқты осы мәселелермен күресудің дәстүрлі әдістерінің өз шектеулері бар. Өңдеу көп еңбекті қажет етеді, ал химиялық әсер қоршаған ортаға теріс ықпал етуі мүмкін. Сонымен қатар, бұл әдістер проблемалық аймақтарды анықтау тұрғысынан дәлдік пен жеделдікті әрдайым қамтамасыз ете алмайды. Осыған байланысты мониторинг тиімділігін арттырып, агротехникалық процестерді басқаруды жақсартатын инновациялық технологияларды қолдану қажеттілігі туындайды.

Осындай шешімдердің бірі – ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА), мультиспектрлі камераларды және компьютерлік көру алгоритмдерін пайдалану. Бұл технологиялар ауыл шаруашылығы жерлерінің жағдайын дәлірек және жедел талдауға жаңа мүмкіндіктер ашады. ҰҰА топырақтың спектрлік талдауын жүргізуге, су тапшылығының белгілерін анықтауға, сондай-ақ өсімдік аурулары, зиянкестер мен арамшөптерді олардың дамуының ерте кезеңдерінде анықтауға мүмкіндік беретін жоғары сапалы кескіндер алуға жағдай жасайды. Заманауи машиналық оқыту алгоритмдері мен нейрондық желілер бұл мәселелерді тек тануға ғана емес, сонымен қатар олардың дамуын болжауға да көмектеседі. Бұл өз кезегінде дер кезінде қажетті шаралар қабылдауға мүмкіндік береді.

Осылайша, дәстүрлі әдістерді қашықтықтан зондтау мен компьютерлік көру сияқты озық технологиялармен үйлестіру егіншілік мәселелерін бақылаудың дәлдігі мен тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Бұл зерттеу – өнімділікті арттыруға, шығындарды азайтуға және ауыл шаруашылығының тұрақты дамуын қамтамасыз етуге бағытталған заманауи технологияларды пайдалана отырып, аграрлық кедергілерді картаға түсіру және тану жүйесін әзірлеуге арналған.

Зерттеуге байланысты жұмыстар. Соңғы жылдары ауыл шаруашылығы саласында агроөнеркәсіп өндірісінің тиімділігін арттыруға бағытталған жаңа технологиялардың белсенді түрде енгізілуі байқалуда. Осындай технологиялардың бірі – ауыл шаруашылығы алқаптарының жай-күйін бақылау мақсатында қашықтықтан зондтау мен ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) пайдалану. Атап айтқанда, топырақ пен өсімдіктердің жағдайын бағалау үшін ҰҰА қолдану бойынша жүргізілген зерттеулер топырақ ылғалдылығы, эрозия, коректік заттардың таралуы және өсімдік аурулары сияқты факторларды анықтауда жоғары тиімділік көрсетіп отыр.

ҰҰА пайдаланудың маңызды артықшылықтарының бірі – жоғары сапалы кескіндерді алу мүмкіндігі, кейін олар әртүрлі деректерді өңдеу әдістері арқылы талданады. Мысалы, зерттеулер [1, 2] мультиспектрлік камералар көмегімен алынған деректер топырақ құрамын дәл анықтауға, су тапшылығы бар аймақтарды анықтауға, сондай-ақ аурулар мен зиянкестерден зақымдалған өсімдіктерді табуға мүмкіндік беретінін көрсетті. Мұндай ақпарат ауыл шаруашылығы жерлерін бағалау дәлдігін арттырып, егін жоғалту қаупін азайтуға және уақытылы әрекет етуге жағдай жасайды.

Бұл саладағы маңызды бағыттардың бірі – арамшөптер мен басқа да проблемалық өсімдіктерді тану үшін компьютерлік көру алгоритмдерін қолдану. Мәселен, зерттеу [3] нейрондық желілер көмегімен арамшөптердің әртүрлі түрлерін дәл анықтап қана қоймай, сонымен қатар ҰҰА-дан алынған спектрлік деректер негізінде олардың таралуын болжауға болатынын көрсетеді. Мұндай тәсіл гербицидтерді тиімді қолдануға, олардың шығынын азайтуға және қоршаған ортаға зиянды әсерді төмендетуге мүмкіндік береді.

Сондай-ақ, машиналық оқыту үлгілерін жетілдіру мақсатында деректерді күшейту әдістерін қолдану бойынша да зерттеулер жүргізілуде. Атап айтқанда, жұмыстар [4] кеңейтілген кескіндер арқылы толықтырылған деректер жиынтығы арамшөптерді ғана емес, сондай-ақ су тапшылығы немесе аурулар салдарынан туындайтын өсімдік стресін анықтауға мүмкіндік

беретінін көрсетеді. Бұл нәтижелер егіншілікке кедергі келтіретін факторларды тану мен картаға түсіру жүйелерін әрі қарай дамытуда маңызды рөл атқарады.

Ауыл шаруашылығы жерлерін картаға түсіру және бақылауға арналған барлық осы технологияларды бірыңғай жүйеге біріктіру агротехнологиялық дамудың келесі кезеңін айқындайды. Мысалы, зерттеулер [5] геоақпараттық жүйелерді (ГАЗ) ҰҰА көмегімен алынған мәліметтермен бірге пайдалану ауылшаруашылық аймақтарының нақты жағдайын көрсететін карталарды жасауға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Бұл – агротехникалық шараларды оңтайландыру үшін аса маңызды.

Осылайша, ауыл шаруашылығы технологияларын зерттеудің қазіргі деңгейі озық шешімдерді пайдалану арқылы егіншілікке кедергі келтіретін факторларды бақылау, картаға түсіру және тану жүйелерін енгізудің жоғары әлеуеті бар екенін дәлелдейді. Мұндай технологияларды нақты өндіріс процесінде қолдану ауыл шаруашылығының тұрақтылығын арттырып, оның тиімділігін едәуір жақсартуға ықпал етеді.

Материалдар мен әдістер

Ауыл шаруашылығын тиімді жүргізу өсімдіктердің өсуі мен дамуына кедергі келтіретін факторларды уақытылы анықтауды және жоюды талап етеді. Заманауи технологиялар ауылшаруашылық жерлерін бақылаудың дәлдігі мен жеделдігін едәуір арттыруға мүмкіндік беретін детекция әдістерінің кең спектрін ұсынады.

Ең қарапайым және қолжетімді әдістердің бірі визуалды тексеру болып қала береді. Дегенмен, оның ыңғайлылығына қарамастан, оның бірқатар шектеулері бар: ол айтарлықтай уақыт шығындарын талап етеді, шағын аумақтарды қамтиды және әрқашан проблемаларды ерте анықтауға мүмкіндік бермейді. Бұл мәселелерді шешу үшін спутниктік суреттер, дрондардан аэрофототүсірілім, жердегі сенсорлар және машиналық оқыту алгоритмдері сияқты жетілдірілген технологиялар қолданылады.

Спутниктік суреттер әртүрлі спектрлердегі өсімдіктердің күйін талдауға мүмкіндік беретін ауылшаруашылық жерлеріне ауқымды шолу жасайды. Бұл дақылдардың стрестік жағдайларын, топырақ құрамының өзгеруін және басқа да ауытқуларды анықтауға көмектеседі. Осындай мәліметтердің арқасында фермерлер егістіктердегі жағдайды бақылап, уақытылы шаралар қолдана алады.

Дрондардан аэрофототүсірілім қосымша дәлдік пен егжей-тегжейлікті қамтамасыз етеді. Мультиспектрлі датчиктерді қоса алғанда, жоғары ажыратымдылықтағы камералармен жабдықталған дрондар өсімдіктердің денсаулығын үнемі бақылауға, ауруларды, зиянкестер мен арамшөптерді анықтауға мүмкіндік береді. Оларды пайдалану бақылау процесін едәуір жылдамдатады және ауылшаруашылық жұмыстарының тиімділігін арттырады.

Тағы бір маңызды құрал – жердегі сенсорлар, олар нақты уақыт режимінде топырақтың ылғалдылығы, температурасы және қоректік заттары туралы деректерді жинайды. Бұл өлшемдер, әсіресе спутниктік және дрондық деректермен үйлескенде, фермерлерге егістіктерінің жай-күйі туралы толық түсінік алуға және кез келген өзгерістерге жедел жауап беруге мүмкіндік береді.

Машиналық оқыту және компьютерлік көру технологиялары деректерді талдау процесін одан да дәлірек әрі автоматтандырылған етеді. Дрондар мен спутниктерден алынған суреттерді өңдеу арқылы олар проблемалық аймақтарды автоматты түрде анықтайды, құрғақшылық, ауру немесе арамшөптер сияқты қауіптерді жіктейді және олардың нақты орналасуын анықтайды. Деректердің үлкен көлемінде оқытылған нейрондық желілер детекцияның жоғары жылдамдығы мен дәлдігін қамтамасыз етеді, бұл ауылшаруашылық жерлерін бақылауды айтарлықтай жеңілдетеді.

Ауыл шаруашылығында заманауи технологияларды қолдану проблемаларды жедел анықтауға ғана емес, сонымен қатар уақытылы шешім қабылдау арқылы өнімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Визуалды тексеру, спутниктік бақылау, аэрофототүсірілім, жердегі сенсорлар

және машиналық оқыту алгоритмдерін біріктіру өрістерді басқару процесін тиімдірек етеді, тәуекелдерді азайтады және ауылшаруашылық өндірісінің өнімділігін арттырады.

Нүктелік егіншіліктегі картаға түсіру негіздері. Картаға түсіру – ресурстарды тиімді пайдаланып, өнімділікті арттыруға мүмкіндік беретін нүктелік егіншіліктің негізгі элементтерінің бірі. Бұл процесс жерсеріктік суреттерден, дрондардан, жерүсті сенсорлардан және метеостанциялардан алынатын, жер бедері, топырақ құрамы, ылғалдылық пен өсімдік жағдайын сипаттайтын геокеңістікті деректерге негізделеді.

Мамандандырылған программалық жасақтамалар осы деректерді талдай отырып, топырақ құнарлылығы, ылғалдылық деңгейі, арамшөптер мен зиянкестердің таралуы сияқты көрсеткіштерге негізделген тақырыптық карталар жасайды. Мұндай карталар фермерлерге тыңайтқыштарды, пестицидтерді және су ресурстарын саралап, нақты қажеттілікке сай қолдануға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде ресурстардың артық шығынын азайтып, шығынды онтайландырады.

Картаға түсіру сондай-ақ ауыспалы егіс пен топырақты өңдеуді жоспарлауға көмектесіп, ауыл шаруашылығы өндірісін дәлірек және тиімді басқаруды қамтамасыз етеді. Мұндай тәсіл өнімділікті арттырумен қатар шығындарды азайтуға және қоршаған ортаға теріс әсерді төмендетуге мүмкіндік береді.

Ауылшаруашылық жерлерін картаға түсірудің заманауи әдістері. Нақты өріс карталарын жасау үшін спутниктік суреттер, дрондар және жерүсті сенсорлар қолданылады. Спутниктер кең аумақтарды қамтып, көпспектрлі сенсорлар арқылы топырақ пен өсімдіктердің күйін талдауға мүмкіндік береді. Дрондар өсімдіктердің спектрлік сипаттамаларындағы болмашы өзгерістерді анықтау арқылы нақты учаскелерді толықтай картаға түсіруді қамтамасыз етеді. Бұл олардың стресс факторларын ерте кезеңде анықтауға көмектеседі. Жерүсті сенсорлар нақты уақыт режимінде топырақтың ылғалдылығы, температурасы мен құрамына қатысты деректерді үздіксіз жинап, жібереді.

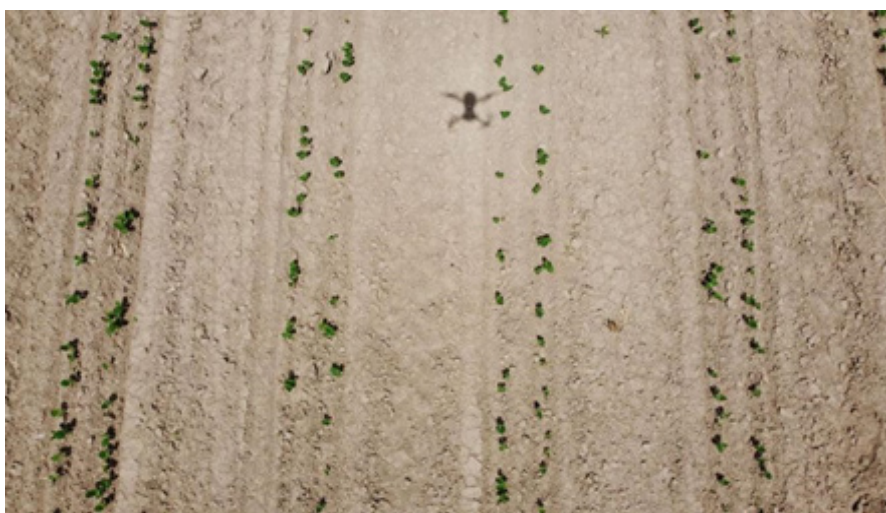
Арнайы бағдарламалық қамтамасыз ету мен машиналық оқыту алгоритмдері жиналған деректерді өңдеп, құнарлылық, ылғалдылық, арамшөптер мен зиянкестердің таралу карталарын жасайды. Бұл ақпаратты біріктіру проблемалық аймақтарды уақтылы анықтауға, ресурстарды тиімді пайдалануға және ауылшаруашылық өндірісінің жалпы тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Өсудің әртүрлі кезеңдеріндегі соя дақылдарының деректер жиынтығын қалыптастыру. Терең оқыту модельдерін үйрету үшін өсімдіктерді тануға арналған белгіленген RGB кескіндер жиынтығы жасалды. Деректер соя өсімдігінің әртүрлі өсу кезеңдерінде ауылшаруашылық алқаптарын аралау барысында 4K RGB және мультиспектрлі камералармен жабдықталған ұшқышсыз ұшу аппаратының (ҰҰА) көмегімен жиналды.

Бақылау үдерісі екі негізгі кезеңге бөлініп, бірнеше мәрте ұшу жүргізу арқылы өсімдіктердің даму барысындағы маңызды сәттерді тіркеуге мүмкіндік берді. Барлығы 5 метр биіктіктен түсірілген 190 сурет жиналды. Барлық кескіндер келесі санаттар бойынша белгіленіп, жіктелді:

- ♦ Glycine max (Соя) – үш жапырақты және сарғыш немесе ақ түсті ұсақ гүлдері бар бір жылдық бұршақ тұқымдас өсімдік.
- ♦ Amaranthus retroflexus (Ширица кері) – тармақталған сабағы, үлкен сопақша жапырақтары және жасыл гүлшоғыры бар бір жылдық арамшөп.
- ♦ Convolvulus arvensis (Далалық байлам) – сабағы жатаған, жүрек тәрізді жапырақтары мен қызғылт немесе ақ гүлдері бар көпжылдық өсімдік.
- ♦ Setaria glauca (Сұр қылтық) – жіңішке жапырақтары және қылшық тәрізді тығыз гүлшоғыры бар бір жылдық дәнді дақыл.
- ♦ Xanthium strumarium (Кәдімгі иттікен) – ірі жапырақтары мен тікенекті тұқымдары бар бір жылдық өсімдік.
- ♦ Cirsium arvense (Далалық ошаған) – тікенекті жапырақтары мен күлгін гүлдері бар көпжылдық арамшөп.

- ♦ *Echinochloa crus-galli* (Кәдімгі қарақат) – жалпақ жапырақтары мен тығыз шашақты гүлшоғыры бар ылғал сүйгіш дәнді дақыл.
 - ♦ *Hibiscus trionum* (Үшқабатты гибискус) – ортасы қара түсті, сары түсті ірі гүлдері бар бір жылдық өсімдік.
 - ♦ *Abutilon theophrasti* (Теофраст аршағы) – жүрек тәрізді жапырақтары мен сары гүлдері бар, өңделген жерлерде жиі кездесетін бір жылдық өсімдік.
- Бұл суреттердің мысалдарын 1 және 2-суреттерден көруге болады.



Сурет 1 – Сояның вегетативті өсуінің орта кезеңі



Сурет 2 – Сояның вегетативті өсуінің орта-кеш кезеңі

Жиналған деректер жиынтығы дақылдар мен арамшөптерді автоматты түрде тануға арналған модельдерді тиімді оқытуға мүмкіндік береді, бұл нақты егіншілік үшін аса маңызды.

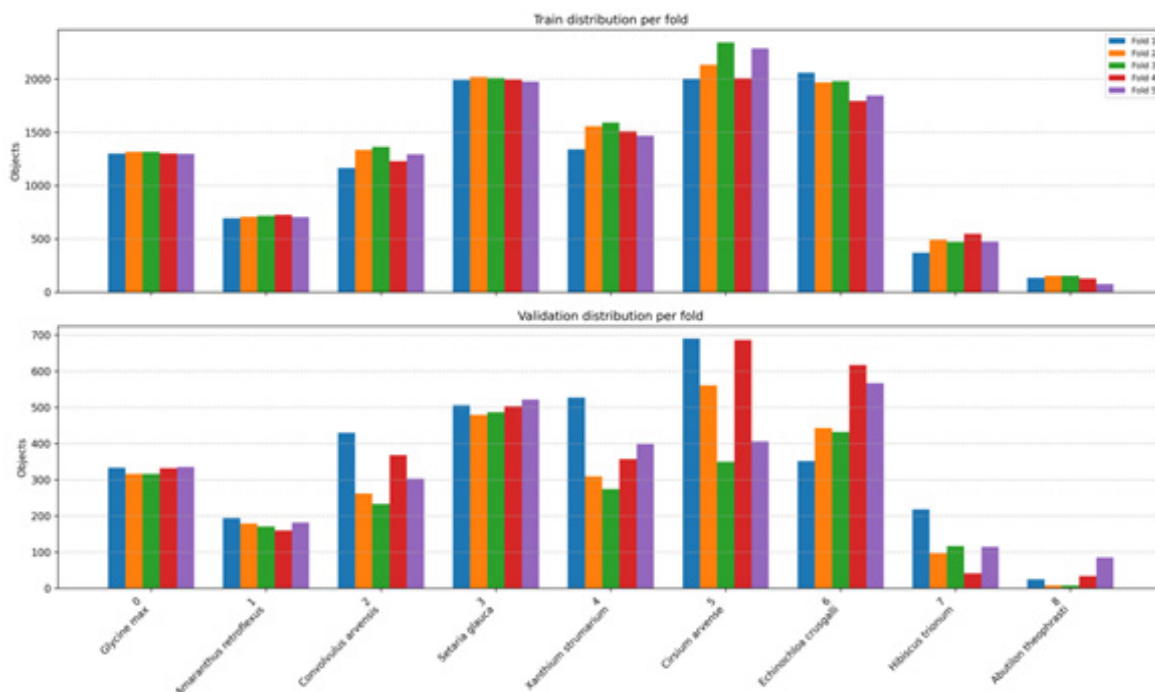
Нәтижелер мен талқылау

Арамшөптерді тану үшін YOLO (YOLOv4, YOLOv7, YOLOv8) алдын ала дайындалған модельдері қолданылды. Бұл модельдер нақты уақыттағы жоғары дәлдігі мен өнімділігімен ерекшеленеді. YOLO архитектурасы объектілерді анықтау мен оларды бір өту кезінде жіктеуді

біріктіреді, бұл суреттерді жылдам өңдеуге мүмкіндік береді. Бұл қасиет ауылшаруашылық жерлерінің аэрофотосуреттерін талдау кезінде аса маңызды.

YOLOv4 (2020) дәлдік пен жылдамдықты арттырды, YOLOv7 (2022) архитектурадағы және оқыту әдістеріндегі жетілдірулерді енгізді, ал YOLOv8 (2023) бейнелерді өңдеудің заманауи тәсілдерін, соның ішінде self-attention және трансформерлерді қолданады. YOLOv8-дің негізгі артықшылықтарының бірі – объектілерді трекинг жасау алгоритмі, ол арамшөптерді әртүрлі кадрларда бақылап, санау барысында олардың қайталануын болдырмайды, бұл талдау дәлдігі мен тиімділігін арттырады.

Алдымен 390 суреттен тұратын бастапқы деректер жиынтығы пайдаланылды, ол StratifiedKFold әдісі (sklearn кітапханасынан) арқылы 0.2 үлеспен 5 фолдқа бөлінді. 3-суретте әрбір фолдтағы, сондай-ақ оқыту және валидация жиынтықтарындағы сыныптардың таралуы егжей-тегжейлі көрсетілген. YOLOv4, YOLOv7 және YOLOv8 модельдері, сондай-ақ U-Net 300 эпох бойы оқытылды. Эксперименттердің нәтижесінде 1-кестеде көрсетілген деректер алынды. Бұл метрикалардың мәндері туралы толық мәліметті [4]-тен табуға болады.



Сурет 3 – Оқыту және валидация бөліктері үшін кластардың бөлінісі

Кесте 1 – аугментацияға дейінгі модельдің тану сапасының көрсеткіштері

Модель	mAP0.5-95	mAP0.5	precision	recall
YoLov8	0.51511	0.849	0.83931	0.809
YoLov7	0.50931	0.834	0.8193	0.7991
YoLov4	0.5116	0.8317	0.824	0.7842
U-net	0.5126	0.8328	0.828	0.802

Мұндағы деректер барлық фолдтар бойынша орташа мән ретінде алынған. Қолжеткізілген нәтиже жеткілікті жоғары болмағандықтан, деректерді күшейту арқылы оқу деректер жиынтығының көлемін ұлғайту туралы шешім қабылданды. Бұл үшін кескіндерді түрлендірудің

әртүрлі әдістерін қолданатын, жаңа вариациялар жасап, бастапқы деректерді кеңейтетін арнайы құрал – күшейткіш (augmenter) жасалды.

Бұл құрал келесі негізгі компоненттерді қамтитын класқа негізделген: өңделген деректерді сақтау жолы, процесті бақылау функциясы, қажетті жаңа кескіндер саны, бастапқы деректерге қолданылатын түрлендірулер тізімі, жасалған кескіндердің қорытынды жиынтығы және объектілер кластарының есептегіштері.

Кластық әдістері деректерді өңдеудің негізгі функцияларын орындайды. `load_data` әдісі кескіндерді жүктейді, оларды RGB форматына түрлендіреді, аннотацияларды (bounding boxes) шығарып, класс есептегіштерін жаңартады. `load_label` әдісі объектілер белгілерін келесі форматта оқиды: класс атауы, орталық координаттарының нормаланған мәндері және жақтау өлшемдері.

Негізгі күшейту алгоритмі `run` әдісінде жүзеге асырылады. Бұл әдіс объектілердің санын ескере отырып, суреттерді кездейсоқ таңдайды, оларға берілген түрлендіру тізбегін қолданады және нәтижелерді топтап (batch) сақтайды. `save_batch_data` әдісі алынған кескіндерді тиісті қалталарға жазады, ал `save_bb` аннотацияларды бастапқы форматта сақтайды.

Аугментациялық операцияларға суретті кездейсоқ айналдыру, масштабтау және ығыстыру (bounding boxes координаталарын түзете отырып), сондай-ақ гаусстық шуды қосу, жарықтылықты, контрастылықты және қанықтылықты реттеу, бұлыңғырлату кіреді. Геометриялық түрлендірулер аннотацияланған нысандардың координаталарын қайта есептеумен қатар жүреді, бұл белгілеудің дұрыстығын қамтамасыз етеді. Код деректер жиынтығын автоматты түрде кеңейтіп, әртараптандырады, бұл компьютерлік көру модельдерінің оқыту сапасын арттыру үшін аса маңызды.

Осы мақсатта Albumentations кітапханасы пайдаланылды. Трансформациялар конвейері келесі түрде болды:

- ♦ `Affine` (масштабтау) – бейненің масштабын 0.9 бен 1.1 аралығында кездейсоқ өзгерту (ықтималдығы $p = 0.7$). Бұл модельдің нысандар өлшемдерінің шамалы өзгерістеріне төзімділігін арттырады.

- ♦ `HorizontalFlip` – бейнені горизонталь бағытта аудару ($p = 0.5$). Нысандардың симметриялы нұсқаларын ескеруге көмектеседі.

- ♦ `VerticalFlip` – бейнені вертикаль бағытта аудару ($p = 0.5$). Нысандар төңкерілген түрде кездескен жағдайларда пайдалы.

- ♦ `Rotate` – бейнені $\pm 15^\circ$ шегінде кездейсоқ бұру ($p = 0.7$). Бұл модельдің нысандардың бекітілген бағдарынан тәуелділігін төмендетеді.

- ♦ `RandomBrightnessContrast` – жарықтылық пен контрастылықты ± 0.2 -ге дейін өзгерту ($p = 0.4$). Бұл қадам әртүрлі жарықтандыру жағдайларын модельдейді.

- ♦ `ISONoise` – цифрлық камераларға тән шу қосу ($p = 0.2$). Бұл модельдің “шулы” бейнелерге төзімділігін қамтамасыз етеді.

- ♦ `PadIfNeeded` – бейненің минималды өлшемін 480×480 ету үшін жиек (padding) қосу. Қажет болған жағдайда қара түспен (`fill = 0`) толтырылады. Қолдану ықтималдығы $p = 1.0$ (әрқашан).

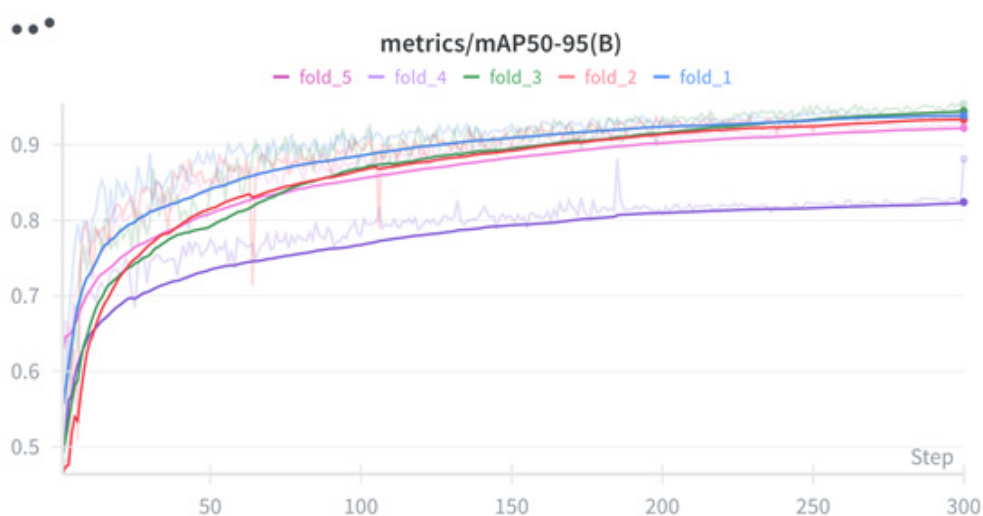
- ♦ `RGBShift` – әрбір R, G, B арнасына ± 8 бірлікке дейін кездейсоқ ығысу енгізу ($p = 0.1$). Мұндай аугментация түсті берудегі бұрмалануды модельдейді.

Нәтижесінде оқыту жиынтығында 1312 суреттен тұратын деректер жиынтығы қалыптастырылды. Олардың негізінде модельдерді оқыту жүргізілді, әрбірі 300 эпоха бойы оқытылды.

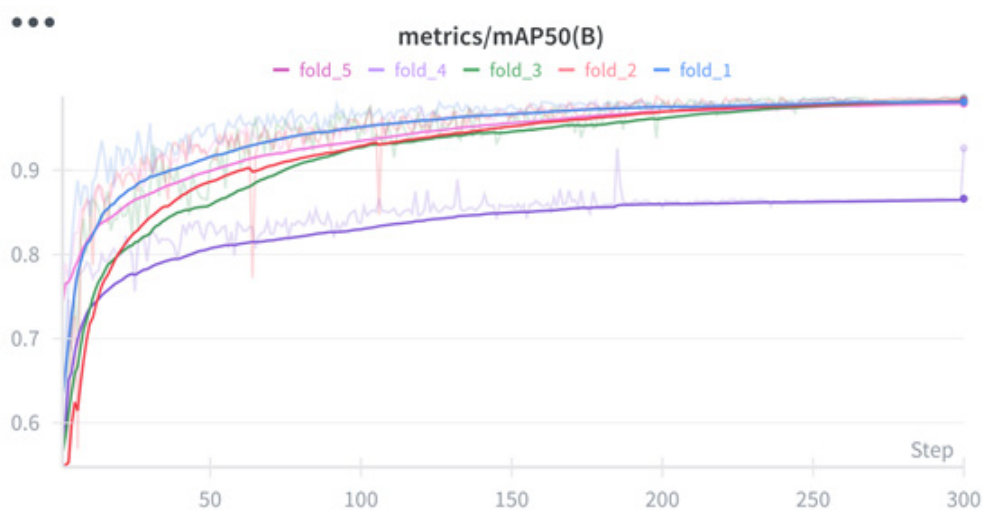
Нәтижелер 4–7 суреттерде соя алқабы үстіндегі алғашқы ұшу кезінде модельді оқыту процесін сипаттайтын графиктер түрінде ұсынылған. Бұл графиктерде X осі – эпохалар саны, ал Y осі – метрика мәндері.

Кесте 2 – аугментациядан кейінгі модельдің тану сапасының көрсеткіштері

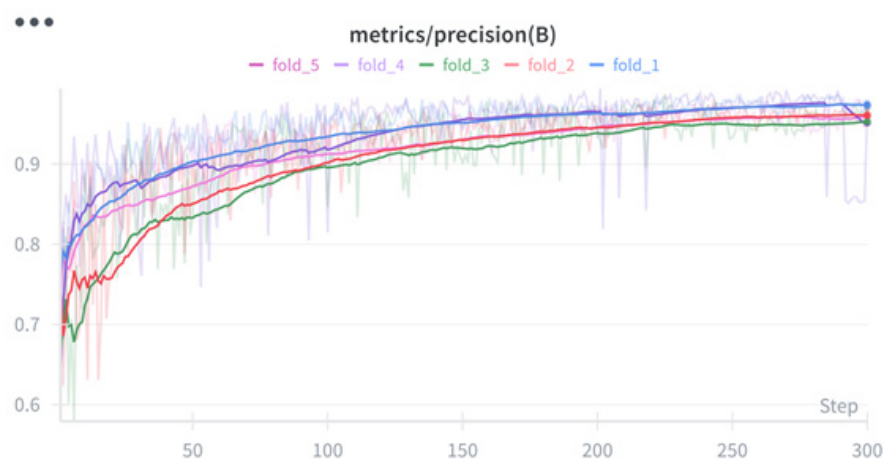
Модель	mAP0.5-95	mAP0.5	precision	recall
YoLov8	0.929	0.97316	0.97	0.9185
YoLov7	0.919	0.955	0.947	0.907
YoLov4	0.923	0.951	0.952	0.890
U-net	0.925	0.955	0.957	0.912



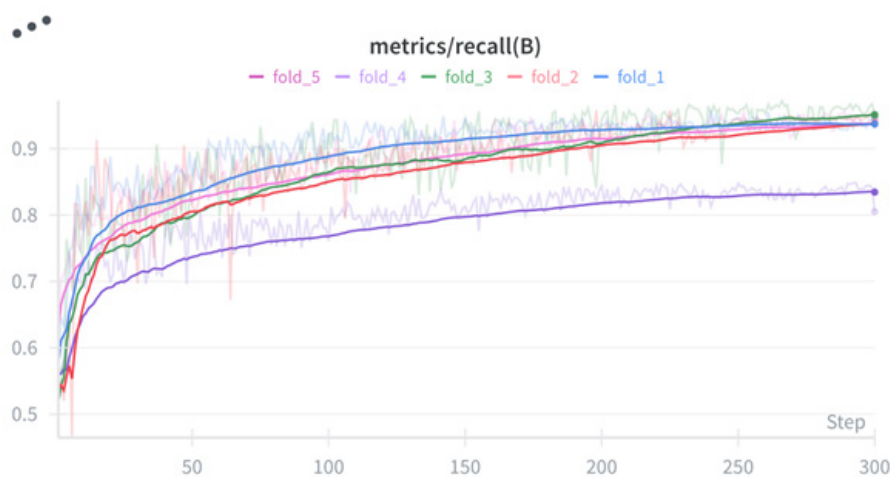
Сурет 4 – YOLOv8 үшін mAP0.5–0.95 метрикасы



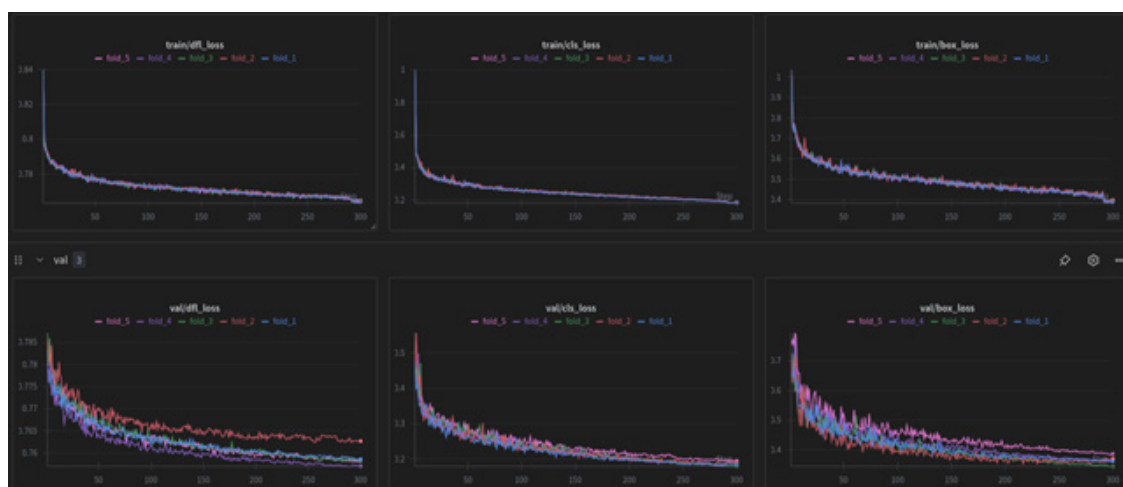
Сурет 5 – YOLOv8 үшін mAP0.5 метрикасы



Сурет 6 – YOLOv8 үшін дәлдік (Precision) метрикасы



Сурет 7 – 1-ұшым үшін толықтық (Recall) метрикасы



Сурет 8 – Фолдтар бойынша шығын функцияларының (train/val) динамикасы

Берілген деректерді талдау YOLOv8 моделінің 1 312 аугменттелген суретте оқытылған кезде толықтық (0.9185), дәлдік (0.97) және mAP50 (0.97316) бойынша ең жоғары нәтижелерге қол жеткізгенін көрсетеді.

Объектілерді санау сапасын бағалау үшін ұзақтығы 5 минуттық, БПЛА көмегімен түсірілген сол алқаптың бейнежазбасы пайдаланылды, онда барлық өсімдіктер қолмен саналды.

Кесте 3 – Арамшөптер кластарында YOLO классификациясының сапасы туралы есеп

Класс	Нақты	Болжамды	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1
Glycine max	4282	4158	4158	28	96	0.9933	0.9774	0.985
Amaranthus retroflexus	6155	4419	4419	0	1736	1	0.72	0.84
Convolvulus arvensis	385	289	214	61	14	0.778	0.939	0.85
Setaria glauca	385	421	385	32	4	0.923	0.99	0.955
Xanthium strumarium	513	2141	513	1628	0	0.24	1	0.39
Cirsium arvense	532	173	136	9	28	0.938	0.829	0.88
Echinochloa crusgalli	15	128	15	100	13	0.13	0.536	0.209
Hibiscus trionum	27	18	12	2	4	0.857	0.75	0.8
Abutilon theophrasti	2458	2437	2355	82	103	0.97	0.96	0.96
Жалпы статистика	14752	14184				Micro=0.863 / Macro=0.758	Micro=0.859 / Macro=0.855	Micro=0.861 / Macro=0.763

Кестеде тоғыз өсімдік класы бойынша YOLO моделінің болжам нәтижелері нақты деректермен салыстырылып көрсетілген. Әрбір класс үшін таңбаланған объектілер саны (нақты), модель болжаған объектілер саны, TP (шын оң), FP (жалған оң) және FN (жалған теріс) мәндері берілген. Сонымен қатар сапа метрикалары есептелді: Precision, Recall және F1-score. Кестенің соңында барлық кластар бойынша жиынтық жол ұсынылған: нақты объектілер саны, модель болжаған объектілер саны және Micro мен Macro метрикаларының жиынтық мәндері.

Осы артықшылықтардың нәтижесінде алдын ала дайындалған YOLO модельдері өсімдіктерді дәл және жедел картаға түсіруді қамтамасыз ететін, аграрлық технологиялар саласында сұранысқа ие тиімді құралға айналуға.

Картаға түсіру жүйесін әзірлеу. Бұл жұмыста ауыл шаруашылық алқаптарындағы арамшөптерді автоматты түрде анықтау үшін ҰҰА деректерін, компьютерлік көру алгоритмдерін және кескіндерді өңдеу әдістерін біріктіретін картографиялау жүйесі жасалды.

Ауылшаруашылық жерлерінің карталарын құру үшін жоғары ажыратымдылықтағы камералармен жабдықталған ұшқышсыз ұшу аппараттарынан (дрондардан) алынған мәліметтер негіз ретінде пайдаланылды. Ауадан түсірілген суреттер өңделіп, арнайы бағдарламалық жасақтаманың көмегімен бірыңғай картаға біріктіріледі.

Бұл процесті жүзеге асыру үшін бірнеше негізгі кадамдарды орындайтын Python тілінде модуль әзірленді. Ең алдымен, әр кескіннің EXIF метадеректерінен GPS координаттары мен

түсіру биіктігі секілді мәліметтер алынады. Кейін осы деректер негізінде кескіндегі әрбір пиксель үшін географиялық координаттар есептеледі.

Одан соң әрбір бастапқы сурет бойынша географиялық координаттармен байланыстырылған уақытша GeoTIFF форматындағы файлдар жасалады. Соңғы кезеңде барлық уақытша файлдар біріктіріліп, жоғары ажыратымдылықтағы мозаикалық карта құрастырылады.

Модульді әзірлеу барысында OpenCV [6], Pillow [7], GDAL [8] және Rasterio [9] кітапханалары қолданылды. Нәтижесінде алынған шешім аэрофототүсірілімдердің нақты гео-референциясын қамтамасыз етіп, әрі қарай талдауға жарамды ауылшаруашылық алқаптарының толықтай карталарын жасауға мүмкіндік береді.



Сурет 9 – 395 RGB сурет негізінде құрылған жиынтық картаның мысалы

Тестілеу AMD Ryzen 9 6900HX (16 ядро) процессоры мен 32 Гбайт жедел жады бар жүйеде жүргізілді. Жүйе 4000×2250 пиксель ажыратымдылықтағы суреттерді өңдеу кезінде картаға түсіру процесін орындады.

Кесте 4 – Картаға түсіру жүйесінің ресурстарды пайдалану көрсеткіштері

Өңделген суреттер саны	Оперативті жадыны барынша тиімді пайдалану	Орындалу уақыты (секундпен)	қорытынды файлдың (картаның) мөлшері
100	1336	20.9	1100
400	5741	112.5	5200

10-суреттегі ұсынылған алгоритм (сол жақта) ортофотожоспарларды жоғарырақ детализациямен алуға мүмкіндік береді, соның арқасында өсімдіктердің айқын шекаралары мен қатар құрылымы сақталады. Ал WebODM (оң жақта) пикселизация мен реконструкция артефактыларына ұшыраса, біздің тәсіл автоматтандырылған талдауға да, агрономдардың визуалды интерпретациясына да жарамды деректерді қамтамасыз етеді.



Сурет 10 – Ұсынылған алгоритм арқылы жасалған біріктіру нәтижесін және WebODM арқылы құрылған ортофотожоспарды салыстыру (оң жақта – WebODM).

Аэрофотосуреттерде арамшөптер мен басқа объектілерді дәл картаға түсіру үшін компьютерлік көру алгоритмдері мен нейрондық желілер, атап айтқанда YOLO модельдері қолданылады. Бұл модельдер анықтаудың жоғары жылдамдығы мен дәлдігін қамтамасыз етеді. Анықталған арамшөптердің координаттары суреттердің метадеректері мен карта желімдеу модулінің алгоритмдері арқылы географиялық деректерге түрлендіріледі. Осылайша, жүйе арамшөптерді анықтап қана қоймай, олардың ауылшаруашылық жерлеріндегі нақты орналасуын картаға түсіреді. Бұл деректер агротехникалық шараларды уақтылы және нүктелік түрде жүзеге асыру үшін маңызды.

Жүйені сынау және жөндеу. Жүйені сынау және жөндеу процесі оның сенімділігі мен өнімділігін қамтамасыз етуге бағытталған бірнеше кезеңнен тұрады.

Модульдік тестілеу – жүйенің жеке компоненттерінің жұмысын тексереді. Бұл үшін негізгі тестілеу сыныбы пайдаланылады және ол әртүрлі функциялар мен әдістерді тексеруге оңай кеңейтіледі.

Интеграциялық тестілеу – `urls.py` файлында анықталған маршруттар бойынша жүйе модульдерінің өзара әрекеттесуін тексереді.

Жүйелік тестілеу – бүкіл жүйенің жұмысын, соның ішінде функционалдық және функционалдық емес талаптарды бағалайды. `views.py` модуліндегі көріністер пайдаланушы сұрауларын өңдейді (мысалы, тіркеу, аутентификация, жобаларды басқару және т.б.).

Тестілеуді автоматтандыру үшін Celery қолданылады, ол тапсырмаларды асинхронды түрде орындап, жалпы тестілеу уақытын қысқартады.

Логинг жүйенің күйі мен кателерін бақылауға мүмкіндік береді, ал отладка (debugging) шарттарды тексеру және отладкалық хабарламалар арқылы кателерді нақты табуға көмектеседі.

Профильдеу – жүйенің жұмысындағы тар орындарды анықтау үшін маңызды. Мысалы, кескін мозаикасын құрастыру және GPS координаттарын есептеу секілді процестерді оңтайландыру арқылы жүйенің жалпы өнімділігін айтарлықтай жақсартуға болады.

Қорытынды

Жүргізілген талдау деректерді күшейту әдістерін қолдану оқыту деректер жиынтығын кеңейту арқылы арамшөптерді тану мәселесінде компьютерлік көру үлгілерінің тиімділігін едәуір арттыратынын көрсетті.

Бірінші ұшу үшін ең жоғары нәтижелерге 1000 кеңейтілген кескінде дайындалған модель қол жеткізді, негізгі көрсеткіштер бойынша мынадай мәндер тіркелді: толықтығы – 0.89902, дәлдігі – 0.93823, mAP50 – 0.90793.

Екінші ұшу үшін ең үздік нәтиже 3000 толықтырылған кескінмен оқытылған модельге тиесілі болды, оның көрсеткіштері: толықтығы – 0.80230, дәлдігі – 0.90966, mAP50 – 0.83954, mAP50-95 – 0.74113.

Бұл нәтижелер кескіндерді күшейту әдістерін қолдану модельдердің арамшөптерді тану мүмкіндігін жақсартып, толықтық пен дәлдік көрсеткіштерін арттыратынын растайды. Алайда әрбір нақты тапсырма үшін толықтырылған кескіндердің оңтайлы санын жеке таңдау қажет, себебі деректер көлемінің шамадан тыс ұлғаюы әрдайым нәтиженің жақсаруына әкелмейді.

Сонымен қатар, ҰҰА деректеріне негізделген карта желімдеу әдісі аэрофотосуреттерді геореференциялаудың жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді. EXIF деректерінен алынған мета-ақпарат негізінде әр пиксельдің географиялық координаттарын есептеу және GeoTIFF форматында суреттерді біріктіру ауылшаруашылық алқаптарының жоғары дәлдіктегі карталарын жасауға мүмкіндік береді. Бұл картада арамшөптер мен басқа нысандар нақты географиялық координаттармен белгіленеді, бұл агротехникалық шараларды уақтылы және нүктелік орындауға мүмкіндік береді.

Осылайша, заманауи компьютерлік көру алгоритмдерін және деректерді күшейту әдістерін қолдану негізінде егіншілікке кедергі келтіретін факторларды картаға түсіру және тану жүйесі арамшөптерді дәл анықтау мен жіктеу мәселесінде жоғары тиімділікті көрсетті. Мұндай жүйені ауыл шаруашылығында қолдану агротехникалық процестерді оңтайландыруға, шығындарды азайтуға және жалпы өнімділікті арттыруға кең мүмкіндік береді.

Қаржыландыру туралы ақпарат. Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды: №AP23488745 «Төмен биіктіктегі ұшқышсыз ұшу платформаларын қолдана отырып, топырақтың тұздылығын жедел бағалау», №BR24992908 «Жасанды интеллект негізіндегі мониторинг құралдары мен әдістері кешені (Agroscope) базасында өсімдік шаруашылығындағы агротехникалық іс-шараларды қолдау жүйесі».

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Mohsan, S.A.H., Othman, N.Q.H., Li, Y. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Practical Aspects, Applications, Open Challenges, Security Issues, and Future Trends. *Intelligent Service Robotics*, 16, 109–137 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4>.
- 2 Rovira-Sugranes, A., Razi, A., Afghah, F., Chakareski, J. A Review of AI-Enabled Routing Protocols for UAV Networks: Trends, Challenges, and Future Outlook. *Ad Hoc Networks*, 130, 102790 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.102790>.
- 3 Shadrin, D. и др. Weed Detection on Embedded Systems Using Computer Vision Algorithms. *Computer Optics*, 49 (1), 85–101 (2025). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1454>.
- 4 Mumuni, A., Mumuni, F. Data Augmentation with Automated Machine Learning: Approaches and Performance Comparison with Classical Data Augmentation Methods. *arXiv preprint*, 1, 1–29 (2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.08352>.
- 5 Adaev, N., Amaeva, A., Israfilova, M. Monitoring the State of Agricultural Lands in the Chechen Republic Using GIS Technologies. *Reliability: Theory & Applications*, 19 (6 (81)), 189–207 (2024).
- 6 OpenCV [Electronic resource]. Available at: <https://docs.opencv.org/master/> (accessed: 05.04.2025).
- 7 Pillow [Electronic resource]. Available at: <https://pillow.readthedocs.io/> (accessed: 25.04.2025).
- 8 GDAL [Electronic resource]. Available at: <https://gdal.org/documentation/> (accessed: 25.04.2025).
- 9 Rasterio [Electronic resource]. Available at: <https://rasterio.readthedocs.io/> (accessed: 25.04.2025).

^{1,2}**Смурыгин В.В.,**

бакалавр, инженер-программист ORCID ID: 0009-0009-8699-159X,

e-mail: valentinsmurygin@gmail.com

^{2*}**Еримбетова А.С.,**

PhD, к.т.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-2013-1513,

*e-mail: aigerian@mail.ru

^{1,2}**Кучин Я.И.,**магистр, с.н.с., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5271-9071>,

e-mail: ykuchin@mail.ru

^{1,2}**Сымагулов А.,**

магистр, инженер-программист, ORCID ID: 0000-0001-9974-3215,

e-mail: asmogulove00@gmail.com

¹Satbayev University, г. Алматы, Казахстан²Институт информационных и вычислительных технологий, г. Алматы, Казахстан

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КАРТИРОВАНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ФАКТОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация

Современное сельское хозяйство сталкивается с рядом серьезных вызовов, включая климатические изменения, ухудшение состояния почв, нехватку водных ресурсов, биологические угрозы и негативное влияние антропогенных факторов. Особое место среди этих проблем занимает засоренность полей, требующая точного мониторинга и своевременного реагирования. Данное исследование посвящено разработке системы автоматического распознавания и картирования сорняков с высокой геопространственной точностью на основе данных БПЛА. Предложенный подход включает применение алгоритмов компьютерного зрения для детекции сорняков, методы аугментации данных для повышения точности распознавания и авторский метод склеивания карт для обеспечения точной геопривязки выявленных сорных растений. Экспериментальные испытания подтвердили эффективность разработанной системы в задачах автоматического выявления сорняков и создания геопривязанных карт их распространения. Внедрение данной системы позволит сельхозпроизводителям проводить точечную обработку засоренных участков, оптимизировать использование гербицидов и повысить эффективность борьбы с сорной растительностью.

Ключевые слова: картирование, дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), компьютерное зрение, аугментация данных.

^{1,2}**Smurygin V.V.,**

Bachelor, Software Engineer, ORCID ID: 0009-0009-8699-159X,
e-mail: valentinsmurygin@gmail.com

^{2*}**Yerimbetova A.S.,**

PhD, Cand.Tech.Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-2013-1513,
*e-mail: aigerian@mail.ru

^{1,2}**Kuchin Y.I.,**

Master, Senior Researcher, ORCID ID: 0000-0002-5271-9071,
e-mail: ykuchin@mail.ru

^{1,2}**Symagulov A.,**

Master, Software Engineer, ORCID ID: 0000-0001-9974-3215,
e-mail: asmogulove00@gmail.com

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan

INTELLIGENT MAPPING AND FACTOR RECOGNITION SYSTEM BASED ON REMOTE SENSING AND COMPUTER VISION TECHNOLOGIES

Abstract

Modern agriculture faces a number of serious challenges, including climate change, soil degradation, water scarcity, biological threats and the negative impact of anthropogenic factors. A special place among these challenges is occupied by field weediness, which requires accurate monitoring and timely response. This study is devoted to the development of a system for automatic recognition and mapping of weeds with high geospatial accuracy based on UAV data. The proposed approach includes the application of computer vision algorithms for weed detection, data augmentation techniques to improve recognition accuracy, and the author's map splicing method to provide accurate geo-referencing of detected weeds. Experimental tests confirmed the effectiveness of the developed system in the tasks of automatic detection of weeds and creation of geo-referenced maps of their distribution. Implementation of this system will allow agricultural producers to carry out spot treatment of weedy areas, optimize the use of herbicides and increase the efficiency of weed control.

Keywords: mapping, remote sensing, unmanned aerial vehicles (UAVs), computer vision, data augmentation.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 26.06.2025

ӘОЖ 004.021
FTAMP 28.23.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-176-185>

¹**Құсайын Д.Р.,**

бакалавр, бағдарламалық жасақтама инженері, ORCID ID:0009-0001-2680-5443,
e-mail: diac.kusain@gmail.com

^{1,2}**Мухамедиев Р.И.,**

и.ғ.д., профессор, қолданбалы машиналық оқыту зертханасының меңгерушісі,
ORCID ID: 0000-0002-3727-043X,
e-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com

^{2*}**Еримбетова А.С.,**

PhD, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, жетекші ғылыми қызметкер,
ORCID ID: 0000-0002-2013-1513,
*e-mail: aigerian@mail.ru

²**Кучин Я.И.,**

магистр, аға ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0000-0002-5271-9071,
e-mail: ykuchin@mail.ru

²**Сымагулов А.,**

магистр, бағдарламалық жасақтама инженері,
ORCID ID: 0000-0001-9974-3215,
e-mail: asmogulove00@gmail.com

¹Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

²Ақпараттық және есептеу технологиялары институты,
Алматы қ., Қазақстан

ҰШАҚ МАРШРУТТАРЫН ТИІМДІЛЕУ АЛГОРИТМІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЕНГІЗУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу ұшқышсыз ұшу аппараттары (ҰҰА) үшін бағытты тиімділеу алгоритмін әзірлеуге және енгізуге бағытталған. Мақсат – қоршаған орта мен ауылшаруашылық салаларында ҰҰА-дан деректерді жинау және талдау процесін автоматтандыру үшін пайдалануға болатын жүйені құру. Жүйе Python, QGroundControl және MAVLink байланыс протоколы арқылы құрастырылған. Әзірленген жүйе қоршаған ортаны бақылау және картаға түсіру тапсырмаларының тиімділігін арттыру мақсатында ҰҰА-ның ұшу бағыттарын тиімділеуге бағытталған. Ол қоршаған орта мен ауыл шаруашылығы жерлерінің жай-күйі туралы нақты және дер кезінде ақпарат алуға мүмкіндік беретін деректерді жинау және талдау процесін автоматтандырады. Жүйені сынау нәтижелері оның нақты жағдайда жоғары тиімділігін көрсетеді. Осы зерттеудің нәтижелері ұсынылған маршрутты тиімділеу алгоритмін әртүрлі экологиялық және ауылшаруашылық жағдайларда сәтті қолдануға болатынын көрсетеді. Сондай-ақ жұмыста жүйені одан әрі дамыту оның мүмкіндіктерін кеңейту және басқа салаларда пайдалану ұсынылады.

Тірек сөздер: ҰҰА, генетикалық алгоритм, қоршаған ортаны бақылау, MAVLink хаттамасы, Scoop.

Кіріспе

Ауыл шаруашылығы, карта жасау, қоршаған ортаны бақылау және ойын-сауық сияқты әртүрлі салаларда ҰҰА пайдалану қарқынды түрде кеңейіп келеді. Сонымен қатар, адамның араласуынсыз кең ауқымды тапсырмаларды орындай алатын автономды жерүсті көліктеріне сұраныс артып келеді. Бұл тенденция әртүрлі ҰҰА мен жердегі құрылғылар арасында тиімді

үйлестіруді және синхрондауды қамтамасыз ету үшін озық басқару жүйелерін әзірлеуді талап етеді [1, 3–5]. Ұшқышсыз ұшу аппараттары мен жерүсті жабдықтарын басқарудың қолданыстағы әдістері көбінесе бұл жүйелерді бөлек бағыттайды, бұл олардың бірге жұмыс істеу мүмкіндігін шектейді. Бүгінде мұндай нәтижелер операторға тәуелділікті және автономия деңгейінде еместігін көрсетеді [2, 4, 5]. Бұл факторлар динамикалық және күрделі нақты орталарда жұмыс істегенде осы жүйелердің тиімділігі туралы сұрақтар тудырады [2, 7].

Бұл зерттеудің мақсаты – Python, QGroundControl және MAVLink байланыс хаттамасын пайдалана отырып, ұшқышсыз ұшатын аппараттарды (ҰҰА) және жерүсті көліктерін басқарудың интеграцияланған жүйесін әзірлеу. Ұсынылып отырған жүйе ҰҰА мен жерүсті жабдықтарының автономды өзара әрекеттесуін қамтамасыз етуге, генетикалық алгоритмді пайдаланады. Ол сондай-ақ маршруттарды тиімділеуге және әр түрлі қоршаған орта жағдайларына бейімделуге арналған [1, 3, 4]. Бұл жұмыста келесідей тапсырмаларды орындау қарастырылған: 1. MAVLink хаттамасын зерттеу және оны ұшқышсыз ұшу аппараттарын басқаруда қолдану; 2. ҰҰА басқару платформасы ретінде QGroundControl функционалдығын бағалау; 3. ҰҰА және жерүсті жабдықтардан тұратын кешеннің басқару жүйесінің архитектурасын әзірлеу; 4. Маршрутты тиімділеудің генетикалық алгоритмін жүзеге асыру; 5. Әртүрлі сценарийлерде әзірленген жүйенің тиімділігін сынау және бағалау. Бұл зерттеудің нәтижелері ҰҰА-ны және жерүсті аппараттарын үйлестірілген басқаруды қажет ететін әртүрлі салаларда әлеуетті түрде қолданылуы мүмкін. Олардың қатарында логистика, ауыл шаруашылығы, іздестіру-құтқару жұмыстары және интеллектуалды көлік жүйесін дамыту сияқты салалар бар.

Материалдар мен әдістер

Осы мақсаттарға қол жеткізу үшін зерттеуде келесі материалдар мен әдістер қолданылды: ҰҰА байланыс және басқару үшін негіз ретінде қызмет ететін MAVLink хаттамасын зерделеу және талдау; ұшқышсыз ұшатын аппараттарды басқарудың негізгі құралы ретінде QGroundControl бағдарламалық қамтамасыз ету мүмкіндіктерін талдау, оның ішінде оны орнату және конфигурациялау [9]; негізгі құрамдас бөліктерді және өзара әрекеттесу интерфейстерін сәйкестендіруді қоса алғанда, ҰҰА-ның және жердегі басқару жүйесінің құрылымы мен архитектурасын жобалау; ҰҰА-ның бағыттарын тиімділеудің генетикалық алгоритмін енгізу және конфигурациялау, оның ішінде уақыт пен энергия шығындарын барынша азайту үшін әлеуетті маршруттарды құру және бағалау әдістемесін әзірлеу; әзірленген жүйені әртүрлі жағдайларда сынақтар мен апробациялау, соның ішінде имитациялық және далалық сынақтар, содан кейін жүйенің тиімділігі мен сенімділігін бағалау осы материалдар мен әдістер ҰҰА-ын басқару жүйелерін әзірлеуді және зерттеуді қолдау үшін таңдалды. Әртүрлі қолданбалы аймақтарда автономды өзара әрекеттесу мен маршрутты тиімділеуге қол жеткізу үшін ҰҰА және жерүсті көліктері қоршаған орта мен ауылшаруашылық мониторингін жеңілдетуге бағытталған ұшқышсыз және жерүсті көлік құралдарын басқару жобасы үшін әртүрлі құралдар мен әдістемелер таңдалды. Олардың әрқайсысы бірегей және біздің мақсаттарымызға жетуге үлес қосады [6]:

1. QGroundControl: Бұл ұшқышсыз ұшуларды жоспарлауға арналған үлкен карта сияқты. Оның пайдалану оңай түймелері бар, дрондардың бірнеше түрін қолдайды және нақты уақытта дрондарды басқаруға мүмкіндік беретін MAVLink протоколын пайдаланады.

2. Python: Бұл жобада қолданатын негізгі бағдарламалау тілі. Өте қарапайым, икемді және есептеулер мен деректерді талдау үшін көптеген кітапханаларды қамтиды. Python көмегімен деректер туралы ғылым бағдарламаларын оңай жаза алуға және интеллектуалды алгоритмдер жасай алуға болады.

3. Numpy және Pandas: Бұл кітапханалар деректермен жұмыс істеуге көмектеседі. Numpy сандардың үлкен массивтерімен жұмыс істеу үшін жақсы, ал Pandas деректермен манипуляциялауды және уақыт серияларын талдауды жеңілдетеді.

4. Django: Бұл веб-сайттарды жасауға арналған құрылым. Оны жобаны басқару жүйесін құру және деректерді компьютер экранында көрсету үшін қолданамыз. Django қауіпсіз және масштабталатын веб-қосымшаларды жылдам әзірлеуге мүмкіндік береді [10].

5. DEAP (Distributed Evolutionary Algorithm Package): Бұл ҰҰА үшін тиімді маршруттарды табу сияқты күрделі тиімділеу мәселелерін шешуге көмектесетін генетикалық алгоритмдерді құру құралдарын ұсынатын кітапхана. Кітапхана эволюциялық алгоритмдермен жұмыс істеуге арналған және есептердің кең ауқымын шешу үшін пайдаланылуы мүмкін.

6. Scoop: Бұл кітапхана Python-да күрделі есептеулерді жылдамдату үшін пайдаланылады, бұл ҰҰА үшін маршруттарды тиімділеу сияқты уақытты қажет ететін мәселелерді шешуді жеңілдетеді.

7. Random: Кездейсоқ модуль генетикалық алгоритмдердің жұмыс істеуі үшін қажет кездейсоқ сандарды жасайды.

8. JSON (JavaScript Object Notation): JSON әртүрлі жүйе құрамдастары арасында деректер алмасу үшін пайдаланылады, бұл деректерді тасымалдауды және алуды жеңілдетеді.

9. SQLite: Бұл жеңіл деректер Python қолдайтындықтан және деректерді сақтау мен басқаруда жақсы өнімділікті қамтамасыз ететіндіктен таңдалды. [13].

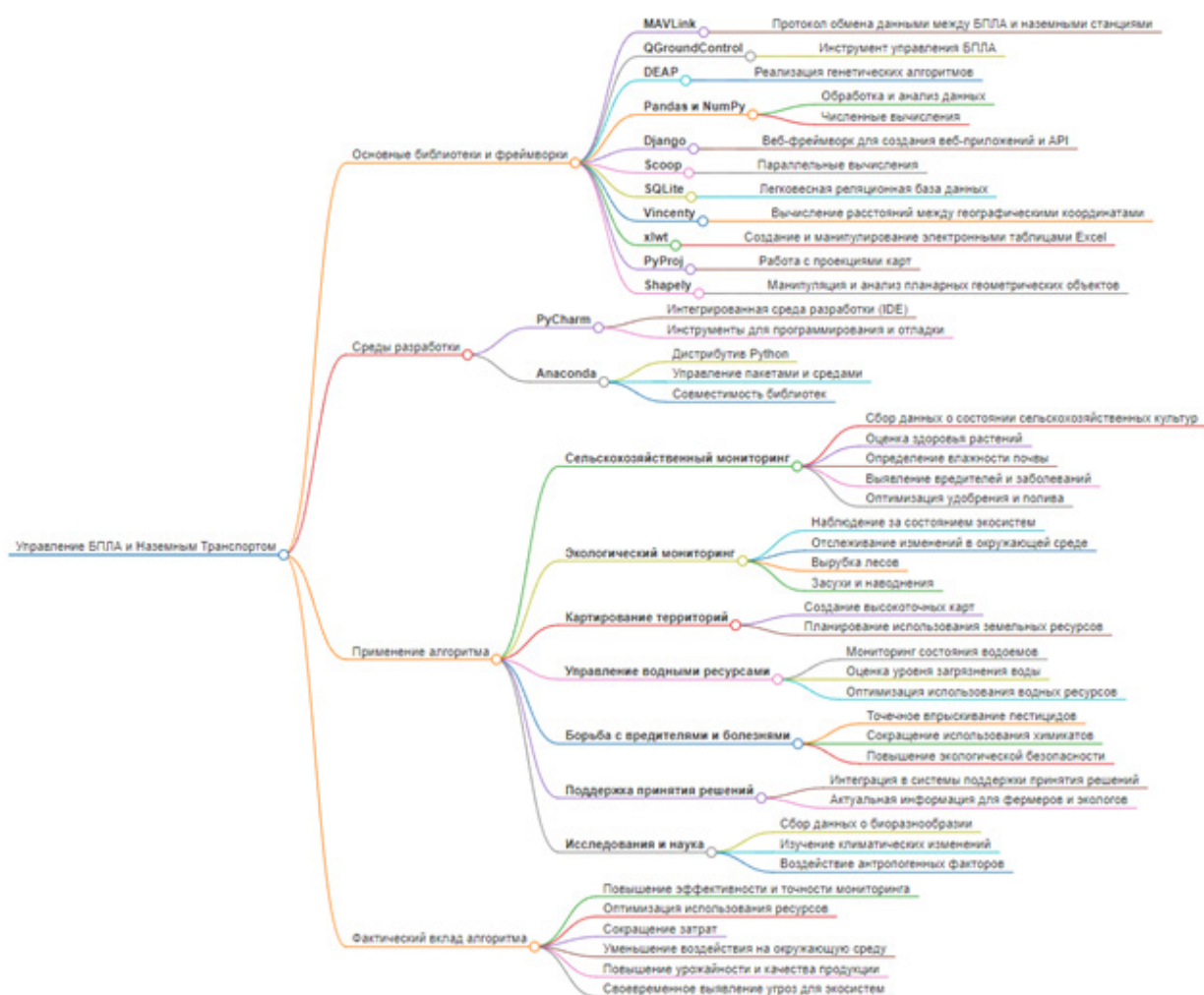
Бұл құралдар мен тәсілдердің барлығы жобаны қуатты және икемді ету үшін біріктірілген. Олар деректерді жинауға, өңдеуге және талдауға, сондай-ақ ұшқышсыз ұшу аппараттарының бағыттарын тиімділеуге көмектеседі. QGroundControl-дің MAVLink-пен интеграциясы миссияларды сәтті аяқтау үшін қажетті ҰҰА-ны сенімді басқаруды және нақты уақыт режимінде бақылауды қамтамасыз етеді. Басқару жүйесі бірнеше құрамдас бөліктерден тұрады: ҰҰА-ны басқару модулі, жердегі жабдықты басқару модулі және маршрутты тиімділеу модулі. Бұл компоненттер жүйенің әртүрлі элементтерінің әрекеттерін үйлестіреді, оның автономиясы мен тиімділігін арттырады. Бұл жобада жүйені ұшуды жоспарлау, нақты уақыт режимінде ұшуды бақылау және ҰҰА-ны қашықтан басқару мүмкіндігін толығымен пайдалану үшін біріктіретін боламыз. Маршрутты тиімділеу алгоритмі генетикалық алгоритмдерге негізделген. Сондай-ақ параметрлер анықталады, шешімдердің бастапқы жиынын генерацияланады, популяцияға кроссовер және мутация операторлары қолданылады, содан кейін жиынтықтан ең жақсы шешімдер таңдалынады. Бұл процесс тиімді жол табылғанша қайталанады [9].

1. Ортаны импорттау және орнату. Бірінші қадам генетикалық алгоритмдер мен параллельді есептеулер үшін қажетті кітапханалар мен модульдерді қосуды қоса алғанда, жұмыс ортасын дайындауды қамтиды. Содан кейін Django құрылымы деректерден деректерге қол жеткізу үшін конфигурацияланады [10]. Бұл алгоритмде қолданылатын миссиялар мен дрондар туралы ақпарат алу үшін маңызды. Орта Django үлгілеріне қатынасты қамтамасыз ету және деректер нысандарымен тікелей жұмыс істеу үшін конфигурацияланған.

2. Пәрмен жолы аргументін талдау. Argparse кітапханасы пәрмен жолы параметрлерін талдау үшін пайдаланылады, яғни олар: міндет идентификаторы, популяция өлшемі, міндетті аяқтаудың ең көп уақыты, рұқсат етілген орындау уақыты, максималды жылдамдық, ұрпақтар саны, мутация ықтималдығы, нәтижелерді сақтау үшін файл атауы.

3. Бағалау функциясы. Бағалау сатысы қойылған мақсаттарға жетудегі әрбір жеке шешімнің тиімділігін бағалайды. Бұл процесс бірнеше қадамдарды қамтиды: таңдалған адам негізінде миссияны орындау үшін ұшқышсыз ұшақтарды таңдау, берілген маршруттау функцияларын пайдалана отырып, бағытты есептеу, жалпы қашықтықты, ұшу уақытын, ұшу құнын және көрсетілген шектеулерден кез келген ауытқулар үшін айыппұлдарды анықтау.

4. Арақашықтық (distance): ұшқышсыз ұшуды басқару нүктелері арасындағы барлық қашықтықтардың қосындысы.



Сурет 1 – Зерттеудің негізгі құрамдас бөліктері радиалды түрде алшақтайтын жоба құрылымы

Әрбір дрон үшін оның жүріп өткен жолы Евклидтік қашықтық формуласы арқылы есептеледі:

$$distance = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(lat_{i+1} - lat_i)^2 + (lon_{i+1} - lon_i)^2}$$

Ұшу уақыты (time): дронның максималды жылдамдығы мен қашықтығына байланысты. Дронның ұшу уақыты максималды жылдамдық пен жүріп өткен қашықтыққа байланысты есептеледі:

$$time = \frac{distance}{max\_speed}$$

Ұшу құны (drone_price): дронды басқару құны мен оператордың жалақысын қамтиды. Ұшу құнына дронды басқару құны мен операторлардың жалақысы кіреді. Шығындарды есептеу формуласы:

$$drone\_price = distance \times cost\_per\_km + time \times hourly\_cost$$

Уақытты асырғаны үшін айыппұл (penalty): ұшу уақыты рұқсат етілген шектен асып кетсе қосылады. Ұшу уақыты рұқсат етілген уақыттан асып кетсе, айыппұл салынады. Айыппұлды есептеу формуласы:

$$penalty = \begin{cases} 0 \\ (time - borderline\_time) \times penalty\_rate \end{cases}$$

егер уақыт ≤ шекаралық_уақыт

егер уақыт > шекаралық_уақыт

5. Мутация функциясы. Мутация функциясы популяциядағы әртүрлілікті арттырудың белгілі бір ықтималдығы бар әрбір жеке адамның қасиеттерін өзгертеді. Ол мыналарды өзгерте алады:

- ♦ дрон қозғалысының бағыты;
- ♦ бастапқы нүкте;
- ♦ дрондардың тізімі;
- ♦ көлік қозғалыс нүктелері.

Бұл өзгерістер кездейсоқ түрде жасалады, бұл алгоритмге әртүрлі ықтимал шешімдерді зерттеуге және тиімділерін табуға мүмкіндік береді.

6. Генетикалық алгоритмді инициализациялау. Бұл кезеңде миссия деректері дерекқордан дайындалады. Содан кейін генетикалық алгоритмнің компоненттері анықталады:

- ♦ Фитнес құндылықтарын және индивидуумдарды сақтау үшін кластар құрылады.
- ♦ Функциялар жеке тұлғалардың атрибуттары үшін бастапқы мәндерді жасау үшін анықталған.

♦ Алгоритмде пайдалану үшін бағалау, кроссовер, мутация және таңдау функциялары жазылады.

7. Орындау функциясы. Бұл функция генетикалық алгоритмді іске қосады:

- ♦ Бастапқы популяция инициализацияланады.
- ♦ Әрбір ұрпақта қиылысу және мутация операторларын қолдану арқылы жаңа ұрпақтар жасалады.
- ♦ ұрпақтар бағалау функциясы арқылы бағаланады.
- ♦ келесі ұрпақ үшін ең жақсы шешімдер таңдалады.
- ♦ барлық ұрпақ нәтижелерін одан әрі талдау мақсатында файлға жазу жүргізіледі.

8. Негізгі блок. Бұл блок сценарийді тікелей іске қосқан кезде орындау функциясын іске қосады. Ол инициализациядан бастап нәтижелерді жазуға дейінгі бүкіл процестің орындалуын қамтамасыз етеді.

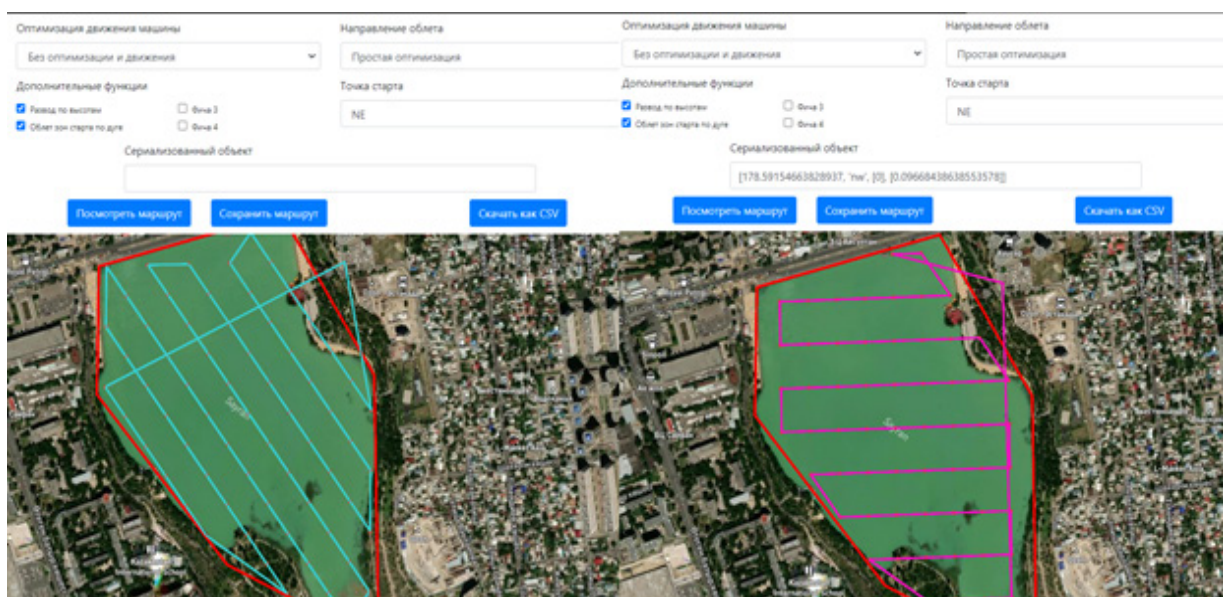
9. Пакеттің орындалуы. Бірнеше миссияларды өңдеу үшін берілген параметрлермен әрбір тапсырма үшін алгоритмді іске қосатын цикл пайдаланылады. Бұл әртүрлі деректер жиындары мен шарттары үшін алгоритмнің орындалуын автоматтандыруға мүмкіндік береді, бұл процесті тиімдірек және масштабтауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер

Бізге белгілі бір аумақты зерттеуді қажет ететін бірнеше дрондарды қамтитын миссия бар делік. Генетикалық алгоритмнің мақсаты - жалпы шығындарды, соның ішінде ұшқышсыз ұшу құнын, оператордың жалақысын және белгіленген уақыттан асып кеткені үшін айыппұлдарды азайту. Алгоритм әлеуетті шешімдердің кездейсоқ құрылған жиынтығынан басталады және оларды қиылысу және мутация процестері арқылы біртіндеп жетілдіреді. Әрбір итерацияда жаңа итерацияларды жасау үшін ең тиімді шешімдер таңдалады, бұл алгоритмге тапсырманы орындау үшін тиімді жолдарды және ресурстарды бөлуді біртіндеп анықтауға мүмкіндік береді [9].

Бұл генетикалық алгоритм қоршаған ортаны бақылау жүйесінде ҰҰА бағдарлау және жоспарлау, нақты мәселелерді шешу үшін тиімділеу әдістерін қолдануды көрсетеді. Негізгі

тұжырымдама генетикалық алгоритм операциялары арқылы потенциалды шешімдерді интерактивті түрде жақсарту, соның ішінде бағалау, қиылысу, мутация және таңдау.



Сурет 2 – Тиімділеуге дейінгі және одан кейінгі ұшу миссиясы

Берілген 2-сурет негізінде дрон ұшу маршруттарын тиімділеу алдындағы және кейінгі салыстыруды келесі кесте түрінде сипаттайық:

Кесте 1 – Дрон ұшу маршруттарының кестелік талдауы.

Сипаттамасы	Тиімділеуге дейін	Тиімділеуден кейін
Ұшу бағытының сипаты	Әртүрлі бұрыштағы хаотикалық қисық жолақтар; бағытталуы кездейсоқ.	Бір бағыттағы параллель түзулі жолақтар жүйелі, бірдей бағытталған.
Қамтылған аумақ пайызы	Орташа (~80%) – кейбір аймақтар қамтылмаған.	Жоғары (~100%) – барлық аумақ толық қамтылған.
Жолақтар құрылымы мен параллельдігі	Әр жолақ әртүрлі бұрышта орналасқан, параллельдігі жоқ.	Барлық жолақ бір-біріне параллель, тең аралықты түзулі жолақтар.
Қайталанатын ұшу траекторияларының болуы	Иә – кейбір жолақтар қабаттасып немесе екі рет өтеді.	Жоқ – әр аймақ тек бір рет қамтылған, қайталанулар жоқ.
Ұшу тиімділігі (төмен/жоғары)	Төмен – көп қайталаулар мен қосымша бұрылыстар бар.	Жоғары – қайталану жоқ, бұрылыс азайған, тиімді маршрут.

Сол жақ суретте дронның ұшу траекториялары оңтайландыруға дейінгі кезеңде көрсетілген. Бұл жолақтар бір-біріне әр түрлі бұрышта бағытталып, ретсіз орналасқан: олардың бірқатары қиылысып, кейбір учаскелер екі рет қамтылып тұр. Нәтижесінде ұшу жолы күрделі әрі тиімді емес болып тұр, бірнеше аймақ бірнеше рет қамтылып, ал кейбірі мүлде зерттелмей қалған. Оң жақ суретте - оңтайландырылған маршрут. Мұнда ұшу жолақтары бір бағытта біркелкі параллель жайғасқан: дрон алдымен аймақ шекарасын айналып өтеді, сосын ішкі ауданды жан-жақты параллель жолақтармен қамтиды. оң жақтағы маршрут оптимизацияның нәтижесі ретінде құрылып, дронның ұшу тиімділігін айтарлықтай жақсартқан.



Сурет 3 – Дрон маршрутының тиімділеуге дейінгі және кейінгі көрсеткіштері

Диаграмма нәтижесі көрсеткендей, маршрутты оңтайландыру дрон ұшу тиімділігін айтарлықтай арттырды: қамтылу аумағы ұлғайып, қайталанған ұшулар саны мен жалпы маршрут ұзындығы азайды, бұл өз кезегінде уақыт пен энергия ресурстарын үнемдеуге мүмкіндік берді.

Талқылау

Зерттеу көрсеткендей, бұл жүйе дрондар тобы үшін маршруттарды өңдеу және тиімділеу бойынша тамаша жұмыс істейді. Бұл жүйені кез келген әртүрлі салаларда қолдануға болады. Мысалы атап өтетін болсақ:

Ауыл шаруашылығы: Жүйе егістіктердің жағдайын бақылауға және техника мен ресурстарды тиімді пайдалануға көмектеседі, бұл [2, 3] зерттеулермен расталған.

Қоршаған ортаның мониторингі: Жүйе табиғатты бақылайды және [1] көрсетілгендей экожүйедегі өзгерістерді бақылайды.

Іздеу және құтқару операциялары: Жүйе әрекеттерді үйлестіреді және ресурстарды таратады, бұл үлкен аумақтарда дұрыс орындарды жылдам табуға мүмкіндік береді.

Зерттеу барысында бұл жүйенің қаншалықты жақсы жұмыс істейтінін тексеру үшін көптеген зерттеулер жүргізілді. Нәтижелер жүйенің дұрыс жұмыс істейтіні және тиімді екенін, әртүрлі жағдайларда жұмыс істей алатынын көрсетті. Басқа жүйелермен салыстырғанда бұл жүйе өнімді, икемді және ауқымды болып шықты.

Осылайша, дрондар мен жерүсті көліктер тобының бағыттарын тиімділеуге арналған бұл жүйе өзінің жоғары тиімділігін және әртүрлі салаларда қолдану мүмкіндігін көрсетті. Заманауи технологиялар мен құралдар арқылы өте қабілетті үлкен жүйені құруға мүмкіндік бар екеніне көз жеткізе алдық. Болашақта бұл жүйені жетілдіруді, оны одан да жақсырақ және сенімдірек ету үшін жаңа әдістер мен технологияларды зерттеуді жоспарланып отыр. Бұл жақсартулар жүйенің мүмкіндіктерін кеңейтіп, оның әртүрлі салалардағы практикалық өзектілігін арттырады.

Қорытынды

Бұл жұмыста жерүсті көліктерін пайдалана отырып, ҰҰА тобының маршруттарын оңтайландыру жүйесі әзірленді. Жұмыстың негізгі мақсаты – ауыл шаруашылығы жұмыстары

мен қоршаған ортаны бақылау сияқты түрлі тапсырмаларды орындау үшін бірнеше дрон мен жерүсті көліктердің іс-әрекеттерін тиімді үйлестіретін жүйе құру болды.

Әзірлеу барысында бірнеше маңызды мәселелер шешілді: MAVLink хаттамасы зерттелді, QGroundControl мүмкіндіктері талданды, басқару жүйесінің архитектурасы құрылды, маршруттарды оңтайландырудың генетикалық алгоритмі енгізілді, жүйе әртүрлі жағдайларда сыналды [8].

Маршруттау алгоритмін әзірлеу негізгі міндеттердің бірі болды. Ең тиімді жолдарды табуға көмектесетін генетикалық алгоритмдер қолданылды. Ол үшін DEAP және SCOOP кітапханалары пайдаланылды. Нәтижесінде дрондар мен жерүсті көліктердің әрекеттерін тиімді үйлестіретін, ең жоғары нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік беретін маршруттарды оңтайландыру алгоритмі жасалды.

QGroundControl бағдарламасымен өзара әрекеттесу ұшқышсыз басқару жүйесі үшін маңызды қадам болды. QGroundControl миссияны жоспарлауға, ұшуды бақылауға және ұшқышсыз басқаруға арналған пайдаланушыға ыңғайлы GUI ұсынады. MAVLink хаттамасы сенімді деректер алмасу үшін қолданылды. Ол ұшқышсыз ұшақтар мен жерүсті станциялары арасында қауіпсіз әрі тұрақты байланысты қамтамасыз етті. Бұл жүйені өзгерістерге бейімделетін етіп құруға мүмкіндік берді.

Жүйені дамыту үшін заманауи технологиялық стек пайдаланылды. Ол әртүрлі кітапханалар мен құралдарды қамтыды. Атап айтқанда, PyCharm және Anaconda орталары әзірлеу және сынау процесін жеңілдетті. Numpy мен Pandas кітапханалары деректерді талдау және өңдеу үшін пайдаланылды. Сонымен қатар, API кітапханасы құрылды [10]. Нақты географиялық координаттарды есептеу үшін ruroj, vincenty және shapely кітапханалары қолданылды. Бұл дрондарды сәтті бағыттау және үйлестіру үшін маңызды болды.

Қорытындылай келе, бұл жоба тұрақты дамуға және табиғи ресурстарды тиімді пайдалануға жәрдемдесіп, ауыл шаруашылығы технологиялары мен экологиялық мониторингті дамытуға айтарлықтай үлес қоса алады.

Қаржыландыру туралы ақпарат. Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен №AP23488745 «Төмен биіктіктегі ұшқышсыз ұшу платформаларын қолдана отырып, топырақтың тұздылығын жедел бағалау», №BR21881908 «Қала агломерациясын экологиялық қолдау кешені» жүзеге асырылды.

ӘДЕБИЕТТЕР

1 Mangewa, Lazaro J., Patrick, A. Ndakidemi, and Linus K. Munishi. Integrating UAV technology in an ecological monitoring system for community wildlife management areas in Tanzania. *Sustainability*, 11 (21), 6116 (2019). URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/21/6116>.

2 Zhang, Haidong, et al. A review of unmanned aerial vehicle low-altitude remote sensing (UAV-LARS) use in agricultural monitoring in China. *Remote Sensing*, 13 (6), 1221 (2021). URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/6/1221>.

3 Mabhaudhi, T., Chibarabada, T.P., Modi, A.T. Prospects of improving agricultural and water productivity through unmanned aerial vehicles (UAVs). *Agriculture*, 10 (7), 256 (2020). URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/7/256>.

4 Xu, Y., Lan, Y., Zheng, X., & Zhang, H. Progress in agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) applied in China and prospects for Poland. *Agriculture*, 12 (3), 397 (2022). URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/3/397>.

5 Toscano, F., Fiorentino, C., Capece, N., Erra, U., Travascia, D., Scopa, A., ... & D'Antonio, P. Unmanned Aerial Vehicle for Precision Agriculture: A Review. *IEEE Access* (2024). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10531194>.

6 Yuan, S., Li, Y., Bao, F., Xu, H., Yang, Y., Yan, Q., ... & Lin, J. Marine environmental monitoring with unmanned vehicle platforms: Present applications and future prospects. *Science of The Total Environment*, 858, 159741 (2023). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722068413>

- 7 Motlagh, N.H., Kortoçi, P., Su, X., Lovén, L., Hoel, H.K., Haugsvær, S.B., ... & Tarkoma, S. Unmanned aerial vehicles for air pollution monitoring: A survey. IEEE Internet of Things Journal (2023). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10167736>
- 8 QGroundControl. URL: <https://qgroundcontrol.com> (access date: 05.04.2025).
- 9 SwarMown. URL: <https://github.com/uavkz/SwarMown/tree/dependabot/pip/django-3.2.24/mainapp> (access date: 18.03.2025).
- 10 Django. URL: <https://github.com/django/django> (access date: 12.04.2025).
- 11 DEAP. URL: <https://github.com/DEAP/deap> (access date: 05.04.2025).
- 12 SCOOP. URL: <https://github.com/ScoopInstaller/Scoop> (access date: 18.03.2025).
- 13 Argparse. URL: <https://github.com/python/cpython/blob/3.12/Lib/argparse.py> (access date: 15.03.2025).

¹Кусайын Д.,

бакалавр, инженер-программист, ORCID ID: 0009-0001-2680-5443,
e-mail: diac.kusain@gmail.com

^{1,2}Мухамедиев Р.И.,

д.и.н., профессор, заведующий лабораторией прикладного машинного обучения,
ORCID ID: 0000-0002-3727-043X,
e-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com

^{2*}Еримбетова А.С.,

PhD, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-2013-1513,
*e-mail: aigerian@mail.ru

²Кучин Я.И.,

магистр, старший научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-5271-9071,
e-mail: ykuchin@mail.ru

²Сымагулов А.,

магистр, инженер-программист, ORCID ID: 0000-0001-9974-3215,
e-mail: asmogulove00@gmail.com

¹Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

²Институт информационных и вычислительных технологий,
г. Алматы, Казахстан

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ БПЛА

Аннотация

Данное исследование посвящено разработке и внедрению алгоритма оптимизации маршрута для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Цель состоит в том, чтобы создать систему, которая может быть использована для автоматизации процесса сбора и анализа данных с беспилотных летательных аппаратов в экологических и сельскохозяйственных приложениях. Система построена с использованием Python, QGroundControl и коммуникационного протокола MAVLink. Разработанная система направлена на оптимизацию маршрутов полета беспилотных летательных аппаратов с целью повышения эффективности задач экологического мониторинга и картографирования. Она автоматизирует процесс сбора и анализа данных, позволяя получать более точную и своевременную информацию о состоянии окружающей среды и сельскохозяйственных угодий. Результаты тестирования системы демонстрируют ее высокую эффективность в реальных условиях. Выводы из этого исследования позволяют предположить, что предложенный алгоритм оптимизации маршрутов может быть успешно применен в различных экологических и сельскохозяйственных ситуациях. Предлагается дальнейшее развитие системы для расширения ее возможностей и использования в других областях.

Ключевые слова: БПЛА, генетический алгоритм, мониторинг окружающей среды, протокол MAVLink, Scoop.

¹Kusain D.,

Bachelor, Software Engineer, ORCID ID: 0009-0001-2680-5443,

e-mail: diac.kusain@gmail.com

^{1,2*}Mukhamediev R.I.,

Dr.Eng.Sc., Professor, Head of the Applied Machine Learning Laboratory,

ORCID ID: 0000-0002-3727-043X,

e-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com

^{2*}Yerimbetova A.S.,

PhD, Cand.Tech.Sc., Associate Professor, Leading Researcher,

ORCID ID: 0000-0002-2013-1513,

*e-mail: aigerian@mail.ru

²Kuchin Y.I.,

Master, Senior Researcher, ORCID ID: 0000-0002-5271-9071,

e-mail: ykuchin@mail.ru

²Symagulov A.,

Master, Software Engineer, ORCID ID: 0000-0001-9974-3215,

e-mail: asmogulove00@gmail.com

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Information and Computational Technologies,
Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A ROUTE OPTIMIZATION ALGORITHM FOR UAVS

Abstract

This study focuses on the development and implementation of a route optimization algorithm for unmanned aerial vehicles (UAVs). The goal is to create a system that can be used to automate the process of collecting and analyzing data from UAVs in environmental and agricultural applications. The system is built using Python, QGroundControl, and the MAVLink communication protocol. The developed system aims to optimize UAV routes in order to improve the efficiency of environmental monitoring and mapping tasks. It automates the process of data collection and analysis, allowing for more accurate and timely information about the state of the environment and agricultural land. Results from testing the system demonstrate its high level of effectiveness in real-world scenarios. The conclusions from this study suggest that the proposed route optimization algorithm can be successfully applied to various environmental and agricultural use cases. Further development of the system is proposed to enhance its capabilities and expand its use in other areas.

Keywords: UAV, genetic algorithm, environmental monitoring, MAVLink protocol, Scoop.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 30.01.2025

**МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
MATHEMATICAL SCIENCES
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

МРНТИ 28.17.23, 30.17.51
УДК 532.546.3, 519.688

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-186-198>

^{1,2,3}**Калтаев А.,**

д.ф.-м.н., профессор, академик НАН РК при Президенте РК,
ORCID ID: 0000-0003-2180-2785,
e-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com

¹**Құрмансейіт М.Б.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5334-6537,
e-mail: kurmanseiit.maksat@gmail.com

^{1,2,*}**Тунгатарова М.С.,**

PhD, Dr. Eng., ORCID ID: 0000-0003-3138-3326,
*e-mail: m.tungatarova@satbayev.university

¹Казахский национальный исследовательский
технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

²Институт механики и машиноведения
им. академика У.А. Джолдасбекова, г. Алматы, Казахстан

³Национальная академия наук
при Президенте Республики Казахстан, г. Алматы, Казахстан

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА****Аннотация**

В данной работе разработана и представлена имитационная модель процесса подземного выщелачивания урана, разработанная с учетом сложной кинетики растворения соединений четырех- и шестивалентного урана, а также рудовмещающей породы при взаимодействии с выщелачивающим раствором. Для определения констант скоростей реакции были использованы экспериментальные данные по извлечению урана из образца руды, помещенного в трубку с проточной схемой выщелачивания. На основании анализа экспериментальных кривых извлечения урана были определены константы скоростей основных реакций между соединениями урана и компонентами руды с выщелачивающим реагентом. Полученные параметры легли в основу численного моделирования, которое позволило прогнозировать динамику извлечения урана во времени. Разработанная модель была апробирована на данных полевого эксперимента, проведенного на участке месторождения Буденовское. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными кривых извлечений показало хорошее совпадение, что подтверждает достоверность модели и ее практическую применимость для прогнозирования и оптимизации технологических процессов подземного выщелачивания урана.

Ключевые слова: подземное выщелачивание урана, химическая модель процесса, математическая модель процесса, моделирование процесса добычи, константы скоростей реакции, кривая извлечения.

Введение

В условиях прогрессирующего истощения большинства высококачественных и легкоразрабатываемых месторождений полезных ископаемых все более актуальным становится применение технологий извлечения металлических соединений методами химического и биохимического выщелачивания – как в условиях их природного залегания (in situ leaching, рисунок 1), так и из выщелачивающих куч (heap leaching, рисунок 2). Эти подходы формируют устойчивую тенденцию в развитии современных технологий горнодобывающей промышленности [1, 2].

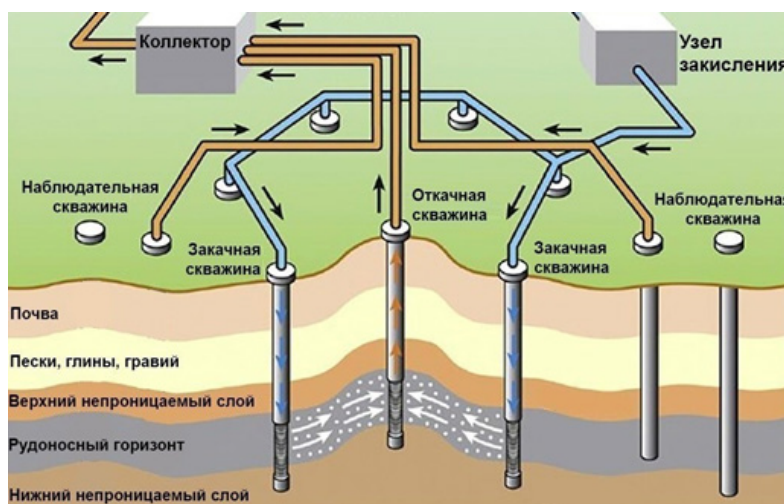


Рисунок 1 – Схема подземного скважинного выщелачивания

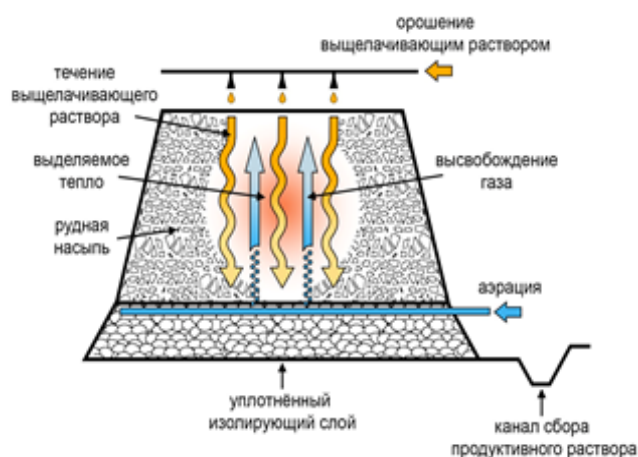


Рисунок 2 – Схема кучного выщелачивания

Наиболее перспективной технологией извлечения соединений металлов непосредственно в зоне залегания руд является метод подземного скважинного выщелачивания (ПСВ), широко применяемый при разработке инфильтрационных месторождений.

Инфильтрационные урановые месторождения Казахстана характеризуются относительно низким содержанием урана в рудном материале и высокой проницаемостью вмещающих пород, что обуславливает целесообразность и эффективность их промышленной разработки методом подземного скважинного выщелачивания.

Формирование (генезис) указанных месторождений связано с выщелачиванием урано-содержащих минералов кислородсодержащими подземными водами, поступающими с горных массивов Тянь-Шаня (рисунок 3). В процессе фильтрации через пористые и рыхлые песчаники растворенный уран, а также сопутствующие элементы (в первую очередь железо и сера) мигрируют в направлении понижения окислительно-восстановительного потенциала, где в восстановительных условиях, осаждаются в виде урановых минералов – преимущественно настурана ($\text{UO}_2 - \text{U}_3\text{O}_8$) и коффинита ($\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$), а также пирита (FeS_2). В результате этих процессов формируются залежи урана типа roll-front [3, 4, 5, 6, 7].

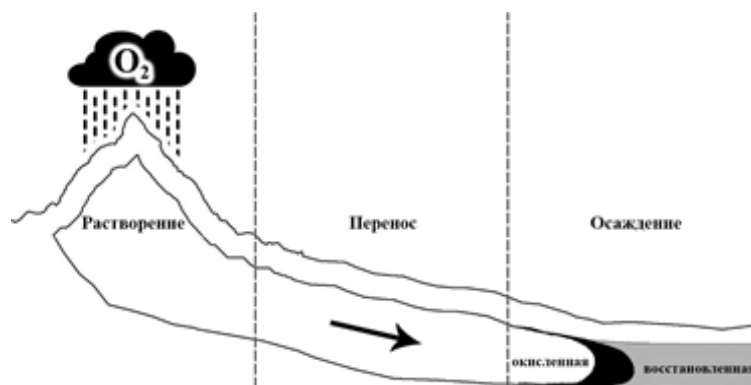


Рисунок 3 – Схема образования месторождений инфильтрационного типа

Технология подземного скважинного выщелачивания металлов подобна многократно ускоренному процессу естественного инфильтрационного перемещения минералов и включает следующие основные три этапа:

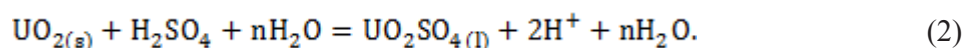
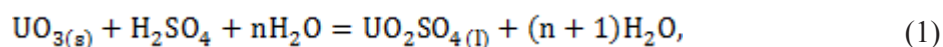
- ♦ с использованием закачных и откачных скважин фильтрация химического или биохимического растворителя сквозь рудосодержащую пористую среду,
- ♦ перевод целевого металла и/или его соединений из твердого в жидкое состояние с помощью растворителя и
- ♦ дальнейшая его транспортировка (перекачка) в места переработки.

В работе рассматривается модель подземного скважинного выщелачивания оксидов урана водным раствором серной кислоты и результаты исследований на их основе.

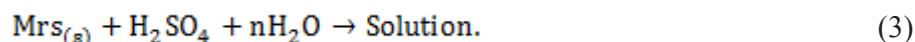
Материалы и методы

При подземном скважинном выщелачивании урана, который в месторождениях Казахстана часто встречаются в форме четырех- и шестивалентных оксидов урана $\text{UO}_{2(s)}$, $\text{UO}_{3(s)}$, в основном используются водные растворы серной кислоты H_2SO_4 . В силу приближенного характера данных по составу рудосодержащей породы в расчетной модели приняты относительно упрощенные химические брутто-реакции растворения, по которым происходит перевод оксидов урана и рудосодержащей породы из твердого в жидкое состояние [8, 9].

Растворение оксидов шести- и четырехвалентного урана $\text{UO}_{3(s)}$, $\text{UO}_{2(s)}$ серной кислотой описывается брутто-реакциями [10–12]



Часть рудосодержащей породы также может растворяться серной кислотой



Эти уравнения можно записать в единой форме

$$v_{i1}M_i + v_{i2}R + W = v_{i3}P + W, \quad (4)$$

где M_i – моли оксидов урана или рудосодержащей породы в твердой форме:

$$M_1 = [\text{UO}_{3(s)}], M_2 = [\text{UO}_{2(s)}], M_3 = [\text{Mrs}_{(s)}],$$

$$R = [\text{H}_2\text{SO}_4] \text{ – моли растворителя (серной кислоты),}$$

$$P = [\text{UO}_2\text{SO}_{4(l)}] \text{ – моли оксидов урана в растворенном виде,}$$

$$W = [\text{H}_2\text{O}] \text{ – моли воды,}$$

$$v_{ij} = 1 \text{ – стехиометрические коэффициенты реакций в трех уравнениях ((1)–(3)), } i, j = 1, 2, 3.$$

Фильтрация химического растворителя, растворенного минерала и рудосодержащей породы сквозь пористую среду описывается законом сохранения масс

$$-\nabla \cdot (v\phi) = \sum_{in} Q_{in} \delta(x - x_{in}, y - y_{in}) - \sum_{pr} Q_{pr} \delta(x - x_{pm}, y - y_{pm})$$

и законом Дарси

$$\vec{v}\phi = -K\nabla h, \quad (5)$$

где $\vec{v}$ – вектор средней скорости жидкости в порах, ϕ – пористость среды, K – коэффициент фильтрации, $h = p/\rho g$ – гидродинамический напор в пласте, Q_{in}, Q_{pr} – расходы на закачных и откачных скважинах ($Q_{in}, Q_{pr} > 0$), $u = v\phi$ – скорость Дарси жидкости в пористой среде, $u = |u|$.

Эти два уравнения сводятся к одному 3D эллиптическому уравнению относительно гидродинамического напора

$$\nabla \cdot (K\nabla h) = \sum_{in} Q_{in} \delta(x - x_{in}, y - y_{in}) - \sum_{pr} Q_{pr} \delta(x - x_{pm}, y - y_{pm}) \quad (6)$$

и решаются численным методом при заданных значениях расходов жидкости на закачных и откачных скважинах. Вдали от скважин давление считается постоянным и равным $p = p_0$.

По найденному полю давления из закона Дарси (5) определяется поле скорости в межскважинном пространстве, затем с использованием алгоритма Поллока строятся линии тока [11, 12, 13].

На рисунке 4 наложением линий тока на поле гидродинамического напора показана взаимосвязь между полем давления и линиями тока. На рисунке 5 представлено трехмерное изображение линий тока в межскважинном пространстве для реального блока месторождения, состоящего из 30 закачных и 8 откачных скважин с расстоянием между скважинами 45 м. Цвет линий тока указывает на принадлежность к соответствующей закачной скважине.

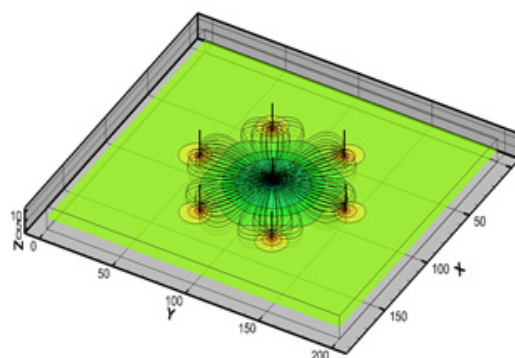


Рисунок 4 – Линии тока течения в одной гексагональной ячейке, наложенные на изолинии давления (желто-светлые цвета), 389 линии тока ($9 \times 7 \times 6$), [10, 12]

Наличие пространственного распределения линий тока и выщелачивающего раствора вдоль них позволяет получить представление о характере движения жидкости в зависимости от геологической структуры пласта, а также контролировать растекание раствора за пределы зоны разработки месторождения. На рисунке 6 показано распределение линий тока для расположения скважин, аналогичное рисунку 5, однако цвет линий тока характеризует концентрацию выщелачивающего раствора вдоль линии тока, где красный цвет соответствует максимальной концентрации реагента, синий – минимальной.

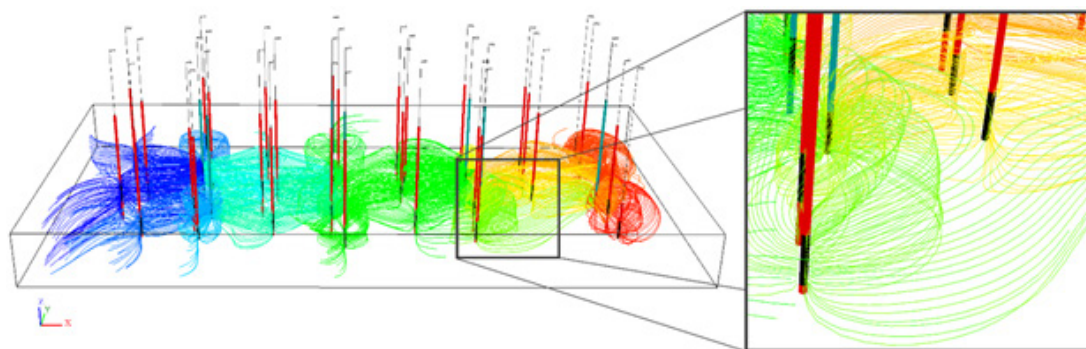


Рисунок 5 – 3D-изображение линий тока в межскважинном пространстве в определенный момент времени работы 38 скважин:
30 закачных и 8 откачных

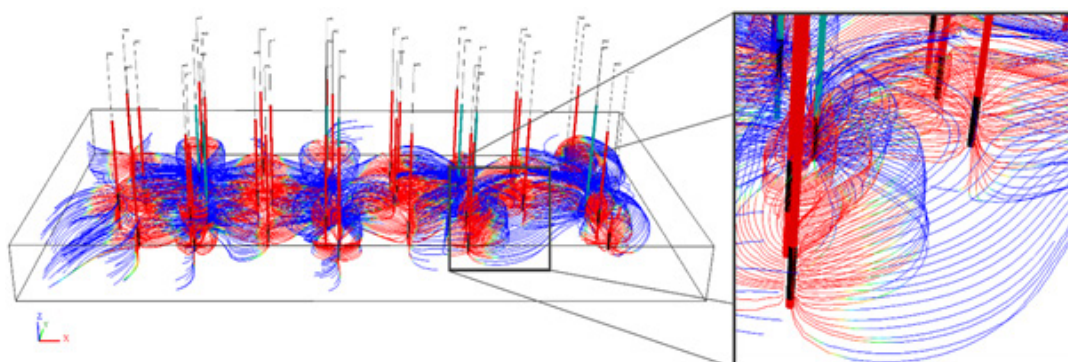


Рисунок 6 – Распределение выщелачивающего раствора вдоль линий тока между скважинами

Согласно брутто-реакциям (1–3) как скорости перехода четырех- и шестивалентных соединений урана и рудосодержащей породы из твердого в жидкое состояние, так и скорости расхода растворителя и образования соответствующих соединений урана и рудных компонентов в жидкой фазе описываются тремя уравнениями:

$$-dM_i/dt = -dR/dt = dP/dt = dW/dt = W_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

Соответственно, скорости растворения оксидов урана и рудосодержащей породы в твердых формах можно описать следующими дифференциальными уравнениями

$$\partial((1 - \phi)C_{Mi}) / \partial t = -W_i, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

с соответствующими начальными распределениями минералов в пласте

$$C_{Mi}(x, t = 0) = C_{Mi}^0(x),$$

где $C_{Mi} = [M_i]$ – молярные концентрации шестивалентного $U(VI)$ и четырехвалентного $U(IV)$ оксидов урана и рудосодержащей породы Mrs в твердых фазах.

В соответствии с законом действующих масс скорости реакций W_i [л/моль /сут], согласно химическим реакциям (1–3), записаны в виде [12–13]

$$W_i = k_{Mi} C_{Mi} C_R, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (8)$$

где $C_R = [R]$ – молярная концентрация растворителя, $k_{M1} = k_{U(VI)}$, $k_{M2} = k_{U(IV)}$, $k_{M3} = k_{Mrs}$ [л/моль/сут] – константы скорости растворения, определяемые из известных экспериментальных данных, $k_{Mi} > 0$.

Изменения концентрации растворителя C_R и соединений урана в жидкой фазе $C_p = [P]$, вызванные фильтрацией выщелачивающего растворителя через пористую среду, согласно химическим реакциям (1–3) описываются уравнениями реагирующего массопереноса [12–13]

$$\partial(\phi C_R)/\partial t + \nabla \cdot (\phi C_R \vec{v}) = \nabla \cdot (\phi D_d \nabla C_R) - (W_1 + W_2 + W_3) \quad (9)$$

$$\partial(\phi C_p)/\partial t + \nabla \cdot (\phi C_p \vec{v}) = \nabla \cdot (\phi D_d \nabla C_p) + (W_1 + W_2) \quad (10)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$C_R(x, t = 0) = 0, \quad C_R(x = x_0, t) = C_R^0(s, t),$$

$$C_p(x, t = 0) = 0, \quad C_p(x = 0, t) = 0.$$

Коэффициент гидродинамической дисперсии в пористой среде D_d зависит от компонент скорости и определяется как $D_d = f(|\vec{v}|)$ [14].

Для определения констант скорости реакции и построения имитационной модели растворения соединений урана использованы экспериментальные данные, полученные в работе [15].

Экспериментальная установка представляет собой цилиндрическую трубку радиуса $r = 0,15$ м и длиной $l = 1,0$ м, в которую с постоянным расходом подается выщелачивающий раствор с постоянной концентрацией серной кислоты. Эксперименты проведены для двух режимов, отличающихся концентрацией серной кислоты в подаваемом растворе: $1 - H_2SO_4 = 30 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$; $2 - H_2SO_4 = 20 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$. На выходе из трубки измеряется концентрация растворенного минерала через равные интервалы времени.

Результаты и обсуждение

Константы скорости растворения k_{Mi} определены сравнением результатов численного моделирования на основе уравнений (7–10) с соответствующими начальными и граничными условиями, с экспериментальными данными концентраций оксидов урана на выходе из трубки [15] и равны [13]

$$k_{U(VI)} = 4.40; \quad k_{U(IV)} = 0.6; \quad k_{Mrs} = 0.5 \quad [\text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}].$$

На рисунке 7 приведены результаты сравнения экспериментальных данных по концентрации урана на выходе из трубки для обоих режимов с результатами численного моделирования при данных значениях констант скоростей реакции. Как видно, согласие вполне удовлетворительное.

С использованием разработанной модели получены распределения реагента (а), растворенных оксидов урана (б) и оксидов урана в твердой фазе (с) вдоль трубки для моментов времени $t_1 = 12$ часов, $t_2 = 22$ часа $t_3 = 32$ (рисунки 8 и 9). Полученные результаты показывают, что в процессе движения по трубке выщелачивающий раствор переводит уран из твердой в жидкую фазу.

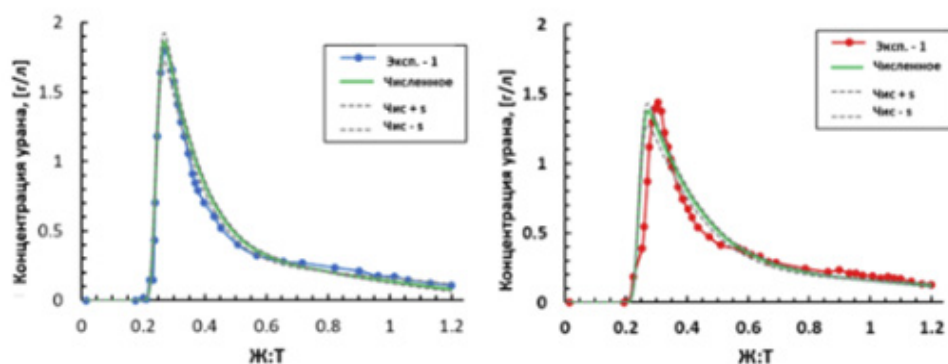


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных значений концентраций урана на выходе из трубки, построенных относительно отношения Жидкость:Твердое тело = $(\rho_1 Q)/(\rho_s V_s) \cdot t$ [15], с результатами 1D численного моделирования для двух режимов: слева – $H_2SO_4 = 30 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ и справа – $H_2SO_4 = 20 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$

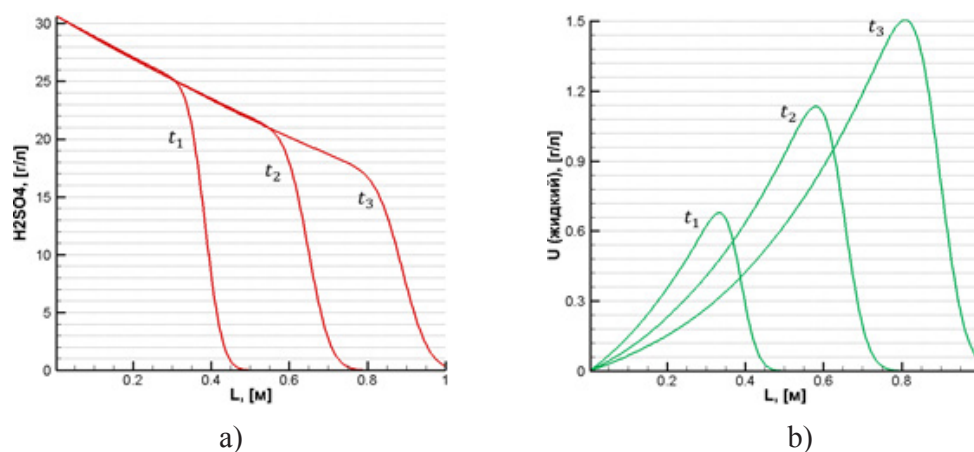


Рисунок 8 – Распределение растворителя (a) и растворенных оксидов урана (b) в моменты времени $t_1 = 12$ часов, $t_2 = 22$ часа $t_3 = 32$ часа вдоль трубки

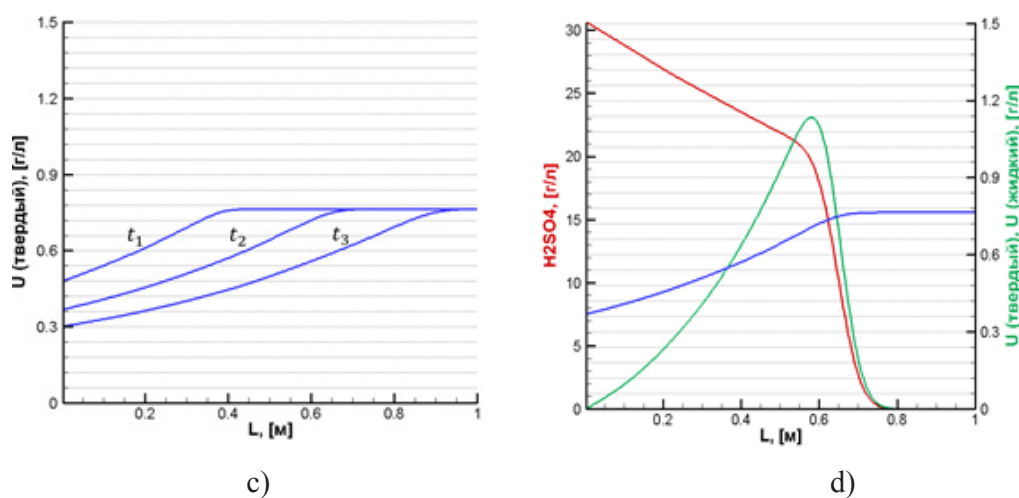


Рисунок 9 – Распределение вдоль трубки оксидов урана в твердой фазе в моменты времени $t_1 = 12$ часов, $t_2 = 22$ часа $t_3 = 32$ часа (c) и реагента, оксидов урана в твердой и жидкой фазах (d) в момент времени $t_2 = 22$ часа

Разработанная математическая модель и установленные значения скорости реакции были использованы для моделирования истории отработки на полномасштабном полевом участке подземного скважинного выщелачивания месторождения Буденовское [16, 17].

Общая площадь экспериментального блока 23700 m^2 со средней производительностью урана $15.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Участок разрабатывался сетью скважин из 4 гексагональных ячеек с 18 закачными и 4 откачными скважинами, обозначенными красными и синими точками соответственно. Согласно [17] заданы мощность пласта $h = 11.28 \text{ m}$ со средней концентрацией урана в породе C_U , фильтрационные свойства $K = 7.0 \text{ m} \cdot \text{day}^{-1}$ и пористость породы $\phi = 0.22$. Предполагалось, что содержание урана в породе $C_U = 0.077$ при равном соотношении U(IV) и U(VI).

На рисунке 10 показано поле гидродинамического напора, наложенное с распределением линий тока, для участка месторождения Буденовское. На рисунках 11–13 показано распределение реагента, оксидов урана в твердой фазе и растворенных оксидов урана, наложенное с линиями тока на момент времени $t=270$ суток.

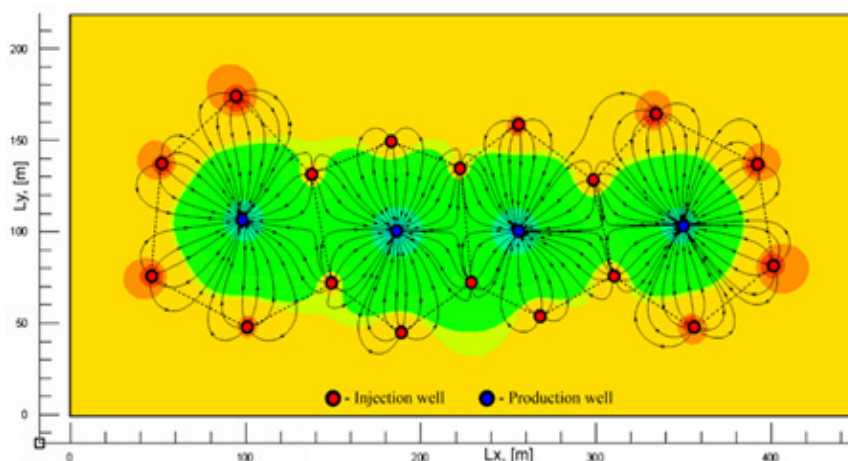


Рисунок 10 – Распределение давления и линий тока
в пласте в момент времени $t = 270$ суток

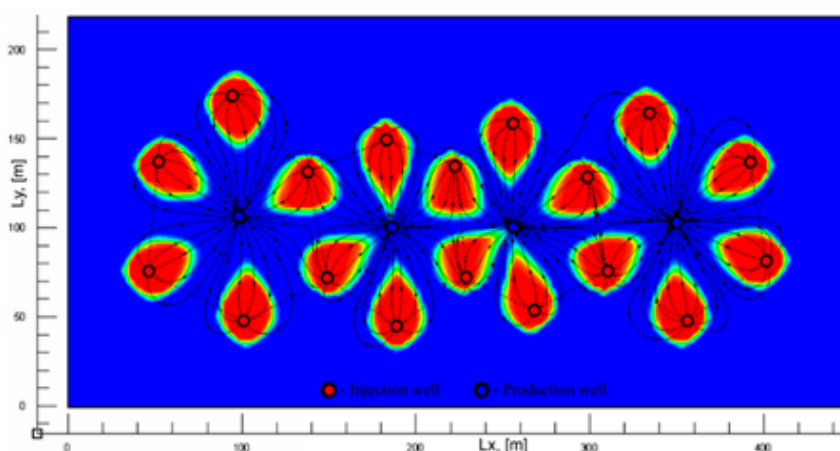


Рисунок 11 – Распределение реагента и линий тока в пласте
в момент времени $t = 270$ суток

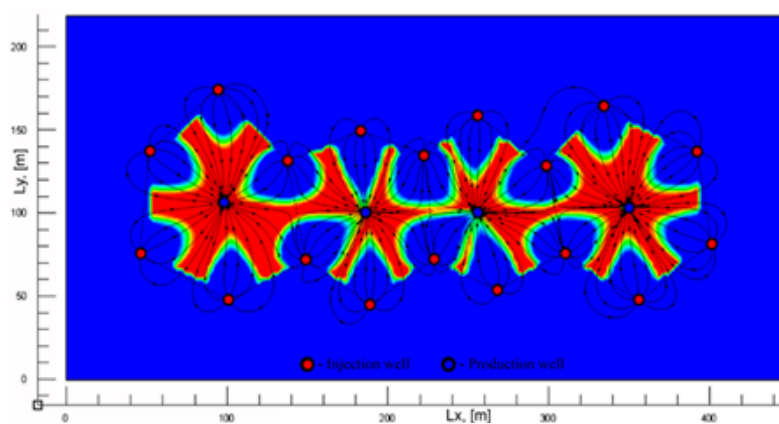


Рисунок 12 – Распределение оксидов урана в твердой фазе и линий тока в пласте в момент времени $t = 270$ суток

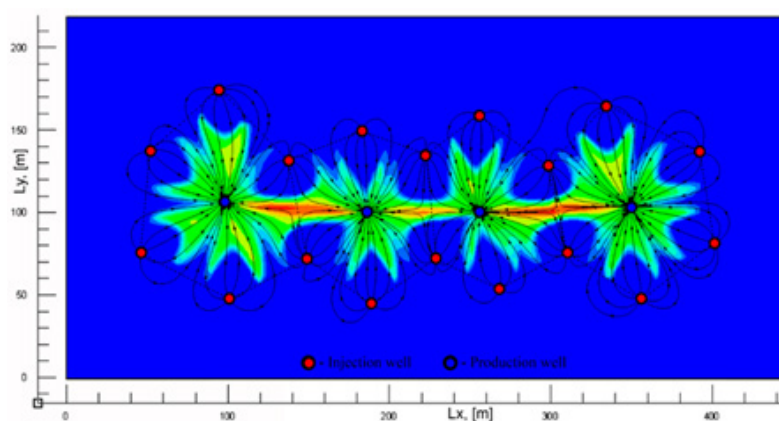


Рисунок 13 – Распределение растворенных оксидов урана и линий тока в пласте в момент времени $t = 270$ суток

Проведены сравнения экспериментальной и численной зависимости кривой извлечения оксидов урана от времени (рисунок 14) и изменения со временем экспериментального и численного результатов степени извлечения оксидов урана (рисунок 15), которые находятся в удовлетворительном согласии.

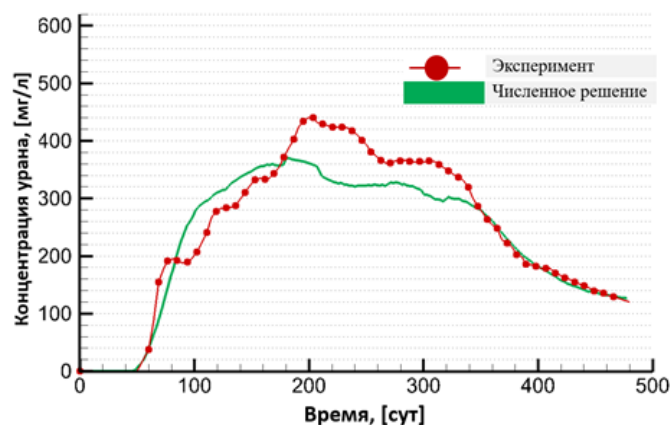


Рисунок 14 – Сравнение экспериментальной и численной зависимости кривой извлечения от времени

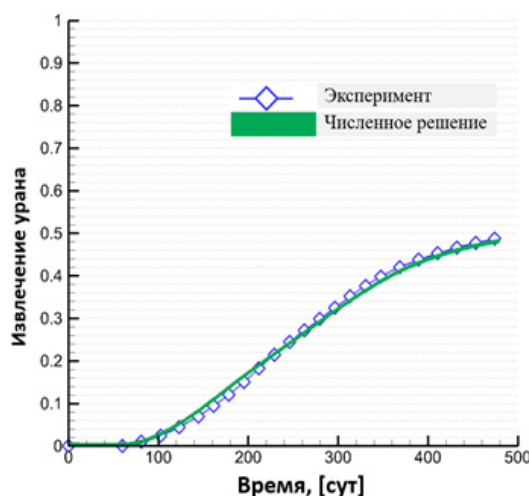


Рисунок 15 – Сравнение изменения со временем экспериментального и численного результатов извлечения урана

С использованием данной модели выполнена серия расчетов, направленных на исследование влияния концентрации серной кислоты на скорость растворения оксидов урана, а также на степень их извлечения.

На основе проведенных расчетов и комплексных исследований разработана система управления производственными процессами добывающих подразделений. Она обеспечивает реализацию функций прогнозирования, планирования, мониторинга и оперативного управления процессом извлечения урана на всех этапах его промышленной разработки.

Заключение

Разработана трехмерная вычислительная модель процесса подземного скважинного выщелачивания урана, представленного в месторождениях Казахстана преимущественно в виде четырех- и шестивалентных оксидов $UO_{2(s)}$ и $UO_{3(s)}$.

Модель описывает следующие основные стадии процесса: нагнетание водного раствора серной кислоты в рудоносный пласт через скважины; переход оксидов урана и минералов рудной породы из твердого состояния в раствор под воздействием кислоты; транспорт полученных растворенных соединений по пористой среде с учетом гидродинамической дисперсии и химических превращений, а также откачку продуктивного раствора, обогащенного ураном.

Константы скоростей растворения $UO_{2(s)}$, $UO_{3(s)}$ и рудной породы по брутто-реакциям (1–2) определены путем сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными данными и составляют:

$$k_{U(VI)} = 4.40; \quad k_{U(IV)} = 0.6; \quad k_{Mrs} = 0.5 \quad [l \cdot mole^{-1} \cdot day^{-1}].$$

Проведены валидационные расчеты разработанной вычислительной модели, результаты которых демонстрируют удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

С использованием данной модели выполнена серия расчетов, направленных на исследование влияния концентрации серной кислоты на скорость растворения оксидов урана, а также на степень их извлечения.

На основе проведенных расчетов и комплексных исследований разработана система управления производственными процессами добывающих подразделений. Она обеспечивает реализацию функций прогнозирования, планирования, мониторинга и оперативного управления процессом извлечения урана на всех этапах его промышленной разработки.

Разработанные программные обеспечения переданы Институту высоких технологий НАК «Казатомпром» в рамках договора на выполнение работ по его созданию. Они внедрены в эксплуатацию в двух горнорудных управлениях. Кроме того, НАК «Казатомпром» приобрела лицензию на право использования указанных программных решений.

Разработанные математическая и вычислительная модели подземного скважинного выщелачивания оксидов урана, а также методика их практического применения могут быть адаптированы и использованы для извлечения других минералов при наличии соответствующих геологических и гидрологических условий на месторождениях.

Информация о финансировании. Исследования проводились в рамках программы фундаментальных исследований Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (номер гранта: BR20280990).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Batterham R., Robinson D. The future of mining: will in place recovery ever come of age? // Proc. of the IMPC Conf. – 2018. – Режим доступа: www.researchgate.net/publication/323655569 (дата обращения: 31.05.2025).
- 2 Dixon D., Hendrix J. Theoretical Basis for Variable Order Assumption in the Kinetics of Leaching of Discrete Grains // AIChE J. – 1993. – Vol. 39. – No. 5. – P. 904–907.
- 3 Dahlkamp F.J. Uranium Deposits of the World (Asia). – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 492 p.
- 4 Мамилов В.А. Добыча урана методом подземного выщелачивания. – М., 1980.
- 5 Fyodorov G.V. Uranium deposits of the Inkay-Mynkuduk ore field. – Kazakhstan, 1999. – 25 p.
- 6 Developments in uranium resources, production, demand and the environment: Proceedings of a Technical Committee Meeting, Vienna, 15–18 June 1999. – Vienna: IAEA, 1999. – 230 p. – (IAEA-TECDOC-1425).
- 7 In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016. – 128 p. (Nuclear Energy Series, No. NF-T-1.4).
- 8 Громов Б.В. Введение в химическую технологию урана. – М.: Атомиздат, 1978. – 326 с.
- 9 Ho E., Quan C. Iron(II) oxidation by SO_2/O_2 for use in uranium leaching // Hydrometallurgy. – 2007. – Vol. 85. – P. 183–192.
- 10 Kurmanseit M.B., Tungatarova M.S., Kaltayev A., Royer J.-J. Reactive transport modeling during uranium in situ leaching (ISL): the effects of ore composition on mining recovery // Minerals. – 2022. – Vol. 11. – Article no. 1340. <https://doi.org/10.3390/min12111340>
- 11 Batycky R.P., Blunt M.J., Thiele M.R. A 3D field-scale streamline-based reservoir simulator // SPERE. – 1997. – November. – P. 246.
- 12 Kurmanseit M.B., Tungatarova M.S., Royer J.-J., Aizhulov D.Y., Shayakhmetov N.M., Kaltayev A. Streamline-based reactive transport modeling of uranium mining during in-situ leaching: advantages and drawbacks // Hydrometallurgy. – 2023. – Vol. 220. – Article no. 106107. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106107>
- 13 Курмансеит М.Б. Исследование физико-химических процессов при добыче минералов методом выщелачивания. Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD). – Алматы: КазНУ, 2024.
- 14 Бэр Я., Заславский Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. – М.: Мир, 1971.
- 15 Поезжаев И.П., Панова Е.Н., Буленова К.Ж., Карманов Е.М., Блынский П.А., Блынский О.А., Битов О.А. Геотехнология урана. – Алматы: АО «НАК Казатомпром», 2017. – 319 с.
- 16 Патрин А.П., Забазнов В.Л., Чистилин П.Е. Основные результаты полномасштабного натурного опыта по ПСВ урана на участке № 2 месторождения Буденовское // Актуальные проблемы урановой промышленности: сб. докл. V науч.-практ. конф. – Алматы: АО «НАК Казатомпром», 2008. – С. 198–204.
- 17 Подрезов Д.Р. Разработка и идентификация моделей оценки запасов рудника подземного скважинного выщелачивания урана. Диссертация... – Москва: Университет науки и технологий МИСИС, 2021. – 175 с.

REFERENCES

- 1 Batterham, R. and Robinson, D. Proc. of the IMPC Conf. (2018). Available at: www.researchgate.net/publication/323655569 [accessed 31 May 2025].
- 2 Dixon, D. and Hendrix, J., *AIChE J.* 39, 904–907 (1993). <https://doi.org/10.1002/aic.690390520>
- 3 Dahlkamp, F.J. *Uranium Deposits of the World (Asia)* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009), 492 p.
- 4 Mamilov, V.A. *Dобыча урана методом подземного выщелачивания* (Moscow, 1980). (in Russian).
- 5 Fyodorov, G.V. *Uranium deposits of the Inkay-Mynkuduk ore field (Kazakhstan, 1999).*
- 6 Proc. of the Tech. Comm. Meeting on Developments in Uranium Resources Production Demand and the Environment (Vienna, 15–18 June, 1999), IAEA-TECDOC-1425.
- 7 *In Situ Leach Uranium Mining: An Overview of Operations*, Int. At. Energy Agency (IAEA), Nucl. Energy Ser., No. NF-T-1.4 (Vienna, 2016), 128 p.
- 8 Gromov, B.V. *Introduction to Chemical Technology of Uranium* (Moscow: Atomizdat, 1978), p. 326. (in Russian).
- 9 Ho, E. and Quan, C. *Hydrometallurgy* 85, 183–192 (2007).
- 10 Kurmanseit, M.B., Tungatarova, M.S., Kaltayev, A. and Royer, J.-J. *Minerals* 11, 1340 (2022). <https://doi.org/10.3390/min12111340>
- 11 Batycky, R.P., Blunt, M.J. and Thiele, M.R. *A 3D Field-Scale Streamline-Based Reservoir Simulator, SPERE* (November 1997), p. 246.
- 12 Kurmanseit, M.B., Tungatarova, M.S., Royer, J.-J., Aizhulov, D.Y., Shayakhmetov, N.M. and Kaltayev, A., *Hydrometallurgy* 220, 106107 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106107>
- 13 Kurmanseit, M.B. *Issledovanie fiziko-khimicheskikh protsessov pri dobyche mineralov metodom vysshchelachivaniya*, PhD thesis, KazNU, 2024. (in Russian).
- 14 Ber, Ya., Zaslavskiy, D. and Irmey, S., *Fiziko-matematicheskie osnovy filtratsii vody* (Moscow: Mir, 1971). (in Russian).
- 15 Poezhaev, I.P., Panova, E.N., Bulenova, K.Zh., Karmanov, E.M., Blynsky, P.A., Blynsky, O.A. and Bitov, O.A. *Geotekhnologiya urana* (Almaty: AO "NAK Kazatomprom", 2017), 319 p. (in Russian).
- 16 Patrin, A.P., Zabaznov, V.L. and Chistilin, P.E. Proc. of the V Sci.-Pract. Conf. on Actual Problems of Uranium Industry (Almaty: AO "NAK Kazatomprom", 2008), pp. 198–204. (in Russian).
- 17 Podrezov, D.R. *Razrabotka i identifikatsiya modeley otsenki zapasov rudnika podzemnogo skvazhinnogo vysshchelachivaniya urana*, Cand. Sci. Thesis, MISIS, Moscow, Russia, 2021, 175 p. (in Russian).

^{1,2,3}**Калтаев А.,**

ф.-м.ғ.д., профессор, ҚР Президентінің жанындағы ҚР ҰҒА академигі,

ORCID ID: 0000-0003-2180-2785,

e-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com

¹**Құрмансейіт М.Б.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5334-6537, e-mail: kurmanseiit.maksat@gmail.com

^{1,2*}**Тунгатарова М.С.,**

PhD, Dr. Eng., ORCID ID: 0000-0003-3138-3326, *e-mail: m.tungatarova@satbayev.university

¹Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,

Алматы қ., Қазақстан

²Академик Ө.Ә. Жолдасбеков атындағы Механика және машина жасау институты,

Алматы қ., Қазақстан

³Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы Ұлттық ғылым академиясы,

Алматы қ., Қазақстан

УРАНДЫ ШАЙМАЛАУ ПРОЦЕССІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Андатпа

Бұл жұмыста уранның төрт және алты валентті қосылыстарының, сондай-ақ сілтісіздендіру ерітіндісімен әрекеттесу кезіндегі кен жынысының еруінің күрделі кинетикасын ескере отырып, уранды жерасты шаймалау

процесінің имитациялық моделі жасалып, ұсынылды. Реакция жылдамдығының константаларын анықтау үшін кен үлгісінен алынған уранды тәжірибелік ағынды шаймалау схемасы бойынша сілтісіздендіру кезінде түтікке орналастырылған деректер пайдаланылды. Тәжірибелік уран өндіру графиктерін талдау негізінде уран қосылыстары мен сілтісіздендіру реагенттері және кен құрамындағы компоненттер арасындағы негізгі реакциялардың жылдамдық константалары анықталды. Алынған параметрлер уақыт бойынша уран өндіру динамикасын болжауға мүмкіндік беретін сандық модельдеудің негізі болды. Жасалған модель Буденовское кен орнында жүргізілген далалық тәжірибе деректері негізінде сынақтан өтті. Модельдеу нәтижелерін өндіру қисығы бойынша тәжірибелік деректермен салыстыру оның жоғары сәйкестігін көрсетті. Бұл модельдің сенімділігін және оны уранды жерасты шаймалау технологиялық процестерін болжау мен оңтайландыруда практикалық тұрғыда қолдану мүмкіндігін дәлелдейді.

Тірек сөздер: уранды жерасты шаймалау, химиялық процесс моделі, математикалық процесс моделі, тау-кен процесін модельдеу, реакция жылдамдығының константалары, өндіру қисығы.

^{1,2,3}**Kaltayev A.,**

Dr.Phys.-Math.Sc., Professor, Academician of the National Academy
of Sciences of the Republic of Kazakhstan, ORCID ID: 0000-0003-2180-2785,
e-mail: aidarkhan.kaltayev@gmail.com

¹**Kurmanseiit M.B.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-5334-6537,
e-mail: kurmanseiit.maksat@gmail.com

^{1, 2*}**Tungatarova M.S.,**

PhD, Dr. Eng., ORCID ID: 0000-0003-3138-3326,
*e-mail: m.tungatarova@satbayev.university

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering,
Almaty, Kazakhstan

³National Academy of Sciences under the President of the Republic of Kazakhstan,
Almaty, Kazakhstan

MODELING AND STUDY OF THE URANIUM LEACHING PROCESS

Abstract

This study presents the development of a simulation model for the in-situ leaching (ISL) process of uranium, incorporating the complex kinetics of the dissolution of both tetravalent and hexavalent uranium compounds, as well as the interaction of the leaching solution with the ore-bearing host rock. To determine the reaction rate constants, experimental data were obtained from a flow-through leaching setup using a representative ore sample. Analysis of the resulting uranium extraction curves enabled the identification of the rate constants for the key chemical reactions between the ore constituents and the leaching reagent. These parameters were subsequently used as input for numerical simulations aimed at predicting the temporal dynamics of uranium recovery. The model was validated against field data collected from the Budenovskoye uranium deposit. The comparison between simulated and experimental extraction curves demonstrated strong agreement, thereby confirming the robustness and reliability of the model. The results underscore the model's potential for practical application in forecasting and optimizing the performance of in-situ leaching operations for uranium recovery.

Keywords: in-situ leaching of uranium, chemical model, mathematical model, modeling of extraction process, reaction rate constants, extraction curve.

Дата поступления статьи в редакцию: 02.06.2025

UDC 510.5
IRSTI 27.03.45

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-199-209>

¹**Badaev S.A.,**

Dr.Phys.-Math.Sc., Professor, ORCID ID: 0000-0003-0444-2394,

e-mail: sbadaev@gmail.com

¹**Iskakov A.M.,**

PhD student, ORCID ID: 0009-0005-2550-2079,

e-mail: bheadr73@gmail.com

^{1*}**Kalmurzayev B.S.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-4386-5915,

*e-mail: birzhan.kalmurzayev@gmail.com

¹**Askarbekkyzy A.,**

PhD student, ORCID ID: 0000-0003-0075-4438,

e-mail: ms.askarbekkyzy@gmail.com

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

A NOTE ON THE STRUCTURE OF MINIMAL DARK CEERS

Abstract

The structure of computably enumerable equivalence relations under computable reducibility (commonly referred to as ceers) has been actively developed over the past 25 years. A comprehensive survey by Andrews and Sorbi presented numerous structural properties of ceers, most notably investigating the existence of joins and meets in the degree structure of ceers. They divided the structure into two definable parts: dark ceers (ceers without an effective transversal) and light ceers (ceers with an effective transversal). They also showed the existence of an infinite number of minimal dark ceers (modulo equivalence relations with finitely many classes). Minimal dark ceers exhibit the distinctive property that every pair of classes is computably inseparable. Furthermore, the classes of weakly precomplete equivalence relations (i.e. those that lack a computable diagonal functions) are also computably inseparable. In this context, a natural question arises: do minimal dark equivalence relations exist that are not weakly precomplete? This paper provides an affirmative answer to this question. Moreover, we establish the existence of an infinite family of non-weakly precomplete minimal dark ceers that avoids lower cone of a given non-universal ceer. We denote by **FC** the set of ceers consisting of only finite classes. Andrews, Schweber, Sorbi showed the existence of dark **FC** equivalences. In this paper, we prove that over any dark **FC** ceer, there exists an infinite antichain of dark **FC** ceers.

Key words: Equivalence relation, computably enumerable equivalence relation, computable reducibility, weakly precomplete equivalence relation.

Introduction

The paper studies properties of computable reducibility for computably enumerable binary relations on the set of natural numbers ω . Suppose R and S are binary relations on ω . We say that R is computably reducible to S (denoted by $R \leq_c S$) if and only if there exists a computable function f such that for every $x, y \in \omega$

$$(x, y) \in R \Leftrightarrow (f(x), f(y)) \in S.$$

Relations R and S are said to be computably equivalent if and only if $R \leq_c S$ and $S \leq_c R$. Throughout this paper, we will be working with computably enumerable equivalence relations, or ceers for short. A ceer U is called universal if $E \leq_c U$ for every ceer E . For more details on $\leq_c$ -reducibility in the context of equivalence relations, see [1–13, 16, 19, 21].

An equivalence relation E is called precomplete if there exists a total computable function $f(e, x)$ such that for all $e, x \in \omega$, whenever $\varphi_e(x)$ is defined, it holds that $\varphi_e(x) E f(e, x)$. According to Ershov's Fixed-Point Theorem, an equivalence relation E is precomplete if and only if there exists a total computable function $f(x)$ such that for every $e \in \omega$, if $\varphi_e(f(e))$ is defined, then $\varphi_e(f(e)) E f(e)$ [14].

Badaev weakened the notion of precompleteness by introducing weakly precomplete equivalences [15]: an equivalence relation E is called weakly precomplete if there exists a partial computable function fix such that the following holds for each $e \in \omega$:

$$(\varphi_e \text{ is total}) \Rightarrow [fix(e) \downarrow \& (\varphi_e(fix(e)) E fix(e))].$$

Later, Badaev and Sorbi provided a criterion for weakly precompleteness using so-called diagonal functions [16]. A total function d is called a diagonal function for an equivalence relation E , if for every x , $(d(x), x) \notin E$.

Proposition 1.1. Let E be a ceer. The following statements are equivalent:

1. E is weakly precomplete;
2. $(\forall e)[\varphi_e \text{ is total} \Rightarrow (\exists n)[\varphi_e(n) E n]]$;
3. E has no computable diagonal function.

Properties of diagonal functions for ceers were studied extensively in [17].

A ceer E is dark if it is incomparable with $Id = \{(x, x) | x \in \omega\}$. A ceer E is called light if $Id \leq_e E$. Equivalently, E is called light if and only if there is an effective transversal, i.e. there exists a c.e. set W whose elements are pairwise non- E -equivalent [18].

Andrews and Sorbi showed that, unlike the light ceers (where Id is the least light ceer), there is no least dark ceer [18]. In particular, they proved the existence of infinitely many incomparable minimal dark ceers (see Theorem 3.3 in [18]).

We summarize some basic facts about minimal dark ceers based on Theorem 3.3 in [18].

Observation 1.2. Let E be a minimal dark ceer. Then

1. every pair of equivalence classes of E is computably inseparable;
2. every equivalence class of E is non-computable;
3. every equivalence class of E is infinite.

These statements also apply to weakly precomplete ceers.

A fundamental property of computably enumerable equivalence relations is the finiteness of their equivalence classes. A ceer E is called **FC** (standing for finite classes) if all its equivalence classes are finite [19]. A stronger notion is k -boundedness, meaning that every equivalence class of E contains at most k elements for some $k \in \omega$ with $k > 0$. If such a bound exists for some k , E is simply called bounded [6]. An important structural property follows: every bounded ceer is light (see Theorem 6.2 (1) in [19]).

Theorem 1.3 ([20]). For every non-universal positive preorder R , there exists a weakly precomplete minimal positive preorder P , which is not reducible to R .

Corollary 1.4 ([20]). For every positive non-universal preorder R , there exist infinitely many pairwise incomparable weakly precomplete minimal positive preorders, none of which is reducible to R .

It can be observed that Theorem 1.3 and Corollary 1.4 remain valid if we replace the term “positive preorder” with “positive equivalence relation”. This naturally leads to a question of whether minimal dark equivalences exist that are not weakly precomplete. Theorem 3.8, the main result of this paper, gives an affirmative answer for this question.

The remaining of the paper is organized as follows. In the section Materials and Methods we explain the finite injury priority method, which serves as the main tool in our proofs. In the section

Results and Discussion, we establish an existence of non-weakly precomplete minimal dark ceers and prove a result analogous to Corollary 1.4. Furthermore, we show that over any dark **FC** ceer, there exist infinitely many incomparable dark **FC** ceers (Theorem 3.1).

Materials and methods

Throughout the main section, we will use a standard technique from classical computability theory called finite injury priority method.

Suppose, we want to build a constructive object (c.e. set, equivalence relation, linear order etc.) with certain properties. To achieve this, we will play against an effective listing (or a numbering) of objects (such as c.e. sets, partial computable functions etc.) trying to satisfy specific requirements that ensure the desired properties.

The fulfillment of each such requirement is dictated by strategies. Each strategy R_e typically has a witness or representative x_e that witnesses satisfactory outcome of each requirement. It might happen so that a requirement may fail to be met under the chosen representative, in this case we may restart the strategy by choosing a new witness. This restarting process is called initialization.

For example, suppose we want to construct a set A with certain properties. Let $\{R_0, R_1, R_2, \dots\}$ be the set of all requirements that must be satisfied for such set A to exist. Assume that R_{2i} wants to enumerate elements into A , while R_{2j+1} aims to prevent certain elements from entering A . Clearly, even-numbered strategies will conflict with odd-numbered strategies and vice versa.

This is where the priority method comes into play. It allows us to order requirements in such a way that conflicts between different strategies cannot be completely avoided but are instead organized so that lower-priority requirements respect the constraints imposed by higher-priority ones. That is, we define a priority ordering:

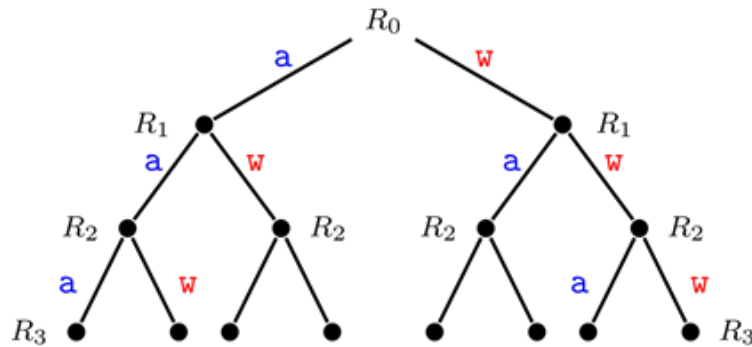
$$R_0 < R_1 < R_2 < R_3 < \dots$$

A strategy R_i can ignore constraints imposed by any R_j with $j > i$, but R_j must select its actions so that the constraints set by each R_i are not violated.

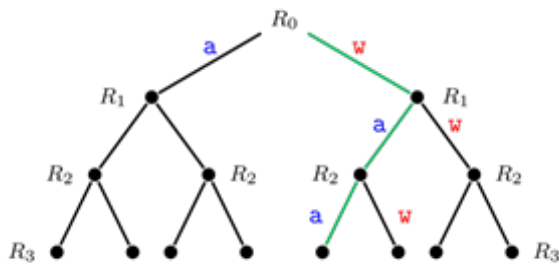
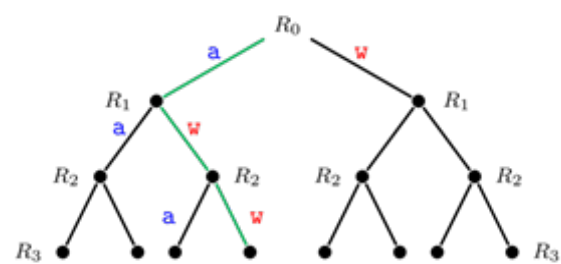
The number of possible outcomes for a strategy may vary depending on the problem, but the main ones are act and wait. We say that the strategy for R_e has the outcome act if there is a witness x_e that meets R_e . Otherwise, we say that the strategy has the outcome wait. Of course, at the stage s , we may not yet know what the ultimate outcome of a given strategy will be.

The process works as follows: suppose we want to enumerate a number x into A to satisfy R_{20} , but earlier, we observed that R_{13} put a restrain on enumerating x into A . As a result, R_{20} must look for another element that respects the constraint imposed by R_{13} – meaning that at stage s , R_{20} is in the wait state. However, higher-priority strategies, such as those for $R_0, R_2, \dots, R_{12}$, may injure the constraint imposed by R_{13} by forcing x into A , thereby switching the strategy to an act outcome. In this case, we will need to reinitialize R_{13} at most seven times. After that, the new constraint imposed by R_{13} on a different number x' will be respected by the other even-numbered strategies. When each strategy experiences only a finite number of injuries, we say that the object is constructed using the finite injury priority method.

One way to conceptualize finite injury arguments is through tree of strategies. We introduce this notion informally here and refer a curious reader to for all formal details [22]. A tree of strategies T is a full binary tree (where the branching factor depends on the number of possible outcomes of the strategies), with nodes corresponding to requirements R_i (see Figure 1). A path through T is a string $\sigma \in \{a, w\}^\omega$. Here, a and w correspond to the act and wait outcomes, respectively. A true path of T is a path TP such that every requirement along this path is satisfied.

Figure 1 – Tree of strategies T

Since our construction is done by stages, at each stage s , we define an approximation of TP as a unique string $TP_s \in \{a, w\}^{<\omega}$ such that $|TP_s| = s$. For example, suppose that at some stage $s > 0$, the strategy R_0 is still waiting for its witness to act, R_1 has already placed a restraint on some number, and R_2 has acted according to its strategy. In this case, TP_s is currently defined as a green path in Figure 2. At the next stage, $s + 1$, the strategy for R_0 may act on its witness, but this could injure R_1 and R_2 , requiring us to initialize them. After initialization, strategies for R_1 and R_2 may no longer be satisfied. This situation is illustrated in Figure 3 below. Additionally, note that $(\forall t > s)[TP_t(0) = TP(0)]$.

Figure 2 – Approximation of TP at stage s Figure 3 – Approximation of TP at stage $s + 1$

As seen in the pictures above, some requirements have multiple copies as backups. This is done to ensure that every requirement is eventually satisfied. Note that each strategy can remain in the waiting state for a long time unless it acts. In the latter case, if no higher-priority strategies injure it, the requirement will never switch back to the waiting state, thereby stabilizing some initial segment of TP . Since higher-priority strategies either never act or act only once, each $TP_s(i)$ (i^{th} element of the string TP_s) changes only finitely many times.

Results and discussion

It can be shown that **FC** dark ceers exist (see, e.g., Example 3.2 in [21]). We show that the upper cone of any such ceer contains an infinite antichain of **FC** dark ceers.

Theorem 3.1. Let F be any **FC** dark ceer. Then there exist infinitely many incomparable **FC** dark ceers $(E_l)_{l \in \omega}$ such that $F < E_l$ for all $l \in \omega$.

Proof. We construct a sequence of ceers $(E_l)_{l \in \omega}$ such that in each E_l the elements of $W = \omega^{[0]} = \{\langle 0, x \rangle \mid x \in \omega\}$ are reserved for coding F . That is, in E_l we E_l -collapse $\langle 0, x \rangle$ and $\langle 0, y \rangle$ if and only if $(x, y) \in F$. We satisfy the following requirements:

$Q_s^{k,l}$: If $k \neq l$ then φ_s is not a reduction from E_k to E_l .

P_e^l : φ_e is not a reduction from Id to E_l .

F_e^l : The E_l -class of e is finite.

We fix a computable order on the requirements of order type ω . We say that a requirement K has higher priority than a requirement K' if K strictly precedes K' in the order defined above (in this case, K' has lower priority than K). Coding F on the set $W = \omega^{[0]}$ in each E_l will ensure reduction $F \leq E_l$. The set W will grow in the sense that we will redefine W each time when some element $a \in W$ gets E_l -collapsed with $b \notin W$. We allow strategies to set two types of restraints for strategies of lower priority: $R(a, b, l)$ meaning that a can not be E_l -collapsed with b ; and $R(W; a, l)$ meaning that a can not be E_l -collapsed with any element from W .

Strategy for $Q_e^{k,l}$. Informally, we will try to diagonalize directly when possible, if not we will code a universal ceer into E_l . Fix a universal ceer U with its computable approximation $\{U_s\}_{s \in \omega}$. We start by setting a counter $m = 0$ then proceed by choosing a pair of fresh elements x_0 and x_1 taken from outside of W part of E_k and place a restraint $R(x_0, x_1, k)$. At each later stage, we continue to look for fresh elements x_m and placing restraints $R(x_i, x_m, k)$ while growing our counter m for every $i < m$. If the function φ_e fails to halt on at least one of the chosen witnesses, that is, if we wait for infinity, it means that the function φ_e is not a reduction at all, and we have won.

Formal description of the strategy:

- 1) Set $m := 1$;
- 2) Choose new witnesses x_i for $i \leq m$ and for any $i, j \leq m$ with $i \neq j$ place restraints $R(x_i, x_j, k), R(W; x_i, k)$;
- 3) Wait for $\varphi_e(x_i)$ to converge for all $i \leq m$;
- 4) Assume $\varphi_e(x_i) = y_i$ for all $i \leq m$.
 - (a) If there are y_i and y_j such that $(y_i, y_j) \notin E_l$ and both y 's are from outside of W in E_l , then we E_k -collapse x_i and x_j and place restraints $R(y_i, y_j, l), R(W; y_i, l)$ and $R(W; y_j, l)$.
 - (b) If $y_i E_l y_j$ and $(x_i, x_j) \notin E_k$ for some $i, j \leq m$, then we keep restraints $R(x_i, x_j, k), R(W; x_i, k)$ and $R(W; x_j, k)$.
 - (c) If there are $i, j \leq m$ such that $y_i \in W, y_j \notin W$, and $(y_i, y_j) \notin E_l$, then we E_k -collapse x_i and x_j , and set the restraint $R(y_i, y_j, l)$.
 - (d) If every $y_i \in W$ and for every $i, j \leq m$ we have $x_i E_k x_j \Leftrightarrow y_i E_l y_j$ such that $r(p_i) F r(p_j)$ where

$$p_t = \mu q [q = \langle 0, y \rangle \& q E_l y_t], \quad (1)$$

then we E_k -collapse every pair $(x_i, x_j) \Leftrightarrow i U j$, increase our counter m by 1, and proceed to define x_{m+1} , i.e. we set $m := m + 1$, choose a new witness x_m , and go to Step 3.

The outcomes are either wait at Step 3 waiting for φ_e to converge, or act when φ_e appears to converge everywhere, while at the same time not being closely tied to W part (Steps 4(a), 4(b) and 4(c)), in which case we can diagonalize. Alternatively, φ_e might tend to mimic F ; if this happens infinitely often, we will eventually obtain a reduction from U to F via the function $f(t) = r(p_t)$, which contradicts the fact that F is dark.

Strategy for P_e^l .

- 1) Set $m := 1$;
- 2) Wait for $\varphi_e(i)$ to converge for every $i \leq m$;
- 3) Assume $y_i = \varphi_e(i)$ for all $i \leq m$.
 - (a) If there exist y_i and y_j ($i \neq j$) such that $y_i E_l y_j$, then the requirement is satisfied.
 - (b) If all y_i 's are pairwise non- E_l -equivalent and there exist y_i and y_j ($i \neq j$) such that they do not have restraints from higher priority strategies, then we E_l -collapse (y_i, y_j) and say that the requirement is satisfied.

(c) If all $\mathcal{Y}_i$ s are pairwise non- E_l -equivalent and have restrictions posed by higher priority strategies, then set $m := m + 1$, and go to Step 2.

The outcomes are either wait at Step 2, or act at Step 3. We diagonalize directly in Steps 3(a) and 3(b). If m continues to grow infinitely often, then it means that infinitely many $\mathcal{Y}_i$ s have restraints set by higher priority requirements. However, this is impossible because there are only finitely many higher priority requirements placing no more than finite number of restraints each (see Lemma 3.3).

Strategy for F_e^l . This strategy restrains the E_l -class of e from collapsing with any other E_l -class by lower priority requirement. Since there are only finitely many requirements of higher priority, E_l -class of e will be finite. We will denote such restraints by $R(e, l)$.

Construction

The construction is by stages. More specifically, we will construct computable approximations $\{E_{l,s}\}_{s \in \omega}$ of E_l for all $l \in \omega$. We say that a requirement $K \in \{Q_e^{k,l}, P_e^l : e, k, l \in \omega\}$ is initialized meaning that it chooses (or looks for) a new set of parameters. We say that a requirement $K \in \{Q_e^{k,l}, P_e^l : e, k, l \in \omega\}$ requires attention at stage s , if K is initialized at stage s , or K has not taken any action since its last initialization, but is now ready to take action. Keep in mind that each requirement must deal with restraints of the form $R(a, b, l)$, $R(W; a, l)$ and $R(a, l)$ imposed by higher priority strategies. If $K = F_e^l$, then it sets up the restraint $R(e, l)$ once and it will never be canceled.

Stage 0. Initialize all Q and P requirements and define $E_{l,0} = Id$.

Stage $s + 1$. Code F_{s+1} in every E_l with $l < s + 1$, i.e. E_l -collapse $\langle 0, x \rangle$ and $\langle 0, y \rangle \Leftrightarrow x F_{s+1} y$. Consider the least K requirement that requires attention at the current stage.

If K is a P -requirement, then take K -action. If K is a F -requirement then place a corresponding restraint. Otherwise,

- ♦ if K is initialized, then choose new parameters for it as described in the strategy for K ;
- ♦ if K is not initialized, then take K -action as described.

After K has acted, initialize all requirements $K' > K$.

End of stage. Define $E_{l,s+1} := E_{l,s} \cup \{\text{all pairs which have been } E_l\text{-collapsed at stage } s + 1\}$.

Proceed to the next stage.

Verification

We show that each requirement will eventually be satisfied by proving Lemmas 3.2, 3.3, 3.4 below.

Lemma 3.2. Every $Q_e^{k,l}$ requirement is satisfied.

Proof. Note that every requirement $Q_e^{k,l}$ either hangs in the waiting state forever at Step 3 of the strategy or eventually acts at Step 4(a) or 4(b) or 4(c). After each action, $Q_e^{k,l}$ can be injured only finitely many times by higher priority strategies. Therefore, it will act at most finitely many times. Thus, $Q_e^{k,l}$ is eventually satisfied. $\square$

Lemma 3.3. If φ_e is total, then the outcome for P_e^l is act.

Proof. By way of contradiction, suppose that φ_e is total and we don't see Steps 3(a) and 3(b) infinitely often. Note that we won't get stuck at Step 2 because φ_e is total. Therefore, we must be stuck at Step 3 infinitely often. Since we don't see 3(a), it follows that $(\forall i \neq j)[(\varphi_e(y_i), \varphi_e(y_j)) \notin E_l]$. Furthermore, since we don't see 3(b) either for all $i \neq j$ pairs (y_i, y_j) have restraints set by higher priority strategies, or both y_i and y_j are in W . Since only finitely many restraints are set by higher priority strategies, there exists some $N \in \omega$ such that for all $k > N$ we have $y_k \in W$. Let's introduce a function $p_N(x)$ as a modification of the function defined in Eq. (1) as follows:

$$p_N(x) = p_k, \text{ with } y_k = x + y_N.$$

It is not difficult to verify that the function $g(x) = r(p_N(x))$ computably reduces Id to F , contradicting to the fact that F is dark. $\square$

Lemma 3.4. Every class of each E_l , $l \in \omega$ is finite.

Proof. The statement is equivalent to saying that every F_{ϵ}^l -requirement is satisfied. By Lemma 3.2 and Lemma 3.3 every $Q_i^{k,l}$ and P_j^l requirements act finitely often, where $i, j \leq \epsilon$. Hence, the class $[e]_{E_l}$ grows only finitely many times. $\square$

This completes the proof of Theorem 3.1. $\square$

Next, we present some facts about **FC** dark ceers related to minimality.

Corollary 3.5. No minimal dark ceer is reducible to a **FC** dark ceer.

Proof. If a minimal dark was reducible to a **FC** dark ceer, then some non-computable class would be reduced to a finite (computable) one, which is impossible. $\square$

Corollary 3.6. There are no minimal **FC** dark ceers.

Proof. Let E be a **FC** dark ceer and a_0, a_1 be representatives from distinct E -classes. Define a ceer F as E , where a_0 and a_1 are collapsed. Now define a computable function f as follows:

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{if } x \notin [a_0]_F, \\ a_0, & \text{if } x \in [a_0]_F. \end{cases}$$

It is easy to check that f is a reduction from F to E . The reduction from E to F does not exist because of self-fullness of E (recall that every dark ceer is self-full). $\square$

We now proceed to the main result of the paper, namely, that there exist weakly precomplete minimal dark ceers.

Theorem 3.7. Let R be any non-universal ceer. Then there exist infinitely many non-weakly precomplete pairwise incomparable minimal dark ceers $(E_l)_{l \in \omega}$ such that $E_l \not\leq R$ for every $l \in \omega$.

Proof. Let R be a non-universal ceer. To construct ceers E_l that are non-weakly precomplete, we define a computable diagonal function d for every E_l as follows:

$$d(x) = \begin{cases} x + 1, & \text{if } x \text{ is even,} \\ x - 1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

In the construction we will place a restraint for E_l -collapsing any pair $(2x, 2x + 1)$ and this restraint will never be cancelled. This will ensure that E_l is non-weakly precomplete (see Proposition 1.1).

Now, we will construct ceers E_l ($l \in \omega$) satisfying the following requirements:

$D_{i,j}^l$: If W_i intersects infinitely many E_l -classes, then it intersects $[j]_{E_l}$.

$Q_{\epsilon}^{k,l}$: If $k \neq l$ then φ_{ϵ} is not a reduction from E_k to E_l .

P_{ϵ}^l : φ_{ϵ} is not a reduction from E_l to R .

The Q -requirements guarantee that the ceers E_l are pairwise incomparable. The D -requirements ensure that the ceers E_l are minimal and dark. Fulfilling the P -requirements ensures that the ceers E_l remain outside of the lower cone of R .

Strategy for $D_{i,j}^l$.

1. Choose a large number $m > j + 1$.
2. Check whether W_i and $[j]_{E_l}$ intersect. If they do, the requirement is satisfied. If not, proceed to Step 3.

3. Wait for some $x \in W_i$ such that $(x, a) \notin E_l$ for every $a \leq m$.

4. E_l -collapse classes $[x]_{E_l}$ and $[j]_{E_l}$.

Strategy for $Q_{\epsilon}^{k,l}$.

1. Choose new witnesses $2x_0$ and $2x_1$ and place a restriction $R(2x_0, 2x_1, l)$.

2. Wait for $\varphi(2x_i)$ to converge for all $i = 0, 1$.

3. Assume $\varphi_{\epsilon}(2x_i) = y_i$ for every $i \leq 1$.

(a) If $(y_0, y_1) \notin E_k$, then E_l -collapse $2x_0$ and $2x_1$, and place a restraint $R(y_0, y_1, k)$.

(b) If $y_0 E_k y_1$, then keep the restraint $R(2x_0, 2x_1, l)$.

Strategy for P_s^l .

1. Set $m := 1$.

2. Choose new witnesses $2x_0$ and $2x_1$ and place a restraint $R(2x_0, 2x_1, l)$.

3. Wait for $\varphi_s(2x_i)$ to converge for all $i \leq m$.

4. Assume $\varphi_s(2x_i) = y_i$ for all $i \leq m$.

(a) If for all $i, j \leq m$

$2x_i E_l 2x_j \Leftrightarrow y_i R y_j$

then we E_l -collapse every pair $(2x_i, 2x_j) \Leftrightarrow i U j$ (where U is a universal ceer), we set $m := m + 1$, choose a new witness $2x_m$ and go to Step 3.

(b) Otherwise, the requirement is satisfied.

Construction

The construction proceeds in stages. More precisely, we will construct computable approximations $\{E_{l,s}\}_{l \in \omega}$ of E_l for all $l \in \omega$. We say that a requirement $R \in \{P_s^l, Q^{k,l}: e, k, l \in \omega\}$ is initialized at stage s meaning that it chooses a new set of parameters, and when R is initialized, the restraint imposed by R is canceled. Note that Q and P requirements must deal with restraints of the form $R(a, b, l)$ posed by higher priority strategies.

Stage 0. Initialize all R -requirements and define $E_{l,0} = Id$ for each l .

Stage $s + 1$. If $D_{i,j}^l$ acts for some i, j, l then perform $D_{i,j}^l$ -action as described. Otherwise, if R is initialized choose new parameters for R as described in the strategy for R ; if R is not initialized then take R -action.

End of stage. Define $E_{l,s+1} := E_{l,s} \cup \{\text{all pairs which have been } E_l\text{-collapsed at stage } s + 1\}$. Go to the next stage.

Verification

We show that each requirement is satisfied by the respective strategy and that they don't collapse numbers $2k$ and $2k + 1$ for every $k \in \omega$.

Lemma 3.8. If W_i intersects infinitely many E_l -classes, then it intersects $[j]_{E_l}$. More-over, the strategy $D_{i,j}^l$ doesn't collapse elements $2k$ and $2k + 1$ for every $k \in \omega$.

Proof. Towards a contradiction, assume that W_i intersects infinitely many E_l -classes and does not intersect the class $[j]_{E_l}$. This means that each time we check the intersection at Step 2 we get a negative answer, and we proceed to Step 3. At Step 3, we wait for some $x \in W_i$ such that $(x, a) \notin E_l$ for every $a \leq m$, to appear. Otherwise, we may collapse an element from W_i and j . Since we wait at Step 3 infinitely often, W_i can only intersect classes smaller than m , leading to a contradiction.

Therefore, we collapse classes $[x]_{E_l}$ and $[j]_{E_l}$ according to Step 4 of the strategy. Now, we show that classes $[x]_{E_l}$ and $[j]_{E_l}$ cannot be of the form $[2k]_{E_l}$ and $[2k + 1]_{E_l}$. Assume that $j = 2k$. Recall Step 3 which says $x \notin [a]_{E_l}$ for all $a \leq m$ where we chose m to be a number greater than $j + 1 = 2k + 1$. Thus, the number x cannot be in $[2k + 1]_{E_l}$.

Lemma 3.9. If φ_s is total, then φ_s is not a reduction from E_l to E_k . Moreover, the strategy does not collapse numbers $2k$ and $2k + 1$ for every $k \in \omega$.

Proof. Suppose φ_s is total. When $\varphi_s(a)$ and $\varphi_s(b)$ converge, either we do nothing, while keeping the restraint $R(a, b, l)$ if $\varphi_s(a) E_k \varphi_s(b)$ already holds, or we act if still $(\varphi_s(a), \varphi_s(b)) \notin E_k$. Either way, the Q -requirement succeeds in diagonalization which is then preserved by the restraints posed by the strategy.

The strategy never collapses pairs $(2x, 2x + 1)$ for any $k \in \omega$. The only way some of the elements can be collapsed by the strategy is at Step 3(a), and those elements are even.

Lemma 3.10. If φ_s is a reduction from E_l to R , then there is a reduction from U to R . Moreover, the strategy doesn't collapse the numbers $2k$ and $2k + 1$ for every $k \in \omega$.

Proof. Suppose φ_s is a reduction from E_i to R . Then for every $i \in \omega$ a parameter $2x_i$ is assigned. For every $i, j \in \omega$ we have $i U j \Leftrightarrow \varphi_s(2x_i) R \varphi_s(2x_j)$. Note that this way we can reduce U to R , contradicting to the fact that R is non-universal.

The strategy never collapses numbers $2k$ and $2k + 1$. The only instance when some elements might get collapsed by the strategy occurs at Step 4(a), and in such case the collapsed elements are even. $\square$

The proof of Theorem 3.8 is complete. $\square$

Conclusion

This paper gives a positive answer to the question about existence of minimal dark equivalences that are not weakly precomplete. Moreover, we proved the existence of infinitely many incomparable non-weakly precomplete minimal dark ceers that avoid lower cone of a given non-universal ceer. We also showed that over any dark **FC** ceer, there exists an infinite antichain of dark **FC** ceers.

Acknowledgements

The work is supported by Science Committee of Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grand no. AP19676989).

REFERENCES

- 1 Ershov, Y. L. Positive equivalences. *Algebra and Logic*, 10(6), 378–394 (1971).
- 2 Bernardi, C. On the relation provable equivalence and on partitions in effectively inseparable sets. *Studia Logica*, 40, 29–37 (1981).
- 3 Bernardi, C., Sorbi, A. Classifying positive equivalence relations. *The Journal of Symbolic Logic*, 48(3), 529–538 (1983).
- 4 Andrews, U., Lempp, S., Miller, J. S., Ng, K. M., San Mauro, L., Sorbi, A. Universal computably enumerable equivalence relations. *The Journal of Symbolic Logic*, 79(1), 60–88 (2014).
- 5 Andrews, U., Badaev, S., Sorbi, A. A survey on universal computably enumerable equivalence relations. In *Computability and Complexity: Essays Dedicated to Rodney G. Downey on the Occasion of His 60th Birthday* (pp. 418–451). Cham: Springer International Publishing (2016).
- 6 Andrews, U., Sorbi, A. The complexity of index sets of classes of computably enumerable equivalence relations. *The Journal of Symbolic Logic*, 81(4), 1375–1395 (2016).
- 7 Bazhenov, N. A., Kalmurzaev, B. S. On dark computably enumerable equivalence relations. *Siberian Mathematical Journal*, 59, 22–30 (2018).
- 8 Ng, K. M., Yu, H. On the degree structure of equivalence relations under computable reducibility. *Notre Dame J. Formal Logic*, 60(4), 733–761 (2019).
- 9 Andrews, U., Badaev, S. A. On isomorphism classes of computably enumerable equivalence relations. *The Journal of Symbolic Logic*, 85(1), 61–86 (2020).
- 10 Andrews, U., Schweber, N., Sorbi, A. Self-full ceers and the uniform join operator. *Journal of Logic and Computation*, 30(3), 765–783 (2020).
- 11 Andrews, U., Sorbi, A. Effective inseparability, lattices, and preordering relations. *The Review of Symbolic Logic*, 14(4), 838–865 (2021).
- 12 Delle Rose, V., San Mauro, L., Sorbi, A. A note on the category of equivalence relations. *Algebra and Logic*, 60(5), 295–307 (2021).
- 13 Andrews, U., Belin, D. F., San Mauro, L. On the structure of computable reducibility on equivalence relations of natural numbers. *The Journal of Symbolic Logic*, 88(3), 1038–1063 (2023).
- 14 Ershov Yu. L. *The Theory of Enumerations*, Nauka, Moscow (1977). [Russian].
- 15 Badaev S. A. On weakly pre-complete positive equivalences, *Sib. Math. J.*, 32 (2), 321–323 (1991).
- 16 Badaev, S.A., Sorbi, A. Weakly precomplete computably enumerable equivalence relations. *Math. Log. Quart.* 62, No. 1–2, 111–127 (2016).

- 17 Badaev, S.A., Bazhenov, N.A., Kalmurzayev, B.S., Mustafa, M. On diagonal functions for equivalence relations. *Archive for Mathematical Logic*. 63, 259–278 (2023).
- 18 Andrews, U., Sorbi, A. Joins and meets in the structure of ceers. *Computability*, 8 (3–4), 193–241 (2019).
- 19 Gao, S., Gerdes, P. Computably enumerable equivalence relations. *Studia Logica*, 27–59 (2001).
- 20 Badaev, S. A., Kalmurzaev, B. S., Mukash, N. K., Khamitova, A. A. Special classes of positive preorders. *Sib. Elektron. Mat. Izv.*, 18:2, 1657–1666 (2021).
- 21 Andrews, U., Schweber, N., Sorbi, A. The theory of ceers computes true arithmetic. *Ann. Pure Appl. Logic*. (171:8), 102811 (2020).
- 22 Soare R. *Recursively enumerable sets and degrees, Perspectives in Mathematical Logic*, Springer-Verlag, Berlin (1987).

¹Бадаев С.А.,

ф.-м.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0000-0003-0444-2394,
e-mail: sbadaev@gmail.com

¹Искаков А.М.,

докторант, ORCID ID: 0009-0005-2550-2079,
E-mail: bheadr73@gmail.com

^{1*}Калмурзаев Б.С.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-4386-5915,
*e-mail: birzhan.kalmurzayev@gmail.com

¹Асқарбекқызы А.,

докторант, ORCID ID: 0000-0003-0075-4438,
e-mail: ms.askarbekkyzy@gmail.com

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

МИНИМАЛ ҚАРАҢҒЫ ЕСЕПТЕЛІМДІ САНАЛЫМДЫ ЭКВИВАЛЕНТ ҚАТЫНАСТАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ ЖАЙЫНДА

Аңдатпа

Есептелімді көшіруге қатысты есептелімді саналымды эквиваленттік қатынастардың (қысқаша ceers) құрылымы соңғы 25 жылда белсенді түрде зерттелуде. Эндрюс пен Сорбидің шолу еңбектері ceers құрылымына тән көптеген құрылымдық қасиеттерді ашып көрсетті. Олар супремум мен инфимумның бар-жоғын зерттей отырып, құрылымды анықталымды екі бөлікке бөлді: қараңғы (яғни, тиімді трансверсалі жоқ) және жарық (тиімді трансверсалі бар) эквиваленттіліктер. Сонымен қатар, Эндрюс пен Сорби минималды қараңғы есептелімді саналымды эквиваленттік қатынастардың (бұдан әрі – минималды қараңғы ceers) шексіз саны бар екенін дәлелдеді. Мұндағы минималдылық – бұл қатынастардың төменгі конусында тек кластар саны шектеулі болатын эквиваленттіктер ғана жатуы мүмкін деген мағынада. Мұндай минималды қараңғы эквиваленттіктердің маңызды қасиеті – кластардың кез келген жұбы есептелімді түрде ажыратылмайды. Сондай-ақ, ceers теориясында әлсіз жартылай толық эквиваленттік қатынастар да зерттелуде. Бұл есептелімді диагональ функциясы жоқ эквиваленттіктер. Аталған қатынастарда да кластардың кез келген жұбы есептелімді түрде ажыратылмайды. Осыған байланысты әлсіз жартылай толық, минималды қараңғы эквиваленттік қатынастардың бар-жоғы туралы сұрақ туындайды. Бұл мақалада аталған сұраққа оң жауап беріліп отыр. FC арқылы барлық класы ақырлы болатын есептелімді саналымды эквиваленттік қатынас белгіленсін. Эндрюс, Швейбер және Сорби қараңғы FC эквиваленттіктерінің бар екенін көрсеткен болатын. Ал бұл зерттеуде біз кез келген қараңғы FC эквиваленттік қатынасының үстінде қараңғы FC эквиваленттік қатынастардан тұратын шексіз антиізбек (антишынжыр) бар екенін дәлелдейміз.

Тірек сөздер: эквиваленттік қатынас, есептелімді саналымды эквиваленттік қатынас, есептелімді көшіру, әлсіз жартытолық эквиваленттік қатынас.

¹Бадаев С.А.,

д.ф.-м.н., профессор, ORCID ID: 0000-0003-0444-2394,

e-mail: sbadaev@gmail.com

¹Искаков А.М.,

докторант, ORCID ID: 0009-0005-2550-2079,

e-mail: bheadr73@gmail.com

^{1*}Калмурзаев Б.С.,

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-4386-5915,

*e-mail: birzhan.kalmurzayev@gmail.com

¹Асқарбекқызы А.,

докторант, ORCID ID: 0000-0003-0075-4438,

e-mail: ms.askarbekkyzy@gmail.com

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

О СТРУКТУРЕ МИНИМАЛЬНЫХ ТЕМНЫХ ВЫЧИСЛИМО ПЕРЕЧИСЛИМЫХ ОТНОШЕНИЙ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Аннотация

Структура вычислимо перечислимых отношений эквивалентности относительно вычислимой сводимости (коротко – сеегс) активно развивается на протяжении последних 25 лет. В обзоре Эндрюса и Сорби было показано множество структурных свойств структуры сеегс. Эндрюс и Сорби исследовали существование супремумов и инфимумов. Они разделили структуру на две определяемые части: темные (эквивалентности без эффективного трасверсала) и светлые (с эффективным трасверсалем) эквивалентности и показали существование бесконечного числа минимальных (в том смысле, что строго под ними могут быть только конечные эквивалентности) темных сеегс. Минимальные темные эквивалентности имеют следующее свойство: каждая пара классов вычислимо неотделима. Также в теории сеегс изучаются слабо предполные эквивалентности (то есть те эквивалентности, для которых не существует вычислимых диагональных функций). Также у данных эквивалентностей каждая пара классов вычислимо неотделима. В связи с этим возникает вопрос о существовании минимальных темных эквивалентностей, не являющихся слабо предполными. В данной статье дается положительный ответ на этот вопрос. Через **FC** обозначим в.п. отношение эквивалентности все классы которого конечны. Эндрюс, Швебер, Сорби показали существование темных **FC** эквивалентностей. В этой статье доказывается, что над любой темной **FC** эквивалентностью существует бесконечная антицепь темных **FC** эквивалентностей.

Ключевые слова: отношение эквивалентности, вычислимо перечислимое отношение эквивалентности, вычислимая сводимость, слабо предполные отношения эквивалентности.

Article submission date: 26.04.2025

ӨОЖ 517.927.6
FTAXP 27.29.17

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-210-220>

^{1,2}Темешева С.М.,

ф.-м.ғ.д., жетекші ғылыми қызметкер, профессордың м.а.,
ORCID ID: 0000-0002-3341-4539, e-mail: temeshevasvetlana@gmail.com

^{1,3*}Кадирбаева Ж.М.,

ф.-м.ғ.к., жетекші ғылыми қызметкер, профессор,
ORCID ID: 0000-0001-8861-4100, *e-mail: zhkadirbayeva@gmail.com

^{1,2}Аширов С.Б.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0008-6654-7531,
e-mail: ashirov_27@mail.ru

¹Математика және математикалық модельдеу институты, Алматы қ., Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

³Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ПАРАМЕТРІ БАР ЖҮКТЕЛГЕН ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ТЕҢДЕУ ҮШІН КӨПНҮКТЕЛІ ШЕТТІК ЕСЕПТІҢ ШЕШІЛІМДІЛІГІ

Андатпа

Бұл мақала параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін көпнүктелі шеттік есептің шешілімділігінің мәселелеріне арналған. Зерттеу Жұмабаевтың параметрлеу әдісі арқылы жүргізіледі. Бұл әдіс бастапқы шеттік есепті шешуді алгебралық теңдеулер жүйесін және жәй дифференциалдық теңдеулер үшін Коши есептерін шешуге алып келеді. Параметрлеу әдісінің алгоритмдеріне өзгерістер енгізілді, бұл алгоритмнің жинақтылығына шеттік шарттардың әсерін әлсіретуге мүмкіндік берді. Параметрлеу әдісінің ерекшеліктеріне сәйкес, параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін көпнүктелі шеттік есептің шешімінің бар болуы және жалғыздығы үшін жеткілікті шарттар алынды. Бұл шарттар әдістің өзгертілген алгоритмдерінің жинақтылығын да қамтамасыз етеді. Зерттеу нәтижелері – параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеулер үшін шеттік есептермен сипатталатын әртүрлі модельдердің әрекетін талдаудың конструктивті құралы. Келтірілген мысал ұсынылған әдістің жүзеге асырылуы мен тиімділігін анық көрсетеді.

Тірек сөздер: көпнүктелі шеттік есеп, жүктеу, параметр, параметрлеу әдісі, шешілімділік.

Кіріспе

Ұсынылып отырған мақалада $[a, b]$ интервалында параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеу үшін төмендегідей сызықтық көпнүктелі шеттік есеп қарастырылады

$$\frac{dy(t)}{dt} = \mathcal{P}(t)y(t) + \sum_{j=0}^M \mathcal{K}_j(t)y(\theta_j) + \mathcal{P}_0(t)\mu + \mathcal{F}(t), \quad (1)$$

$$y \in \mathbb{R}^n, \quad \mu \in \mathbb{R}^m,$$

$$\sum_{j=0}^M \mathcal{B}_j y(\theta_j) + \mathcal{C}_0 \mu = d, \quad d \in \mathbb{R}^{n+m}, \quad (2)$$

мұндағы $(n \times n)$ – өлшемді $\mathcal{P}(t)$, $\mathcal{K}_j(t)$, $j = \overline{0, M}$, матрицалары, $(n \times m)$ - өлшемді $\mathcal{P}_0(t)$ матрицасы және n – өлшемді $\mathcal{F}(t)$ вектор-функциясы $[a, b]$ аралығында үзіліссіз;

$((n+m) \times n)$ – өлшемді $B_j, j = \overline{0, M}$, матрицалары, $((n+m) \times m)$ – өлшемді C_0 матрицасы – тұрақты матрицалар, d – тұрақты вектор; $\|y\| = \max_{i=1, n} |y_i|$, $a = \theta_0 < \theta_1 < \dots < \theta_{M-1} < \theta_M = b$.

Жәй дифференциалдық теңдеулер үшін көпнүктелі шеттік есептер – классикалық екі нүктелі есептерге қарағанда күрделі физикалық процестерді модельдеуге мүмкіндік беретін маңызды зерттеу саласы. Мұндай есептер аралық бақылауы бар процестерді модельдеу кезінде, тиімді басқару есептерінде, тербелістер теориясында, жылу алмасу мен басқа да қолданбалы салаларда жиі кездеседі [1, 2].

Көпнүктелі шеттік есептер теориясы соңғы онжылдықтарда белсенді түрде дамып келеді. Сызықтық және сызықтық емес көпнүктелі шеттік есептердің шешімдерінің бар болуы және оның жалғыздық шарттары [3–8] еңбектерінде зерттелген.

Көпнүктелі шеттік есептерді шешудің сандық әдістері де белсенді дамып келеді: [4, 5] жұмыстарында коллокация әдісі ұсынылса, [9] еңбекте вариациялық итерациялық әдіс, ал [10] жұмысында Адомиан жіктеу әдісі ұсынылған. Сонымен қатар, [11] жұмысында атқылау әдісіне негізделген екінші ретті көпнүктелі шеттік есептер шешімдерін жуықтауға арналған сандық әдіс әзірленген.

Жүктелген дифференциалдық теңдеулер классикалық модельдерді жалпылайды және оларды талдауда дәлірек әдістерді талап етеді. Мұндай теңдеулер нақты процестерді дәлірек сипаттауға мүмкіндік береді, мысалы, уақытша жүктемелер әсерінен серпімді құрылымдардың тербелістерін, жылу көздерін ескеретін жылу алмасуды немесе шоғырланған күштердің әсерінен механикалық жүйелердің қозғалысын сипаттауға болады [12]. Бұл модельдер теориялық зерттеу (шешімдердің бар болуы мен жалғыздығы, орнықтылығы, реттелгендігі) жағынан да, сандық тұрғыдан іске асыруда да ерекше тәсілдерді қажет етеді. Жүктелген дифференциалдық теңдеулер үшін түрлі есептер [13–16] жұмыстарында зерттелген. Жүктелген дифференциалдық теңдеулерді қолдану нақты процестердің неғұрлым дәл және сәйкес модельдерін құруға мүмкіндік береді, бұл оларды теориялық әрі қолданбалы тұрғыдан маңызды зерттеу нысанына айналдырып отыр.

Бұл мақала параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеу үшін сызықтық көпнүктелі шеттік есепті зерттеуге арналады. Бұл есепті зерттеу үшін Жұмабаевтың параметрлеу әдісі [17] қолданылады. Есептің шешімінің бар болуы мен жалғыздығының шарттарын орнатуға басты назар аударылады. Алынған нәтижелерді жүйенің аралық күйлері мен бөлінген жүктемелердің әсерін ескеру қажет болатын математикалық модельдеу есептеріне қолдануға болады.

Негізгі ойлар. (1), (2) параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеу үшін көпнүктелі шеттік есебін шешу үшін профессор Жұмабаев ұсынған параметрлеу әдісін қолданайық. Осы әдістің схемасы бойынша $[a, b]$ аралығын $\theta_j, j = \overline{0, M}$, жүктеу нүктелерінде бөліктерге бөлейік:

$$[a, b] = \bigcup_{r=1}^M [\theta_{r-1}, \theta_r).$$

(1), (2) параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеу үшін көпнүктелі шеттік есебін

$$y_r(t) = y(t) \mathbb{I}_r(t), \text{ мұнда } \mathbb{I}_r(t) = \begin{cases} 1, & t \in [\theta_{r-1}, \theta_r) \\ 0, & t \notin [\theta_{r-1}, \theta_r) \end{cases}, \quad r = \overline{1, M},$$

белгілеуін енгізіп, қайта жазайық:

$$\frac{dy_r(t)}{dt} = \mathcal{P}(t)y_r(t) + \sum_{j=0}^{M-1} \mathcal{K}_j(t)y_{j+1}(\theta_j) + \mathcal{K}_M(t) \lim_{t \rightarrow \theta_M-0} y_M(t) +$$

$$+\mathcal{P}_0(t)\mu + \mathcal{F}(t), \quad t \in [\theta_{r-1}, \theta_r), \quad r = \overline{1, M},$$

$$\lim_{t \rightarrow \theta_p-0} y_p(t) = y_{p+1}(\theta_p), \quad p = \overline{1, M-1}, \quad (4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \theta_M - 0} y_M(t) = y(\theta_M), \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^{M-1} B_j y_{j+1}(\theta_j) + B_M \lim_{t \rightarrow \theta_M - 0} y_M(t) + C_0 \mu = d, \quad (6)$$

мұнда (4) шарты – шешімнің $\theta_j, j = \overline{1, M-1}$, жүктеу нүктелеріндегі байланысу шарты.

Айталық, $(y(t), \mu)$ жұбы (1), (2) есебінің шешімі болсын, онда $(y[t], \mu)$ жұбы (3) – (6) есебінің шешімі болады, мұндағы $y[t] = (y_1(t), \dots, y_M(t))$. Және керісінше $(\tilde{y}[t], \mu)$ жұбы (3) – (6) есебінің шешімі болсын, онда $\tilde{y}(t) = \sum_{r=1}^M \tilde{y}_r(t) \mathbb{I}_r(t)$ функциясы мен μ параметрінен құралған жұп (1), (2) есебінің шешімі болады.

$y_r(t)$ функциясының $t = \theta_{r-1}, r = \overline{1, M}$, нүктелеріндегі мәндерін $\lambda_r, r = \overline{1, M}, \lim_{t \rightarrow \theta_M - 0} y_M(t)$ шегін $\lambda_{M+1}, \mu = \lambda_{M+2}$ деп белгілеп, әрбір $[\theta_{r-1}, \theta_r), r = \overline{0, M}$, аралығында $z_r(t) = y_r(t) - \lambda_r$ алмастыруын жасайық. (3) – (6) есебіне осы белгілеулер мен алмастыруын қолданып, осы есепке пара-пар болатын параметрлері бар есепке көшеміз:

$$\begin{aligned} \frac{dz_r(t)}{dt} &= \mathcal{P}(t)[z_r(t) + \lambda_r] + \sum_{j=0}^M \mathcal{K}_j(t) \lambda_{j+1} + \\ &+ \mathcal{P}_0(t) \lambda_{M+2} + \mathcal{F}(t), \quad t \in [\theta_{r-1}, \theta_r), \quad r = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$z_r(\theta_{r-1}) = 0, \quad r = \overline{1, M}, \quad (8)$$

$$\lambda_p + \lim_{t \rightarrow \theta_p - 0} z_p(t) = \lambda_{p+1}, \quad p = \overline{1, M}, \quad (9)$$

$$\sum_{j=0}^M B_j \lambda_{j+1} + C_0 \lambda_{M+2} = d, \quad (10)$$

(3) – (6) есебі мен (7) – (10) есебі келесі мағынада пара-пар есептер болады: $(y[t], \mu)$ жұбы (3) – (6) есебінің шешімі болса, онда $(z[t], \lambda)$ жұбы (7) – (10) есебінің шешімі болады, мұнда $\lambda_r = y_r(\theta_{r-1}), r = \overline{1, M}, \lambda_{M+1} = \lim_{t \rightarrow \theta_M - 0} y_M(t), \lambda_{M+2} = \mu, z_r(t) = y_r(t) - y_r(\theta_{r-1})$; ал егер $(\tilde{z}[t], \tilde{\lambda})$ жұбы (7) – (10) есебінің шешімі болса, онда $(\tilde{y}[t], \tilde{\mu})$ жұбы (3) – (6) есебінің шешімі болады, мұнда $\tilde{y}_r(t) = \tilde{z}_r(t) + \tilde{\lambda}_r, \lim_{t \rightarrow \theta_M - 0} \tilde{y}_M(t) = \tilde{\lambda}_{M+1}, \tilde{\mu} = \tilde{\lambda}_{M+2}$.

Материалдар мен әдістер

(7) – (10) есебінде $z_r(\theta_{r-1}) = 0, r = \overline{1, M}$, бастапқы шартының болуы $z_r(t)$ функциясын

$$\begin{aligned} z_r(t) &= \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau)[z_r(\tau) + \lambda_r] d\tau + \int_{\theta_{r-1}}^t \sum_{j=0}^M \mathcal{K}_j(\tau) \lambda_{j+1} d\tau + \\ &+ \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}_0(\tau) \lambda_{M+2} d\tau + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{F}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (11)$$

интегралдық теңдеуінен анықтауға мүмкіндік береді.

Бұл теңдеудегі $z_r(\tau)$ -дың орнына осы теңдеудің оң жағын қойып, және де осы процесті ξ ($\xi = 1, 2, \dots$) рет қайталасақ, $z_r(t)$ функциясы үшін келесідей теңдікті аламыз:

$$z_r(t) = D_{\xi,r}(t)\lambda_r + \sum_{j=0}^M H_{\xi,r}^j(t)\lambda_{j+1} + E_{\xi,r}(t)\lambda_{M+2} + F_{\xi,r}(t) + G_{\xi,r}(z, t), \quad t \in [\theta_{r-1}, \theta_r), \quad r = \overline{1, M}, \quad (12)$$

мұндағы:

$$\begin{aligned} D_{\xi,r}(t) &= \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) d\tau_1 + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_1} \mathcal{P}(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1 + \dots \\ &\quad + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \dots \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-2}} \mathcal{P}(\tau_{\xi-1}) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-1}} \mathcal{P}(\tau_{\xi}) d\tau_{\xi} d\tau_{\xi-1} \dots d\tau_1, \\ H_{\xi,r}^j(t) &= \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{K}_j(\tau_1) d\tau_1 + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_1} \mathcal{K}_j(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1 + \dots \\ &\quad + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \dots \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-2}} \mathcal{P}(\tau_{\xi-1}) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-1}} \mathcal{K}_j(\tau_{\xi}) d\tau_{\xi} d\tau_{\xi-1} \dots d\tau_1, \quad j = \overline{0, M}, \\ E_{\xi,r}(t) &= \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}_0(\tau_1) d\tau_1 + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_1} \mathcal{P}_0(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1 + \dots \\ &\quad + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \dots \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-2}} \mathcal{P}(\tau_{\xi-1}) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-1}} \mathcal{P}_0(\tau_{\xi}) d\tau_{\xi} d\tau_{\xi-1} \dots d\tau_1, \\ F_{\xi,r}(t) &= \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{F}(\tau_1) d\tau_1 + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_1} \mathcal{F}(\tau_2) d\tau_2 d\tau_1 + \dots \\ &\quad + \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \dots \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-2}} \mathcal{P}(\tau_{\xi-1}) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-1}} \mathcal{F}(\tau_{\xi}) d\tau_{\xi} d\tau_{\xi-1} \dots d\tau_1, \\ G_{\xi,r}(z, t) &= \int_{\theta_{r-1}}^t \mathcal{P}(\tau_1) \dots \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-2}} \mathcal{P}(\tau_{\xi-1}) \int_{\theta_{r-1}}^{\tau_{\xi-1}} \mathcal{P}(\tau_{\xi}) z_r(\tau_{\xi}) d\tau_{\xi} d\tau_{\xi-1} \dots d\tau_1. \end{aligned}$$

(12) теңдіктің оң жағында $\lim_{t \rightarrow \theta_{r-0}} z_r(t)$ шекке көшіп, (9), (10) шарттарына қойып, λ параметріне қатысты келесідей теңдеулер жүйесін аламыз:

$$Q_{\xi}(\theta)\lambda = -F_{\xi}(\theta) - G_{\xi}(z, \theta), \quad (13)$$

мұндағы $\lambda \in \mathbb{R}^{n(M+1)+m}$,

$$Q_{\xi}(\theta) = \begin{bmatrix} I + D_{\xi,1}(\theta_1) + H_{\xi,1}^0(\theta_1) & H_{\xi,1}^1(\theta_1) - I & \dots & H_{\xi,1}^M(\theta_1) & E_{\xi,1}(\theta_1) \\ H_{\xi,2}^0(\theta_2) & I + D_{\xi,2}(\theta_2) + H_{\xi,2}^1(\theta_2) & \dots & H_{\xi,2}^M(\theta_2) & E_{\xi,2}(\theta_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{\xi,M}^0(\theta_M) & H_{\xi,M}^1(\theta_M) & \dots & H_{\xi,M}^M(\theta_M) & E_{\xi,M}(\theta_M) \\ \mathcal{B}_0 & \mathcal{B}_1 & \dots & \mathcal{B}_M & \mathcal{C}_0 \end{bmatrix},$$

$$F_{\xi}(\theta) = (F_{\xi,1}(\theta_1), F_{\xi,2}(\theta_2), \dots, F_{\xi,M}(\theta_M), -d),$$

$$G_{\xi}(z, \theta) = (G_{\xi,1}(z, \theta_1), G_{\xi,2}(z, \theta_2), \dots, G_{\xi,M}(z, \theta_M), 0),$$

I – $n \times n$ өлшемді бірлік матрица, O – $(n + m)$ өлшемді нөлдік вектор.

(7) – (10) есебінің шешімі $(z[t], \lambda)$ жұбын табу үшін (11) және (13) тұйық теңдеулер жүйесін алдық, мұндағы $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{M+1}, \lambda_{M+2}) \in \mathbb{R}^{n(M+1)+m}$, $z[t] = (z_1(t), \dots, z_M(t))$.

Таңдалынған ξ санына сәйкес $Q_\xi(\theta)$ матрицасының кері матрицасы бар болсын. Олай болса $\{(z^{(k)}[t], \lambda^{(k)})\}_{k=0}^\infty, \{(y^{(k)}(t), \mu^{(k)})\}_{k=0}^\infty$ тізбектерінің мүшелері келесі алгоритм бойынша табылады:

0-ші қадам.

а) $G_\xi(z, \theta) = 0$ деп алып $Q_\xi(\theta) \lambda = -F_\xi(\theta)$ теңдеуінен $\lambda^{(0)}$ табамыз, яғни $\lambda^{(0)} = -[Q_\xi(\theta)]^{-1} F_\xi(\theta)$.

ә) Табылған $\lambda^{(0)}$ векторының компоненттерін қолданып, (7), (8) Коши есептерін шешу арқылы $z^{(0)}[t]$ функцияларын табамыз.

б) $y^{(0)}(t) = \begin{cases} \lambda_r^{(0)} + z_r^{(0)}(t), & \text{егер } t \in [\theta_{r-1}, \theta_r), r = \overline{1, M}, \\ \lambda_{M+1}^{(0)}, & \text{егер } t = \theta_M \end{cases}$ және $\mu^{(0)} = \lambda_{M+2}^{(0)}$ анықтаймыз.

1-ші қадам.

а) Табылған $z^{(0)}[t]$ мәндерін (13) теңдігінің оң жағына қойып, $Q_\xi(\theta) \lambda = -F_\xi(\theta) - G_\xi(z^{(0)}, \theta)$ теңдеуінен $\lambda^{(1)}$ табамыз, яғни $\lambda^{(1)} = -[Q_\xi(\theta)]^{-1} \cdot (F_\xi(\theta) + G_\xi(z^{(0)}, \theta))$.

ә) Табылған $\lambda^{(1)}$ векторының компоненттерін қолданып, (7), (8) Коши есептерін шешу арқылы $z^{(1)}[t]$ функцияларын табамыз.

б) $y^{(1)}(t) = \begin{cases} \lambda_r^{(1)} + z_r^{(1)}(t), & \text{егер } t \in [\theta_{r-1}, \theta_r), r = \overline{1, M}, \\ \lambda_{M+1}^{(1)}, & \text{егер } t = \theta_M \end{cases}$ және $\mu^{(1)} = \lambda_{M+2}^{(1)}$ анықтаймыз.

k-ші қадам ($k = 2, 3, \dots$).

а) Табылған $z^{(k-1)}[t]$ мәндерін (13) теңдігінің оң жағына қойып, $Q_\xi(\theta) \lambda = -F_\xi(\theta) - G_\xi(z^{(k-1)}, \theta)$ теңдеуінен $\lambda^{(k)}$ табамыз, яғни $\lambda^{(k)} = -[Q_\xi(\theta)]^{-1} \cdot (F_\xi(\theta) + G_\xi(z^{(k-1)}, \theta))$.

ә) Табылған $\lambda^{(k)}$ векторының компоненттерін қолданып, (7), (8) Коши есептерін шешу арқылы $z^{(k)}[t]$ функцияларын табамыз.

б) $y^{(k)}(t) = \begin{cases} \lambda_r^{(k)} + z_r^{(k)}(t), & \text{егер } t \in [\theta_{r-1}, \theta_r), r = \overline{1, M}, \\ \lambda_{M+1}^{(k)}, & \text{егер } t = \theta_M \end{cases}$ а және $\mu^{(k)} = \lambda_{M+2}^{(k)}$ анықтаймыз.

Төмендегі белгілеулерді енгіземіз:

$$\|\mathcal{P}(t)\| \leq \aleph, \|\mathcal{P}_0(t)\| \leq \chi, \|\mathcal{K}_j(t)\| \leq \beta_j \quad (j = \overline{0, M}),$$

$$\sigma_\xi(\theta) = \max \left\{ 1, \max_{j=\overline{0, M}} \left\{ \frac{\beta_j}{\aleph} \right\}, \frac{\chi}{\aleph} \right\} \max_{r=\overline{1, M}} \sum_{k=\xi+1}^\infty \frac{(\aleph(\theta_r - \theta_{r-1}))^k}{k!}.$$

Келесі теорема ұсынылған алгоритмнің жинақтылығының және (3) – (6) есебінің жалғыз шешімінің бар болуының жеткілікті шарттарын береді:

Теорема. Егер кейбір $\xi \in \mathbb{N}$ үшін $Q_\xi(\theta)$ матрицасының кері матрицасы бар болып, $\|[Q_\xi(\theta)]^{-1}\| \leq \gamma_\xi(\theta)$ және $\gamma_\xi(\theta) \sigma_\xi(\theta) < 1$ теңсіздіктері орындалса, онда алгоритм бойынша анықталған $\{(z^{(k)}[t], \lambda^{(k)})\}_{k=0}^\infty$ тізбегі (3) – (6) есебінің жалғыз $(z^*[t], \lambda^*)$ шешіміне жинақталады, сонымен қатар

$$\begin{aligned} \|\lambda^* - \lambda^{(k)}\| &\leq \frac{\gamma_\xi(\theta) \sigma_\xi(\theta)}{1 - \gamma_\xi(\theta) \sigma_\xi(\theta)} \|\lambda^{(k)} - \lambda^{(k-1)}\|, \\ \|z_r^*(t) - z_r^{(k)}(t)\| &\leq \max \left\{ 1, \max_{j=\overline{0, M}} \left\{ \frac{\beta_j}{\aleph} \right\}, \frac{\chi}{\aleph} \right\} (e^{\aleph(t - \theta_{r-1})} - 1) \times \\ &\times \frac{\gamma_\xi(\theta) \sigma_\xi(\theta)}{1 - \gamma_\xi(\theta) \sigma_\xi(\theta)} \|\lambda^{(k)} - \lambda^{(k-1)}\|, \quad t \in [\theta_{r-1}, \theta_r), r = \overline{1, M} \end{aligned} \quad (14)$$

бағалаулары орын алады.

Ескерту: (14) бағалауынан

$$\|\lambda^* - \lambda^{(k)}\| \leq \frac{(\gamma_{\xi}(\theta)\sigma_{\xi}(\theta))^k}{1 - \gamma_{\xi}(\theta)\sigma_{\xi}(\theta)} \|\lambda^{(1)} - \lambda^{(0)}\|$$

теңсіздігінің дұрыстығы шығады.

(3) – (6) есебі мен (1), (2) есебі пара-пар болғандықтан бұл теоремадан келесі салдар шығады.

Салдар. Егер кейбір $\xi \in \mathbb{N}$ үшін Теореманың шарттары орындалса, онда алгоритм бойынша анықталған $\{(y^{(k)}(t), \mu^{(k)})\}_{k=0}^{\infty}$ тізбегі (1), (2) есебінің жалғыз $(y^*(t), \mu^*)$ шешіміне жинақталады.

Нәтижелер мен талқылау

Бұл бөлімде параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеу үшін сызықтық көпнүктелі шеттік есептің жуық шешімін табуда ұсынылған алгоритмнің жүзеге асырылуы көрсетіледі.

Берілгені: $\left[\frac{2}{5}, \frac{3}{5}\right]$ интервалында $\varepsilon = 10^{-3}$ дәлдікпен параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеу үшін төмендегідей сызықтық үшнүктелі шеттік есебінің жуық сандық шешімін табу керек:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} &= \mathcal{P}(t) \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} + \mathcal{K}_0(t) \begin{pmatrix} y_1(0.4) \\ y_2(0.4) \end{pmatrix} + \mathcal{K}_1(t) \begin{pmatrix} y_1(0.5) \\ y_2(0.5) \end{pmatrix} + \\ &+ \mathcal{K}_2(t) \begin{pmatrix} y_1(0.6) \\ y_2(0.6) \end{pmatrix} + \mathcal{P}_0(t) \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{pmatrix} + \mathcal{F}(t), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\mathcal{B}_0 \begin{pmatrix} y_1(0.4) \\ y_2(0.4) \end{pmatrix} + \mathcal{B}_1 \begin{pmatrix} y_1(0.5) \\ y_2(0.5) \end{pmatrix} + \mathcal{B}_2 \begin{pmatrix} y_1(0.6) \\ y_2(0.6) \end{pmatrix} + \mathcal{C}_0 \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{pmatrix} = d, \quad (16)$$

мұндағы

$$\mathcal{P}(t) = \begin{bmatrix} 1 & t^2 \\ 4t & -2 \end{bmatrix}, \mathcal{P}_0(t) = \begin{bmatrix} 3 & 2t & t^3 \\ t-1 & 4 & t^2 \end{bmatrix}, \mathcal{F}(t) = \begin{bmatrix} -8t^5 - 12t^2 - t - 17 \\ 25t^2 - 16 \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{K}_0(t) = \begin{bmatrix} 3 & t \\ t+1 & t^2 \end{bmatrix}, \mathcal{K}_1(t) = \begin{bmatrix} t^2 - 2 & 5 \\ 2t & 1 \end{bmatrix}, \mathcal{K}_2(t) = \begin{bmatrix} -2 & t^3 \\ 2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{B}_0 = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & -4 \\ 4 & 9 \\ 1 & 0 \\ 2 & 5 \end{bmatrix}, \mathcal{B}_1 = \begin{bmatrix} 6 & 4 \\ 2 & 1 \\ 7 & 9 \\ 0 & 5 \\ 4 & 3 \end{bmatrix}, \mathcal{B}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -6 \\ 5 & -8 \\ -3 & 4 \\ 7 & 8 \\ 9 & 0 \end{bmatrix}, \mathcal{C}_0 = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 6 \\ 8 & 9 & 0 \\ 11 & 3 & 6 \\ 8 & 0 & -3 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 60 \\ -30 \\ 68 \\ 83 \\ 100 \end{bmatrix}.$$

Шешуі: (15), (16) есебінің берілгендері бойынша $\aleph = 4.4$, $\chi = 4.76$, $\beta_0 = 3.6$, $\beta_1 = 6.84$, $\beta_2 = 2.216$ мәндері анықталады.

(15), (16) параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеу үшін үшнүктелі шеттік есебіне параметрлеу әдісін қолданып,

$$Q_3(\theta) = \begin{bmatrix} 1.424 & 0.067 & -1.188 & 0.527 & -0.208 & 0.0096 & 0.315 & 0.099 & 0.010 \\ 0.332 & 0.843 & 0.066 & -0.864 & 0.163 & 0.0007 & -0.023 & 0.371 & 0.019 \\ 0.318 & 0.058 & 0.932 & 0.557 & -1.207 & 0.018 & 0.315 & 0.122 & 0.018 \\ 0.174 & 0.034 & 0.293 & 0.967 & 0.160 & -0.998 & -0.008 & 0.375 & 0.029 \\ 3 & 1 & 6 & 4 & 1 & -6 & 2 & 4 & 6 \\ 0 & -4 & 2 & 1 & 5 & -8 & 8 & 9 & 0 \\ 4 & 9 & 7 & 9 & -3 & 4 & 11 & 3 & 6 \\ 1 & 0 & 0 & 5 & 7 & 8 & 8 & 0 & -3 \\ 2 & 5 & 4 & 3 & 9 & 0 & 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

есептейік, онда $\gamma_{\xi}(\theta) = 12.846$ және $\sigma_{\xi}(\theta) = 0.003$ болады.

Яғни $\gamma_{\xi}(\theta) \cdot \sigma_{\xi}(\theta) = 0.0385 < 1$ Теорема шарттары орындалады, демек (15), (16) есебінің жалғыз шешімі табылады.

Алгоритмнің 0-ші қадамында

$$\lambda^{(0)} = (\lambda_1^{(0)}, \lambda_2^{(0)}, \lambda_3^{(0)}, \lambda_4^{(0)}) = \left((12.15), (10.459), (8.305), \begin{pmatrix} 1.586 \\ -11.692 \\ 0.464 \end{pmatrix} \right),$$

1-ші қадамында

$$\lambda^{(1)} = (\lambda_1^{(1)}, \lambda_2^{(1)}, \lambda_3^{(1)}, \lambda_4^{(1)}) = \left((12.151), (10.46), (8.306), \begin{pmatrix} 1.589 \\ -11.698 \\ 0.461 \end{pmatrix} \right) \text{ параметрлері}$$

анықталады. Әр қадамда пайда болған (7), (8) түріндегі Коши есептерінің шешімдері 4-ретті Рунге-Кутта әдісімен $t_i = 0.4 + \frac{i}{320}$, $i = \overline{0,64}$ нүктелерінде табылды.

Келесі шамаларды есептеп аламыз:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{\gamma_{\xi}(\theta) \sigma_{\xi}(\theta)}{1 - \gamma_{\xi}(\theta) \sigma_{\xi}(\theta)} \|\lambda^{(1)} - \lambda^{(0)}\|, \\ \delta_2 &= \max \left\{ 1, \max_{j=0, M} \left\{ \frac{\beta_j}{N} \right\}, \frac{\chi}{N} \right\} \max_{r=1, M} \sup_{t \in [\theta_{r-1}, \theta_r]} (e^{N(t - \theta_{r-1})} - 1) \delta_1, \\ \delta_3 &= \max_{i=0, 64} \left\| \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y_1^{(1)}(t) \\ y_2^{(1)}(t) \end{pmatrix} \right\|_{t=t_i} - \mathcal{P}(t_i) \begin{pmatrix} y_1^{(1)}(t_i) \\ y_2^{(1)}(t_i) \end{pmatrix} - \mathcal{K}_0(t_i) \begin{pmatrix} \lambda_{11}^{(1)} \\ \lambda_{12}^{(1)} \end{pmatrix} - \\ &\quad - \mathcal{K}_1(t_i) \begin{pmatrix} \lambda_{21}^{(1)} \\ \lambda_{22}^{(1)} \end{pmatrix} - \mathcal{K}_2(t_i) \begin{pmatrix} \lambda_{31}^{(1)} \\ \lambda_{32}^{(1)} \end{pmatrix} - \mathcal{P}_0(t_i) \begin{pmatrix} \lambda_{41}^{(1)} \\ \lambda_{42}^{(1)} \\ \lambda_{43}^{(1)} \end{pmatrix} - \mathcal{F}(t_i) \left\| \right. \\ \delta_4 &= \left\| \mathcal{B}_0 \begin{pmatrix} \lambda_{11}^{(1)} \\ \lambda_{12}^{(1)} \end{pmatrix} + \mathcal{B}_1 \begin{pmatrix} \lambda_{21}^{(1)} \\ \lambda_{22}^{(1)} \end{pmatrix} + \mathcal{B}_2 \begin{pmatrix} \lambda_{31}^{(1)} \\ \lambda_{32}^{(1)} \end{pmatrix} + \mathcal{C}_0 \begin{pmatrix} \lambda_{41}^{(1)} \\ \lambda_{42}^{(1)} \\ \lambda_{43}^{(1)} \end{pmatrix} - d \right\|, \end{aligned}$$

онда $\delta_1 = 2.5 \times 10^{-4}$, $\delta_2 = 1.9 \times 10^{-4}$, $\delta_3 = 9.6 \times 10^{-4}$, $\delta_4 = 1.7 \times 10^{-13}$ екенін анықтаймыз. Бұл шамалардың барлығы бізге алдын ала берілген ε -нан кіші. Сондықтан, $(\lambda^{(1)}, z^{(1)}[t])$

жұбының компоненттерінен құралған $y^{(1)}(t)$ функциясы (15), (16) есебінің $\varepsilon = 10^{-3}$ дәлдікпен табылған жуық сандық шешімі болады.

Қорытынды

Жұмабаевтың параметрлеу әдісімен (1), (2) параметрі бар жүктелген дифференциалдық теңдеулер жүйесі үшін көпнүктелі шеттік есебін зерттеу осы есептің шешімінің бар және жалғыз болуының жеткілікті шарттарын алуға мүмкіндік берді. Бұл шарттардың тиімді тексерілетін шарттар қатарына жататындығы және (1), (2) есебінің бастапқы деректеріне негізделген бағалауларға толықтай сүйенетіндігі Жұмабаевтың параметрлеу әдісінің конструктивтілігі мен тиімділігін тағы бір мәрте дәлелдейді. Бұл жұмыс теоретик-математиктерге де, практик-зерттеушілерге де қызықты болуы мүмкін.

Қаржыландыру туралы ақпарат. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті (грант № AP23488811) қаржыландырады.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Geng F., Cui M. Multi-point boundary value problem for optimal bridge design // *Int. J. Comput. Math.* – 2010. – Vol. 87. – P. 1051–1056. <https://doi.org/10.1080/00207160903023573>.
- 2 Hajji M.A. Multi-point special boundary-value problems and applications to fluid flow through porous media // *Proc. of the international multi-conference of engineers and computer scientists (18–20 March)*. – Hong Kong, 2009.
- 3 Agarwal R.P. The numerical solution of multipoint boundary value problems // *J. Comput. Appl. Math.* – 1979. – Vol. 5. – P. 17–24. [https://doi.org/10.1016/0771-050X\(79\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0771-050X(79)90022-6).
- 4 Abdella K., Trivedi J. Solving multi-point boundary value problems using sinc-derivative interpolation // *Mathematics*. – 2020. – Vol. 8. – Art. 2104. <https://doi.org/10.3390/math8122104>.
- 5 Saadatmandi A., Dehghan M. The use of Sinc-collocation method for solving multi-point boundary value problems // *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* – 2012. – Vol. 17. – P. 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2011.06.018>.
- 6 Li H., Chen Y., Zhang J. Existence of multiple solutions for nonlinear multi-point boundary value problems // *Adv. Differ. Equ.* – 2020. – Vol. 2020. – Art. 266. <https://doi.org/10.1186/s13662-020-02604-1>.
- 7 Geng F.Z. A numerical algorithm for nonlinear multi-point boundary value problems // *J. Comput. Appl. Math.* – 2012. – Vol. 236. – P. 1789–1794. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2011.10.010>.
- 8 Thompson H.B., Tisdell C.C. Three-point boundary value problems for second-order ordinary differential equation // *Math. Comput. Model.* – 2001. – Vol. 34. – P. 311–318.
- 9 Tatari M., Dehghan M. An efficient method for solving multi-point boundary value problems and applications in physics // *J. Vib. Control*. – 2012. – Vol. 18. – P. 1116–1124. <https://doi.org/10.1177/1077546311408467>.
- 10 Tatari M., Dehghan M. The use of the Adomian decomposition method for solving multipoint boundary value problems // *Physica Scripta*. – 2006. – Vol. 73. – P. 672–676. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/73/6/023>.
- 11 Zou Y., Hu Q., Zhang R. On numerical studies of multi-point boundary value problem and its fold bifurcation // *Appl. Math. Comput.* – 2007. – Vol. 185. – P. 527–537. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.07.064>.
- 12 Nakhushev A.M. An approximation method for solving boundary value problems for differential equations with applications to the dynamics of soil moisture and groundwater // *Differ. Equat.* – 1982. – Vol. 18. – P. 72–81.
- 13 Aida-zade K.R., Abdullaev V.M. On the numerical solution of loaded systems of ordinary differential equations with nonseparated multipoint and integral conditions // *Numer. Anal. Appl.* – 2014. – Vol. 7. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1134/S1995423914010017>.
- 14 Dzhumabaev D.S., Bakirova E.A., Mynbayeva S.T. A method of solving a nonlinear boundary value problem with a parameter for a loaded differential equation // *Math. Methods Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 4. – P. 1788–1802. <https://doi.org/10.1002/mma.6003>.

15 Дженалиев М.Т., Рамазанов М.И. Нагруженные уравнения как возмущения дифференциальных уравнений. – Алматы: Ғылым, 2010. – 334 с.

16 Assanova A.T., Imanchiev A.E., Kadirbayeva Zh.M. Numerical solution of systems of loaded ordinary differential equations with multipoint conditions // *Comp. math. and math. phys.* – 2018. – Vol. 58. – P. 508–516. <https://doi.org/10.1134/S096554251804005X>.

17 Dzhumabayev D.S. Criteria for the unique solvability of a linear boundary-value problem for an ordinary differential equation // *USSR Comput. Math. Math. Phys.* – 1989. – Vol. 29. – P. 34–46.

18 Temesheva S.M., Dzhumabaev D.S., Kabdrakhova S.S. On one algorithm to find a solution to a linear two-point boundary value problem // *Lobachevskii J Math.* – 2021. – Vol. 42. – P. 606–612. <https://doi.org/10.1134/S1995080221030173>.

19 Bakirova E.A., Assanova A.T., Kadirbayeva Zh.M. A Problem with parameter for the integro-differential equations // *Math. Model. Anal.* – 2021. – Vol. 26. – P. 34–54. <https://doi.org/10.3846/mma.2021.11977>.

20 Iskakova N., Temesheva S., Uteshova R. On a problem for a delay differential equation // *Math. Methods Appl. Sci.* – 2023. – Vol. 46. – P. 11283–11297. <https://doi.org/10.1002/mma.9181>.

21 Bakirova E.A., Assanova A.T., Kadirbayeva Zh.M. Solving multi-point problem for Volterra-Fredholm integro-differential equations by using Dzhumabaev parametrization method // *Open Math.* – 2024. – Vol. 22. – Art. 20240024. <https://doi.org/10.1515/math-2024-0024>.

REFERENCES

1 Geng, F. and Cui, M. *Int. J. Comput. Math.*, 87, 1051–1056 (2010). <https://doi.org/10.1080/00207160903023573>.

2 Hajji, M.A. *Proc. of the international multi-conference of engineers and computer scientists (Hong Kong, 18–20 March 2009)*.

3 Agarwal, P.R., *J. Comput. Appl. Math.*, 5, 17–24 (1979). [https://doi.org/10.1016/0771-050X\(79\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0771-050X(79)90022-6).

4 Abdella, K. J. Trivedi. *Mathematics*, 8, 2104 (2020). <https://doi.org/10.3390/math8122104>.

5 Saadatmandi, A., Dehghan, M. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, 17, 593–601 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2011.06.018>.

6 Li, H., Chen, Y., Zhang, J. *Adv. Differ. Equ.*, 2020, 266 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13662-020-02604-1>.

7 Geng, F.Z. *J. Comput. Appl. Math.*, 236, 1789–1794 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cam.2011.10.010>.

8 Thompson, H.B., Tisdell, C.C. *Math. Comput. Model.*, 34, 311–318 (2001).

9 Tatari, M., Dehghan, M. *J. Vib. Control.*, 18, 1116–1124 (2012). <https://doi.org/10.1177/1077546311408467>.

10 Tatari, M., Dehghan, M. *Physica Scripta*, 73, 672–676 (2006). <https://doi.org/10.1088/0031-8949/73/6/023>.

11 Zou, Y., Hu, Q., Zhang, R. *Appl. Math. Comput.*, 185, 527–537 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.amc.2006.07.064>.

12 Nakhushev, A.M. *Differ. Equat.*, 18, 72–81 (1982).

13 Aida-zade, K.R., Abdullaev, V.M. *Numer. Anal. Appl.*, 7, 1–14 (2014). <https://doi.org/10.1134/S1995423914010017>.

14 Dzhumabaev, D.S., Bakirova, E.A., Mynbayeva, S.T. *Math. Methods Appl. Sci.*, 4, 1788–1802 (2020). <https://doi.org/10.1002/mma.6003>.

15 Dzhenaaliev, M.T., Ramazanov, M.I. *Nagruzhennye uravneniya - kak vozmushheniya differentsial'nykh uravnenij* (Almaty: Gylym, 2010). (in Russian).

16 Assanova, A.T., Imanchiev, A.E., Kadirbayeva, Zh.M. *Comp. math. and math. phys.*, 58, 508–516 (2018). <https://doi.org/10.1134/S096554251804005X>.

17 Dzhumabayev, D.S. *USSR Comput. Math. Math. Phys.*, 29, 34–46 (1989).

18 Temesheva, S.M., Dzhumabaev, D.S., Kabdrakhova, S.S. *Lobachevskii J Math.*, 42, 606–612 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1995080221030173>.

19 Bakirova, E.A., Assanova, A.T., Kadirbayeva, Zh.M. *Math. Model. Anal.*, 26, 34–54 (2021). <https://doi.org/10.3846/mma.2021.11977>.

20 Iskakova, N., Temesheva, S., Uteshova, R. *Math. Methods Appl. Sci.*, 46, 11283–11297 (2023). <https://doi.org/10.1002/mma.9181>.

21 Bakirova, E.A., Assanova, A.T., Kadirbayeva, Zh.M. *Open Math.*, 22, 20240024 (2024). <https://doi.org/10.1515/math-2024-0024>.

^{1,2}**Темешева С.М.,**

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, и.о. профессора,

ORCID ID: 0000-0002-3341-4539,

e-mail: temeshevasvetlana@gmail.com

^{1,3*}**Кадирбаева Ж.М.,**

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, профессор, ORCID ID: 0000-0001-8861-4100,

*e-mail: zhkadirbayeva@gmail.com

^{1,2}**Аширов С.Б.**

магистрант, ORCID ID: 0009-0008-6654-7531, e-mail: ashirov_27@mail.ru

¹Институт математики и математического моделирования, г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

³Казахский национальный женский педагогический университет, г. Алматы, Казахстан

РАЗРЕШИМОСТЬ МНОГОТОЧЕЧНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НАГРУЖЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ПАРАМЕТРОМ

Аннотация

Данная статья посвящена вопросам разрешимости многоточечной краевой задачи для системы нагруженных дифференциальных уравнений с параметром. Исследование проводится методом параметризации Джумабаева. Это позволяет свести решение исходной краевой задачи к решению системы алгебраических уравнений и задач Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений. В алгоритмы метода параметризации внесены изменения, которые позволяют ослабить влияние краевых условий на сходимость алгоритма. Следуя специфике метода параметризации, были получены достаточные условия существования и единственности решения многоточечной краевой задачи для системы нагруженных дифференциальных уравнений с параметром, которые также обеспечивают сходимость измененных алгоритмов метода. Результаты исследования представляют собой конструктивный инструмент анализа поведения различных моделей, которые описываются краевыми задачами для нагруженных дифференциальных уравнений с параметрами. Приведенный пример наглядно показывает реализуемость и эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: многоточечная краевая задача, нагружение, параметр, метод параметризации, разрешимость.

^{1,2}**Temesheva S.M.,**

Dr.Phys.-Math.Sc., Leading Researcher, Acting Professor,

ORCID ID: 0000-0002-3341-4539, e-mail: temeshevasvetlana@gmail.com

^{1,3*}**Kadirbayeva Zh.M.,**

Cand.Phys.-Math.Sc., Leading Researcher, Professor,

ORCID ID: 0000-0001-8861-4100, *e-mail: zhkadirbayeva@gmail.com

^{1,2}**Ashirov S.B.**

Master's student, ORCID ID: 0009-0008-6654-7531,

e-mail: ashirov_27@mail.ru

¹Institute of Mathematics and Mathematical Modeling, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan

SOLVABILITY OF A MULTIPOINT BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR LOADED DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH A PARAMETER

Abstract

This article is devoted to the solvability questions of a multipoint boundary value problem for a system of loaded differential equations with a parameter. The investigation is carried out using the Dzhumabaev parameterization

method. This allows us to reduce the solving of the original boundary value problem to the solving of a system of algebraic equations and Cauchy problems for ordinary differential equations. Modifications have been introduced into the parametrization method algorithms to reduce the influence of boundary conditions on the convergence of the algorithm. Following the specifics of the parametrization method, sufficient conditions for the existence and uniqueness of a solution to the multipoint boundary value problem for systems of loaded differential equations with a parameter have been established. These conditions also ensure the convergence of the modified algorithms. The research results provide a constructive tool for analyzing the behavior of various models described by boundary value problems for loaded differential equations with parameters. The presented example clearly demonstrates the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: multipoint boundary value problem, loading, parameter, parameterization method, solvability.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 16.07.2025

УДК 517.927.2

МРНТИ 27.29.15, 27.29.17, 27.29.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-221-230>

¹Усманов К.И.,

к.ф.-м.н, доцент, ORCID ID: 0000-0002-4311-5807,

e-mail: kairat.usmanov@ayu.edu.kz

¹Назарова К.Ж.,

к.ф.-м.н, доцент, ORCID ID: 0000-0002-2093-1879,

e-mail: kulzina.nazarova@ayu.edu.kz

^{1*}Турганбаева Ж.Н.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-9680-2347,

*e-mail: zhannur.turganbaeva@ayu.edu.kz

¹Международный казахско-турецкий университет им. А.Ясави, г. Туркестан, Казахстан

О РАЗРЕШИМОСТИ НЕЛОКАЛЬНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ С ИНВОЛЮЦИЕЙ

Аннотация

В данной научной работе рассматривается нелокальная краевая задача для одного класса интегро-дифференциальных уравнений, в структуре которых присутствует инволютивное преобразование. Основное внимание сосредоточено на применении метода параметризации, разработанного и предложенного профессором Д. Джумабаевым, целью которого является исследование условий существования и единственности решения для подобного рода задач, а также определение спектра собственных значений соответствующей краевой задачи. Как известно из теории, задача Коши для уравнений, содержащих инволюции, не всегда имеет единственное решение. Для преодоления данной трудности вводятся параметры $\mu_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\mu_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$ в середине рассматриваемого отрезка и осуществляется преобразование $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$, которое обеспечивает существование единственного решения задачи Коши. Это преобразование позволяет разделить исходную нелокальную краевую задачу на две части: во-первых, на специальную задачу Коши и, во-вторых, на систему линейных алгебраических уравнений относительно введенных параметров. После подстановки решения в краевые условия строится система уравнений, разрешимость которой зависит от невырожденности соответствующей матрицы. Кроме того, рассматривается случай неоднозначности решения, при котором исследуются собственные значения и формулируются условия разрешимости исходной задачи.

Ключевые слова: инволюция, краевая задача, метод параметризации, параметр, специальная задача Коши, разрешимость, собственные значения.

Введение

Интегро-дифференциальные уравнения с инволюцией образуют особый класс функционально-дифференциальных уравнений, которые находят широкое применение в математическом моделировании физических, биологических и инженерных процессов, характеризующихся обратными связями, симметричными зависимостями и запаздыванием. Подобные уравнения возникают, в частности, при моделировании процессов с пространственной симметрией, в задачах динамики колебаний, квантовой механики и теории управления.

Инволютивное преобразование имеет свойства вида $\alpha: [0, T] \rightarrow [0, T]$ и $\alpha^2(t) = \alpha(\alpha(t)) = t$. Интегро-дифференциальные уравнения, содержащие искомую функцию $x(t)$ и значение $x(\alpha(t))$ и $\dot{x}(\alpha(t))$, называют интегро-дифференциальными уравнениями с инволютивными

преобразованиями. На отрезке $[0,1]$ в качестве такого преобразования можно рассмотреть преобразование вида $\alpha(t) = 1 - t$.

Проблемам существования и единственности решений дифференциальных уравнений с инволюцией посвящен ряд фундаментальных исследований. Так, в работах Przeworska-Rolewicz [3] и J. Wiener [4] исследованы дифференциальные и дифференциально-операторные уравнения с инволюцией методами функционального анализа и разделения переменных. Свойства соответствующих преобразований и спектральных задач изучались в трудах N. Karapetians и S. Samko [5]. Построение функций Грина для одномерных уравнений с инволюцией представлено в работе Alberto Cabada и F. Tojo [6].

Корректность, качественные свойства решений, а также спектральные задачи для дифференциальных уравнений с различными видами инволютивных преобразований освещаются в работах [7–10]. Отдельное внимание уделяется собственным значениям и функциям для операторов второго порядка и уравнений с кратной инволюцией [8–11].

Несмотря на значительный прогресс в исследовании таких уравнений, многие вопросы разрешимости краевых и начально-краевых задач остаются открытыми. В частности, не всегда ясно, при каких условиях можно гарантировать существование решения. Настоящая работа направлена на исследование одной из таких задач с использованием метода параметризации, позволяющего установить условия разрешимости для краевых задач с инволютивными преобразованиями.

Материалы и методы

В данной работе на отрезке $[0,1]$ исследуется краевая задача типа Самарского – Ионкина для интегро-дифференциального уравнения с инволюцией

$$y''(x) + \varepsilon y''(1-x) = -\lambda y(x) + \nu \int_0^1 K(x,s)y(s) ds + f(x), \quad -1 < \varepsilon < 1, \quad (1)$$

$$y(0) = y(1), \quad y'(1) = 0. \quad (2)$$

Здесь $K(x,s)$ непрерывна на $[0,1] \times [0,1]$, функция $f(x)$ непрерывна на рассматриваемом отрезке.

Разрешимость краевой задачи (1), (2) будем исследовать методом параметризации, предложенный профессором Д. Джумабаевым [12].

1. Методология исследования

Для исследования исходной краевой задачи исследуем сначала разрешимость следующей краевой задачи

$$y''(x) + \varepsilon y''(1-x) = -\lambda y(x) + F(x), \quad -1 < \varepsilon < 1, \quad (3)$$

$$y(0) = y(1), \quad y'(1) = 0. \quad (4)$$

где $F(x) = \nu \int_0^1 K(x,s)y(s) ds + f(x)$.

Введя обозначения $\mu_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\mu_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$ и используя замену $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$, от краевой задачи (3), (4) перейдем к следующей эквивалентной краевой задаче с параметрами

$$u''(x) + \varepsilon u''(1-x) = -\lambda u(x) + F^*(x), \quad -1 < \varepsilon < 1, \quad (5)$$

$$u\left(\frac{1}{2}\right) = 0, \quad u'\left(\frac{1}{2}\right) = 0, \quad (6)$$

$$u(0) - u(1) - \mu_2 = 0, \quad (7)$$

$$u'(1) + \mu_2 = 0. \quad (8)$$

Где $F^*(x) = F(x) - \lambda\mu_1 - \lambda\mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$.

Лемма 1. Задачи (3), (4) и (5) – (8) эквивалентны.

Доказательство. Пусть $y(x)$ решение краевой задачи (3), (4). Тогда определяема в виде функция $u(x) = y(x) - \mu_1 - \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$ удовлетворяет (5) – (8), где $\mu_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\mu_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$. Действительно, $u''(x) = y''(x)$ и $u''(1-x) = y''(1-x)$.

Подставляя выражения для $u(x) = y(x) - \mu_1 - \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$ в (5), получим $u''(x) + \varepsilon u''(1-x) + \lambda u(x) - F(x) + \lambda\mu_1 + \lambda\mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right) = y''(x) + \varepsilon y''(1-x) + \lambda y(x) - F(x) = 0$, т.е. $y(x)$ удовлетворяет (5).

Так как $\mu_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\mu_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$, то

$$u\left(\frac{1}{2}\right) = y\left(\frac{1}{2}\right) - \mu_1 = \mu_1 - \mu_1 = 0,$$

$$u'\left(\frac{1}{2}\right) = y'\left(\frac{1}{2}\right) - \mu_2 = \mu_2 - \mu_2 = 0.$$

Выполнение условий (7), (8) следует из

$$u(0) - u(1) - \mu_2 = \left(y(0) - \mu_1 + \frac{\mu_2}{2}\right) - \left(y(1) - \mu_1 - \frac{\mu_2}{2}\right) - \mu_2 = y(0) - y(1) = 0,$$

$$u'(1) + \mu_2 = (y'(1) - \mu_2) + \mu_2 = y'(1) = 0.$$

Обратно, пусть $u(x)$, μ_1 , μ_2 – решение задачи (5) – (8). Тогда определяема в виде функция $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$ удовлетворяет (3), (4). Действительно, $y''(x) = u''(x)$ и $y''(1-x) = u''(1-x)$. Тогда используя то, что $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$, $F^*(x) = F(x) - \lambda\mu_1 - \lambda\mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$, получим

$$y''(x) + \varepsilon y''(1-x) + \lambda y(x) - F(x) = u''(x) + \varepsilon u''(1-x) + \lambda u(x) - F^*(x) = 0$$

т.е. решение (5) – (8) удовлетворяет (3).

Докажем, что $y(x)$, определенный равенством $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$, удовлетворяет и краевым условиям (4).

Так как

$$y(0) - y(1) = u(0) + \mu_1 - \frac{\mu_2}{2} - u(1) - \mu_1 - \frac{\mu_2}{2} = u(0) - u(1) - \mu_2 = 0.$$

Используя (8), можно показать, что $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$ удовлетворяет и $y'(1) = 0$.

Лемма доказана.

Как видно из (5) – (8), краевая задача формально разделена на две части, т.е. задача Коши (4), (5) для исходного уравнения и в систему линейных алгебраических уравнений (7), (8) для определения введенных параметров μ_1, μ_2 .

2. Решение задачи Коши

Рассмотрим уравнение (4)) в точках $x^* = 1 - x$, тогда

$$u''(1-x) + \varepsilon u''(x) = -\lambda u(1-x) + F^*(1-x), \quad -1 < \varepsilon < 1 \quad (9)$$

Складываем уравнения (5) и (9). Обозначим через $\theta(x) = u(x) + u(1-x)$, тогда

$$(1+\varepsilon)\theta''(x) = -\lambda\theta(x) + F_+^*(x), \quad -1 < \varepsilon < 1 \quad (10)$$

$$\theta\left(\frac{1}{2}\right) = 0, \quad \theta'\left(\frac{1}{2}\right) = 0, \quad (11)$$

где $F_+^*(x) = F^*(x) + F^*(1-x)$.

Вычитаем из уравнения (5) уравнение (9). Обозначим через $w(x) = u(x) - u(1-x)$, тогда

$$(1-\varepsilon)w''(x) = -\lambda w(x) + F_-^*(x), \quad -1 < \varepsilon < 1 \quad (12)$$

$$w\left(\frac{1}{2}\right) = 0, \quad w'\left(\frac{1}{2}\right) = 0 \quad (13)$$

где $F_-^*(x) = F^*(x) - F^*(1-x)$.

Лемма 2. Решение задачи Коши (10), (11), удовлетворяет условию $\theta(x) = \theta(1-x)$ на отрезке $[0,1]$.

Доказательство. Пусть $\theta(x)$ решение задачи Коши (10), (11). Так как $x \in [0,1]$, то $(1-x) \in [0,1]$, то и $\theta(1-x)$ удовлетворяет задаче Коши (10), (11). Обозначим через $z(x) = \theta(x) - \theta(1-x)$, тогда

$$(1+\varepsilon)z''(x) = -\lambda z(x), \quad -1 < \varepsilon < 1 \quad (14)$$

$$z\left(\frac{1}{2}\right) = 0, \quad z'\left(\frac{1}{2}\right) = 0 \quad (15)$$

Решение задачи Коши (14), (15) определяется в виде

$$z(x) = -\frac{\lambda}{1+\varepsilon} \int_{\frac{1}{2}}^x (x-\xi) z(\xi) d\xi.$$

Из леммы Гронуолла – Беллмана следует, что $z(x) = 0$ т.е. $\theta(x) = \theta(1-x)$.

Лемма доказана.

Аналогично доказывается следующая лемма.

Лемма 3. Решение задачи Коши (12), (13) удовлетворяет условию $w(x) = -w(1-x)$ на отрезке $[0,1]$.

Лемма 4. Пусть $\theta(x), w(x)$ решение соответственно задач (10), (11) и (12), (13), тогда $u(x) = \frac{1}{2}(\theta(x) + w(x))$ является единственным решением задачи (5), (6).

Доказательство. Пусть $\theta(x), w(x)$ решение соответственно задач (10), (11) и (12), (13), Тогда

$$u''(x) = \frac{1}{2}(\theta''(x) + w''(x)), \quad u''(1-x) = \frac{1}{2}(\theta''(1-x) + w''(1-x)).$$

Отсюда и $\theta''(x) = \theta''(1-x), w''(x) = -w''(1-x)$, следует

$$u''(x) + \varepsilon u''(1-x) = \frac{1}{2}(\theta''(x) + w''(x)) + \frac{\varepsilon}{2}(\theta''(1-x) + w''(1-x)) =$$

$$= \frac{1+\varepsilon}{2} \theta''(x) + \frac{1-\varepsilon}{2} w''(x) = -\frac{\lambda}{2} (\theta(x) + w(x)) + f^*(x) = -\lambda u(x) + F^*(x).$$

$$u\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \left(\theta\left(\frac{1}{2}\right) + w\left(\frac{1}{2}\right) \right) = 0, \quad u'\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} \left(\theta'\left(\frac{1}{2}\right) - w'\left(\frac{1}{2}\right) \right) = 0.$$

Лемма 5. Пусть $u(x)$ решение задачи (5), (6), тогда $\theta(x) = u(x) + u(1-x)$, $w(x) = u(x) - u(1-x)$ является решением соответственно задач (10), (11) и (12), (13).

Доказательство очевидно.

Пусть $\lambda > 0$, тогда решение задачи (10), (11) определяется в виде

$$\theta(x) = \sqrt{\frac{1}{\lambda(1+\varepsilon)}} \int_{\frac{1}{2}}^x \sin\left(\sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}}(x-\xi)\right) F_+^*(\xi) d\xi,$$

а решение задачи Коши (12), (13) в виде

$$w(x) = \sqrt{\frac{1}{\lambda(1-\varepsilon)}} \int_{\frac{1}{2}}^x \sin\left(\sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}}(x-\xi)\right) F_-^*(\xi) d\xi.$$

Из леммы 4 следует

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\lambda(1+\varepsilon)}} \int_{\frac{1}{2}}^x \sin\left(\sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}}(x-\xi)\right) F_+^*(\xi) d\xi + \\ &+ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\lambda(1-\varepsilon)}} \int_{\frac{1}{2}}^x \sin\left(\sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}}(x-\xi)\right) F_-^*(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (16)$$

Пусть $K(x, s) = 1$. Тогда

$$F(x) = v \int_0^1 K(x, s) y(s) ds + f(x) = v \int_0^1 u(s) ds + v\mu_1 + f(x)$$

Учитывая, что $F^*(x) = F(x) - \lambda\mu_1 - \lambda\mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$ получим

$$\begin{aligned} F_+^*(x) &= F(x) + F(1-x) - 2\lambda\mu_1 = \\ &= 2v \int_0^1 u(s) ds + f(x) + f(1-x) + 2(v-\lambda)\mu_1 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} F_-^*(x) &= F(x) + F(1-x) - 2\lambda\mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right) = \\ &= f(x) - f(1-x) - 2\lambda\mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right). \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя (17) и (18) в (16) получим интегральное уравнение

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{v}{\lambda} \left(1 - \cos\left(\sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}}\left(x - \frac{1}{2}\right)\right) \right) \int_0^1 u(s) ds + \\ &+ \left(\frac{v}{\lambda} - 1\right) \left(1 - \cos\left(\sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}}\left(x - \frac{1}{2}\right)\right) \right) \mu_1 - \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right) + \end{aligned}$$

где

$$+\mu_2 \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{\lambda}} \sin \left(\sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}} \left(x - \frac{1}{2} \right) \right) + \tilde{F}(x) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \tilde{F}(x) = & \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\lambda(1+\varepsilon)}} \int_{\frac{1}{2}}^x \sin \left(\sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} (x - \xi) \right) f_+(\xi) d\xi + \\ & + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\lambda(1-\varepsilon)}} \int_{\frac{1}{2}}^x \sin \left(\sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}} (x - \xi) \right) f_-(\xi) d\xi. \end{aligned}$$

Пусть $\lambda \neq \alpha v$, где, $\alpha = \left(1 - 2 \sqrt{\frac{1+\varepsilon}{\lambda}} \sin \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} \right) \right)$, тогда, применяя теорию Фредгольма, получим

$$\int_0^1 u(s) ds = \frac{(v-\lambda)\alpha}{\lambda-\alpha v} \mu_1 + \frac{\lambda}{\lambda-\alpha v} \int_0^1 \tilde{F}(s) ds,$$

т.е. решение интегрального уравнения (19) можно записать в виде

$$\begin{aligned} u(x) = & \frac{v-\lambda}{\lambda-\alpha v} \left(1 - \cos \left(\sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} \left(x - \frac{1}{2} \right) \right) \right) \mu_1 - \mu_2 \left(x - \frac{1}{2} \right) + \\ & + \mu_2 \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{\lambda}} \sin \left(\sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}} \left(x - \frac{1}{2} \right) \right) + \tilde{F}(x) + \\ & + \frac{v}{\lambda-\alpha v} \left(1 - \cos \left(\sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} \left(x - \frac{1}{2} \right) \right) \right) \int_0^1 \tilde{F}(s) ds \end{aligned} \quad (20)$$

В (20), определив значения $u(0)$, $u(1)$, $u'(1)$ и подставляя в условия (7), (8), получим

$$\mu_2 \sin \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}} \right) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}} (\tilde{F}(0) - \tilde{F}(1)) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{v-\lambda}{\lambda-\alpha v} \sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} \mu_1 \sin \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} \right) + \mu_2 \cos \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}} \right) = \\ = -\tilde{F}'(1) + \frac{1}{\lambda(1-\alpha)} \sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} \sin \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} \right) \int_0^1 \tilde{F}(s) ds \end{aligned} \quad (22)$$

Матрицу, соответствующую параметрам μ_1 , μ_2 , обозначим через

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & \sin \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}} \\ \frac{v-\lambda}{\lambda-\alpha v} \sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} \sin \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}} & \cos \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Результаты и обсуждение

Теорема 1. Пусть $\lambda \neq \alpha v$, тогда для однозначной разрешимости краевой задачи (1), (2) необходима и достаточна обратимость матрицы Q .

Доказательство. Если матрица Q обратима, то система линейных уравнений (21), (22) совместно определенная, т.е. однозначно определим значения параметров μ_1, μ_2 . Подставляя полученные значения в (5), (6), найдем единственное решение задачи Коши $u(x)$. На основании леммы 1 определяем $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2 \left(x - \frac{1}{2}\right)$ – единственное решение краевой задачи (1), (2).

Обратно, пусть краевая задача (1), (2) однозначно разрешима и $y(x)$ его единственное решение. Введя обозначения $\mu_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\mu_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$ и используя замену $u(x) = y(x) - \mu_1 - \mu_2 \left(x - \frac{1}{2}\right)$, от краевой задачи (1), (2) перейдем к эквивалентной краевой задаче с параметрами (5) – (8).

Предположим, что матрица Q необратима. Тогда система линейных уравнений имеет по крайней мере два различных решения μ_1, μ_2 и $\widetilde{\mu}_1, \widetilde{\mu}_2$. Но $\mu_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\mu_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$ и $\widetilde{\mu}_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\widetilde{\mu}_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$, отсюда следует, что матрица Q обратима и $\mu_1 = \widetilde{\mu}_1$, $\mu_2 = \widetilde{\mu}_2$.

Теорема доказана.

Если матрица Q необратима, т.е. $\frac{\lambda - v}{\lambda - \alpha v} \sin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}}\right) \sin\left(\sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}}\right) = 0$, тогда из системы (21), (22) следует:

Теорема 2. Если $\lambda \neq \alpha v$ и $\lambda_{1n} = 4(1 - \varepsilon)n^2\pi^2$, то для разрешимости краевой задачи (1), (2) необходимо и достаточно, чтобы

$$\int_0^1 \sin 2n\pi\xi \cdot f(\xi) d\xi = 0. \quad (24)$$

Доказательство. Пусть выполнены условия теоремы. Так как $\lambda_{1n} = 4(1 - \varepsilon)n^2\pi^2$, то $\mu_2 \cos\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda_{1n}}{1-\varepsilon}}\right) = \mu_2 \cos(n\pi) = (-1)^n \mu_2$, т.е. система уравнений (21), (22) совместна неопределенная.

В уравнении (22), считая μ_1 свободным, находим значения μ_2 . Определив решение задачи Коши (5), (6) и подставляя в $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2 \left(x - \frac{1}{2}\right)$, находим решения краевой задачи (1), (2).

Наоборот, пусть краевая задача (1), (2) имеет решение при $\lambda_{1n} = 4(1 - \varepsilon)n^2\pi^2$. Предположим, что $\int_0^1 \sin 2n\pi\xi \cdot f(\xi) d\xi \neq 0$.

Применяя метод параметризации, от краевой задачи (1), (2) приходим к системе линейных уравнений (21), (22). Тогда из уравнения (21) получим

$$0 = \tilde{F}(0) - \tilde{F}(1) = \int_0^1 \sin 2n\pi\xi \cdot f(\xi) d\xi \neq 0.$$

Из противоречия следует необходимость выполнения условия (24), при $\lambda_{1n} = 4(1 - \varepsilon)n^2\pi^2$.

Теорема доказана.

Теорема 3. Пусть $\lambda \neq \alpha v$. Если $\lambda = v$ и $\lambda_{2k} = (1 + \varepsilon)k^2\pi^2$, то для разрешимости краевой задачи (1), (2) необходимо и достаточно выполнения условия

$$\int_0^1 \left(\frac{1}{(1-\varepsilon)} \sin\left(\sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}}\left(\xi - \frac{1}{2}\right)\right) + \frac{1}{(1+\varepsilon)} \sin\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\lambda}{1-\varepsilon}}\right) \cos(2k\pi\xi) \right) f(\xi) d\xi = 0. \quad (25)$$

Доказательство. Пусть $\lambda \neq \alpha v$ и $\lambda_2 = v$. Тогда

$$\lambda \neq \alpha v \Rightarrow \lambda(1 - \alpha) \neq 0 \Rightarrow \alpha = 1 \Rightarrow \sqrt{\frac{1+\varepsilon}{\lambda}} \sin\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\lambda}{1+\varepsilon}}\right) = 0 \Rightarrow \lambda_{2k} = 4(1 + \varepsilon)k^2\pi^2.$$

Дальнейшие выкладки аналогичны доказательству теоремы 3 [18].

Заключение

В данной работе была рассмотрена краевая задача типа Самарского – Ионкина для интегро-дифференциального уравнения. Для исследования разрешимости рассматриваемой задачи был применен метод параметризации Д. Джумабаева. Определены разрешимость и собственные значения исследуемой задачи. В дальнейшем предполагается применение результатов данной работы для исследования краевых задач для интегро-дифференциального уравнения с дробной производной, а также для исследования краевых и начально-краевых задач для дифференциальных уравнений с частными производными.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP 23488086).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Przeworska-Rolewicz, D. Equations with Transformed Argument, An Algebraic Approach, 1st ed.; Elsevier Scientific: Amsterdam, The Netherlands, 1973.
- 2 Wiener, J. Generalized Solutions of Functional Differential Equations, 1st ed., World Scientific: Singapore, River Edge NJ, USA, London, UK Hong Kong, China, 1993.
- 3 Karapetians, N., Samko, S. Equations with Involution Operators, 1st ed. World Birkhäuser: Boston, MA, USA, 2001.
- 4 Cabada, A., Tojo, F.A.F. Differential Equations with Involutions, 1st ed., Atlantis Press: Paris, France, 2015.
- 5 Al-Salti, N., Kerbal, S., Kirane, M. Initial-boundary value problems for a time-fractional differential equation with involution perturbation. Math. Model. Nat. Phenomena, 14, 312 (2019).
- 6 Kritskov, L.V., Sadybekov, M.A., Sarsenbi, A.M. Properties in L_p of root functions for a nonlocal problem with involution. Turk. J. Math., 43, 393–401 (2019).
- 7 Sarsenbi, A., Sarsenbi, A. On eigenfunctions of the boundary value problems for second order differential equations with involution. Symmetry, 13, 1972 (2021).
- 8 Turmetov, B., Karachik, V. On eigenfunctions and eigenvalues of a nonlocal Laplace operator with multiple Involution. Symmetry, 13, 1981 (2021).
- 9 Dildabek, G., Ivanova, M.B., Sadybekov, M.A. On root functions of nonlocal differential second-order operator with boundary conditions of periodic type. Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Science, 112 (4), 29–44 (2021).
- 10 Dzhumabayev, D.S. Criteria for the unique solvability of a linear boundary-value problem for an ordinary differential equation. Comput Maths Math Phys., 29 (34), 34–46 (1989).
- 11 Assanova, A.T., Bakirova, E.A., Kadirbayeva, Z.M. Numerical Solution to a Control Problem for Integro-Differential Equations, Comput. Math. and Math. Phys., 60 (2), 203–221 (2020).
- 12 Dzhumabaev, D.S. An algorithm for solving a linear two-point boundary value problem for an integrodifferential equation, Computational Mathematics and Mathematical Physics., 53 (6), 736–758 (2013).

¹Усманов К.И.,

ф.-м.ғ.к., доцент, ORCID ID: 0000-0002-4311-5807, e-mail: kairat.usmanov@ayu.edu.kz

¹Назарова К.Ж.,

ф.-м.ғ.к., доцент, ORCID ID: 0000-0002-2093-1879, e-mail: kulzina.nazarova@ayu.edu.kz

^{1*}Турганбаева Ж.Н.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-9680-2347, *e-mail: zhannur.turganbaeva@ayu.edu.kz

¹Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан

ИНВОЛЮЦИЯСЫ БАР ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ТЕҢДЕУГЕ АРНАЛҒАН БЕЙЛОКАЛЬДІ ШЕТТІК ЕСЕПТІҢ ШЕШІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ

Аңдатпа

Бұл ғылыми жұмыста құрамында инволютивті түрлендіру бар интегро-дифференциалдық теңдеулердің бір класына арналған бейлокальді шеттік есеп қарастырылады. Жұмыста профессор Д. Жұмабаев әзірлеген параметрлеу әдісін қолдануға ерекше көңіл бөлінеді. Бұл әдістің мақсаты – мұндай есептердің шешімінің бар болу және бірегейлік шарттарын зерттеу, сондай-ақ сәйкес шеттік есептің меншікті мәндер спектрін анықтау. Теория бойынша инволюциясы бар теңдеулер үшін Коши есебі әрдайым бір ғана шешімге ие бола бермейтіні белгілі. Бұл қиындықты шешу үшін қарастырылып отырған кесіндінің ортасына параметрлер $\mu_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\mu_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$ енгізіліп, Коши есебінің бірегей шешімінің бар болуын қамтамасыз ететін түрлендіру $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$ жүргізіледі. Бұл түрлендіру бастапқы бейлокальді шеттік есепті екі бөлікке бөлуге мүмкіндік береді: біріншісі – арнайы Коши есебі, екіншісі – енгізілген параметрлерге қатысты сызықтық алгебралық теңдеулер жүйесі. Шешімді шеттік шарттарға қойғаннан кейін сәйкес матрицаның ерекшелігіне байланысты болатын теңдеулер жүйесі құрылады. Сонымен қатар шешімнің бірімді емес жағдайы қарастырылып, бұл жағдайда меншікті мәндер зерттеліп, бастапқы есептің шешімділік шарттары тұжырымдалады.

Тірек сөздер: инволюция, шеттік есеп, параметрлеу әдісі, параметр, арнайы Коши есебі, шешімділік, меншікті мәндер.

¹Usmanov K. I.,

Cand.Phys.-Math.Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-4311-5807

e-mail: kairat.usmanov@ayu.edu.kz

¹Nazarova K. Zh.,

Cand.Phys.-Math.Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-2093-1879,

e-mail: kulzina.nazarova@ayu.edu.kz

^{1*}Turganbayeva Zh. N.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-9680-2347, *e-mail: zhannur.turganbaeva@ayu.edu.kz

¹International Kazakh-Turkish University named after H.A. Yasawi, Turkestan, Kazakhstan.

ON THE SOLVABILITY OF A NONLOCAL BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR AN INTEGRO-DIFFERENTIAL EQUATION WITH INVOLUTION

Abstract

This scientific paper considers a nonlocal boundary value problem for a certain class of integro-differential equations that include an involutive transformation in their structure. The main focus is on the application

of the parameterization method developed and proposed by Professor D. Dzhumabayev, the aim of which is to study the conditions for the existence and uniqueness of solutions for such problems, as well as to determine the spectrum of eigenvalues of the corresponding boundary value problem. As is known from theory, the Cauchy problem for equations involving involutions does not always have a unique solution. To overcome this difficulty, $\mu_1 = y\left(\frac{1}{2}\right)$, $\mu_2 = y'\left(\frac{1}{2}\right)$ parameters are introduced at the midpoint of the considered interval, and a transformation $y(x) = u(x) + \mu_1 + \mu_2\left(x - \frac{1}{2}\right)$ is performed that ensures the existence of a unique solution to the Cauchy problem. This transformation allows the original nonlocal boundary value problem to be divided into two parts: first, a special Cauchy problem, and second, a system of linear algebraic equations with respect to the introduced parameters. After substituting the solution into the boundary conditions, a system of equations is constructed, the solvability of which depends on the non-degeneracy of the corresponding matrix. In addition, the case of non-uniqueness of the solution is considered, in which the eigenvalues are studied and the paper establishes criteria ensuring the existence of solutions to the initial boundary value problem.

Keywords: involution, boundary value problem, parameterization method, parameter, special Cauchy problem, solvability, eigenvalues.

Дата поступления статьи в редакцию: 07.08.2025

УДК 517.51
МРНТИ 27.39.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-231-242>

¹Тургумбаев М.Ж.,
к.ф.-м.н., доцент, ORCID ID: 0009-0007-1422-8160,
e-mail: mentur60@mail.ru

^{2*}Мұхамбетжан М.А.,
докторант, ORCID ID: 0009-0002-3632-2303,
*e-mail: manshuk-9696@mail.ru

²Сулейменова З.Р.,
к.ф.-м.н., доцент, ORCID ID: 0009-0005-9114-7247,
e-mail: zr-s2012@yandex.ru

¹Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова,
г. Караганда, Казахстан

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
г. Астана, Казахстан

ВЕСОВЫЕ НЕРАВЕНСТВА ДЛЯ СУММЫ РЯДОВ ПО МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫМ СИСТЕМАМ

Аннотация

В работе рассматриваются ряды по мультипликативным системам Прайса с коэффициентами, принадлежащими классу последовательностей ограниченной вариации. Установлены условия для оценки нормы суммы таких рядов в весовых пространствах Лебега. Условия сформулированы в терминах весовой функции и соответствующей весовой последовательности. Методология включает техники гармонического анализа, преобразование Абеля и критерии Макенхаупта об ограниченности оператора Харди в весовых пространствах Лебега. Кроме того, рассматриваются дискретные трехвесовые неравенства Харди и анализируется их применимость к рассматриваемым рядам. Полученные теоремы устанавливают связь между вариацией коэффициентов и интегральными характеристиками весов. Результаты представляют интерес для дальнейшего исследования в рамках теории рядов, гармонического анализа и задач, связанных с оценками решений дифференциальных уравнений в функциональных пространствах. Работа расширяет область применения известных аналитических техник к более широкому классу функциональных рядов. Результаты сформулированы в виде теорем, связывающих вариацию коэффициентов ряда и интегральные свойства весовой функции. Работа также использует критерии дискретных трехвесовых неравенств Харди и анализирует их применимость к мультипликативным системам. Полученные результаты применимы в задачах гармонического анализа, теории дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: мультипликативные системы, взвешенные пространства Лебега, последовательность из класса ограниченной вариации, оператор Харди, условия интегрируемости.

Введение

В данной статье рассматриваются вопросы интегрируемости с весом суммы рядов по мультипликативным системам Прайса. Также найдены условия на весовую функцию и на весовые последовательности для получения оценки весовой нормы суммы рассматриваемых рядов.

Сначала приведем необходимые определения и обозначения.

Пусть $\{p_k\}_{k=1}^{\infty}$ – произвольная последовательность целых чисел $p_k \geq 2, k \in \mathbb{N}$, по определению $m_0 = 1$, $m_n = p_1 p_2 \cdots p_n, n \in \mathbb{N}$, тогда каждое $x \in [0, 1)$ имеет разложение вида

$$x = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{x_k}{m_k}, \text{ где } x_k \in \mathbb{Z} \cap [0, p_k)$$

Разложение (1) будет единственным, если для $x = \frac{j}{m_k}$ взять разложение с конечным числом ненулевых x_k . Каждое $n \in \mathbb{Z}$ единственным образом представимо в виде

$$n = \sum_{j=1}^{\infty} \alpha_j m_{j-1}, \alpha_j \in \mathbb{Z} \cap [0, p_j).$$

Для любого $x \in [0, 1)$ положим по определению

$$\psi_n(x) = \exp\left(2\pi i \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\alpha_j x_j}{p_j}\right), n \in \mathbb{Z}_+. \quad (2)$$

Известно, что система $\{\psi_n\}_{n=0}^{\infty}$ называется системой Прайса, если является ортонормированной системой, полной в $L^1(0, 1)$ [1–3]. Если все $p_k = 2$, то $\{\psi_n\}_{n=0}^{\infty}$ совпадает с системой Уолша в нумерации Пэли.

Мы будем писать $F \lesssim G$, если $F \leq C \cdot G$ для некоторой константы $C > 0$, не зависящей от существенных параметров выражений F и G .

В теории тригонометрических рядов хорошо известна теорема Харди Литтлвуда о рядах с монотонными коэффициентами [4]. Необходимое и достаточное условие принадлежности функции некоторым функциональным пространствам выражается через монотонность и суммируемость ее коэффициентов Фурье.

В данной статье рассматриваются весовые функции с другими условиями. Одной из классических задач гармонического анализа является задача нахождения условий, при которых сумма тригонометрического ряда

$$\psi(x) \sim \sum_n (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

принадлежит пространству Лебега $L_p(\mathbb{T})$.

Сначала напомним общие достаточные условия, формулируемые в терминах коэффициентов ряда (для простоты в дальнейшем считаем, что $a_0 = 0$ и полагаем $|c_n| := |a_n| + |b_n|$):

а) неравенство Хаусдорфа-Юнга [4]

$$\|\psi\|_p \lesssim \left(\sum_n |c_n|^{p'} \right)^{\frac{1}{p'}}, 2 \leq p \leq \infty,$$

б) неравенство Харди-Литтлвуда [4]

$$\|\psi\|_p \lesssim \left(\sum_n |c_n|^p n^{p-2} \right)^{\frac{1}{p}}, 2 \leq p < \infty.$$

Неравенства Харди-Литтлвуда были обобщены в различных направлениях: рассматривались взвешенные пространства, а также более общие условия монотонности [6–11]. В работе С. Тихонова [5] получены неравенства для нормы суммы тригонометрических рядов Фурье со специальными коэффициентами.

Аналоги теоремы Харди-Литтлвуда для рядов по системе Уолша были приведены в [1], а для мультипликативных систем – в [2, 12]. Вопросы весовой интегрируемости сумм рядов по мультипликативным системам с убывающими коэффициентами изучались в работах [12–16]. Эта статья является продолжением работы [15].

В настоящей работе получен критерий оценки взвешенной нормы суммы ряда по мультипликативной системе с коэффициентами ограниченной вариации.

Материалы и методы

Через $L^p[0,1]$, $1 \leq p \leq \infty$, обозначим пространство Лебега с нормой

$$\|f\|_p = \left(\int_{[0,1]} |f(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}}, \text{ при } 1 \leq p < \infty, \\ \|f\|_\infty = \operatorname{esssup}_{x \in G} |f(x)|, \text{ при } p = \infty.$$

Пусть $1 \leq p < \infty$ и ω – неотрицательная локально суммируемая функция на $[0,1]$. Измеримая функция $f(x)$ принадлежит весовому пространству $L^p_\omega[0,1]$, если

$$\|f\|_{L^p_\omega[0,1]} = \left(\int_0^1 |f(x)|^p \omega(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} < \infty.$$

Через $L^p_\omega[0,1]^\downarrow$ мы обозначим множество всех невозрастающих, неотрицательных измеримых функций из $L^p_\omega[0,1]$. Сначала приведем известные условия для ограниченности оператора Харди

$$Hf(x) = \frac{1}{x} \int_0^x f(t) dt$$

в пространствах (L^p_ω) и $(L^p_\omega)^\downarrow$.

Б. Макенхаупт [10] доказал, что $H: L^p_\omega \rightarrow L^p_\omega$, $p \in (1, +\infty)$, то есть оператор Харди H ограничен в пространстве $L^p_\omega[0,1]$ тогда и только тогда, когда функция ω удовлетворяет условию M_p

$$\sup_{x>0} \left(\int_x^1 \frac{\omega(t)}{t^p} dt \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_0^x \omega(t) t^{-\frac{p'}{p}} dt \right)^{\frac{1}{p'}} < \infty, \text{ где } \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1.$$

А. Ариньо и Б. Макенхаупт [10] доказали, что $H: (L^p_\omega)^\downarrow \rightarrow L^p_\omega$, $p \in (0, \infty)$ тогда и только тогда, когда функция ω удовлетворяет условию B_p :

$$\int_x^1 \frac{\omega(t)}{t^p} dt \lesssim \frac{1}{x^p} \int_0^x \omega(t) dt, \text{ где } x \in [0,1].$$

Ясно, что $M_p \subseteq B_p$, для $1 \leq p < \infty$.

Говорят, что функция ω удовлетворяет условию RB_p , если для любого $x \in [0,1]$ и выполняется следующее неравенство:

$$\frac{1}{x^p} \int_0^x \omega(t) dt \lesssim \int_x^1 \frac{\omega(t)}{t^p} dt, p \in (0, \infty).$$

Это условие является обратным к условию B_p .

Для мультипликативной системы, определенной в (2), ядро Дирихле определяется равенством:

$$D_n(x) := \sum_{k=0}^{n-1} \psi_k(x).$$

Лемма 1. [1, гл. 1.; 2, гл. 4].

1. Пусть $D_n(x) = \sum_{k=0}^{n-1} \chi_k(x)$. Тогда $D_{m_n}(x) = m_n \cdot \chi_{[0,1/m_n)}(x)$, $n \in \mathbb{Z}_+$, где χ_E – характеристическая функция множества E .

2. Пусть $\sup_n p_n = K < \infty$, для любых $x \in (0,1)$ и $k \in \mathbb{N}$ имеет место неравенство $|D_k(x)| \leq \frac{K}{x}$.

А. Ариньо и Б. Макенхаупт [10] (в непрерывном случае) и Беннетт Гроссе-Эрдман [11] (в дискретном случае) получили следующее описание неравенства Харди с одним весом.

Лемма 2. Если $1 \leq p < \infty$, то неравенство

$$\sum_{n=1}^{\infty} \omega_n \left(\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_m \right)^p \lesssim \sum_{n=1}^{\infty} \omega_n x_n^p$$

справедливо для любой невозрастающей последовательности $\{x_n\}$ тогда и только тогда, когда

$$\sum_{m=n}^{\infty} \frac{\omega_m}{m^p} \lesssim \frac{1}{n^p} \sum_{m=1}^n \omega_m.$$

Нам понадобится следующее дискретное трехвесовое неравенство Харди [17]; в случае $\theta_n = 1$ изучался в [11]; непрерывный случай рассматривался в [18] и [19].

Лемма 3. Пусть $1 < p \leq q < \infty$ и $\{\theta_n\}, \{\beta_n\}, \{\gamma_n\}$ – неотрицательные последовательности и

$$\Theta_m = \sum_{s=1}^m \theta_s, B_m = \sum_{s=1}^m \beta_s.$$

Тогда неравенство

$$\left(\sum_{n \in \mathbb{N}} \gamma_n \left(\sum_{m=1}^n x_m \theta_m \right)^q \right)^{\frac{1}{q}} \lesssim \left(\sum_{n \in \mathbb{N}} \beta_n x_n^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

справедливо для любой невозрастающей последовательности $\{x_n\}$ тогда и только тогда, когда

$$K_1 := \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{m=1}^n \Theta_m^q \gamma_m \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{m=1}^n \beta_m \right)^{-\frac{1}{p}} < \infty,$$

$$K_2 := \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{m=n}^{\infty} \gamma_m \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{m=1}^{n-1} \Theta_m^{p'} (B_m^{1-p'} - B_{m+1}^{1-p'}) + \Theta_n^{p'} B(n)^{1-p'} \right)^{\frac{1}{p'}} < \infty.$$

Результаты и обсуждение

Мы будем рассматривать функции, являющиеся суммами рядов по мультипликативным системам:

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k \psi_k(x),$$

где $\{\lambda_k\}$ является последовательностью ограниченной вариации, то есть

$$\sum_{k=n}^{\infty} |\lambda_k - \lambda_{k+1}| < \infty.$$

В следующей теореме приводится оценка нормы функции $f(x)$ в весовом пространстве Лебега L_{ω}^p через ее коэффициенты.

Теорема 1. Пусть $1 \leq p < \infty$, $\sup p_n = K < \infty$, $\{\lambda_k\}$ – последовательность ограниченной вариации, $\lambda_n \rightarrow 0$ и пусть $\Lambda_n = \sum_{k=n}^{\infty} |\lambda_k - \lambda_{k+1}|$ и

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k \psi_k(x),$$

Тогда неравенство

$$\|f\|_{L_{\omega}^p(0,1)} \lesssim \left(\sum_{n=0}^{\infty} \Lambda_n^p \int_{\frac{1}{n+1}}^{\frac{1}{n}} \frac{\omega(x)}{x^p} dx \right)^{1/p} \quad (3)$$

выполняется тогда и только тогда, когда $\omega \in RB_p$. Доказательство. Пусть $x \in \left(\frac{1}{n+1}, \frac{1}{n}\right]$, $n \in \mathbb{N}$. Учитывая, что $|\psi_k(x)| = 1$, получаем

$$\begin{aligned} \left| \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k \psi_k(x) \right| &\leq \left| \sum_{k=0}^{n-1} \lambda_k \psi_k(x) \right| + \left| \sum_{k=n}^{\infty} \lambda_k \psi_k(x) \right| \\ &\leq \sum_{k=0}^{n-1} |\lambda_k| + \left| \sum_{k=n}^{\infty} \lambda_k \psi_k(x) \right|. \end{aligned}$$

Для второй суммы, применяя преобразование Абеля, получаем

$$|f(x)| \leq \sum_{k=0}^{n-1} |\lambda_k| + |\lambda_{n+1} D_n(x)| + \sum_{k=n}^{\infty} |\lambda_k - \lambda_{k+1}| \cdot |D_k(x)|.$$

Применяя лемму 1, мы имеем

$$|f(x)| \lesssim \sum_{k=1}^{n-1} |\lambda_k| + n\Lambda_k, \text{ при } \frac{1}{n+1} \leq x < \frac{1}{n}.$$

Далее, отметим, что

$$\sum_{k=0}^n |\lambda_k| = \sum_{k=0}^n \left| \sum_{j=k}^{\infty} (\lambda_j - \lambda_{j+1}) \right| \leq \sum_{k=0}^n \Lambda_k,$$

и в силу того, что Λ_n монотонно не возрастает, имеем

$$n\Lambda_n \leq \sum_{k=0}^n \Lambda_k$$

Таким образом,

$$|f(x)| \lesssim C \sum_{k=0}^n \Lambda_k, \text{ при } \frac{1}{n+1} \leq x < \frac{1}{n}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \|f\|_{L_{\omega}^p[0,1]} &= \left(\sum_{n=1}^{\infty} \int_{\frac{1}{n+1}}^{\frac{1}{n}} |f(x)|^p \omega(x) dx \right)^{1/p} \\ &\lesssim \left(\sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n \Lambda_k \right)^p \int_{\frac{1}{n+1}}^{\frac{1}{n}} \omega(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n \left(\sum_{k=0}^n \Lambda_k \right)^p \right)^{\frac{1}{p}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\Omega_n = \int_{\frac{1}{n+1}}^{\frac{1}{n}} \omega(x) dx.$$

Обозначим

$$\bar{\Omega}_n = \int_{\frac{1}{n+1}}^{\frac{1}{n}} \frac{\omega(x)}{x^p} dx.$$

Ясно, что

$$\bar{\Omega}_n \geq n^p \cdot \Omega_n.$$

Таким образом,

$$\|f\|_{L_{\omega}^p(0,1)} \leq C \left(\sum_{n=0}^{\infty} \bar{\Omega}_n \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Lambda_k \right)^p \right)^{1/p} \quad (5)$$

По лемме 2 неравенство:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \Lambda_k \right)^p \bar{\Omega}_n \leq \sum_{n=0}^{\infty} \Lambda_n^p \bar{\Omega}_n \quad (6)$$

верно тогда и только тогда, когда

$$\sum_{k=n}^{\infty} \frac{\bar{\Omega}_k}{k^p} \lesssim \frac{1}{n^p} \sum_{k=1}^n \bar{\Omega}_k \quad (7)$$

А неравенство (5) выполняется в силу условия теоремы $\omega \in RB_p$. Действительно, из условия $\omega \in RB_p$ мы имеем

$$\begin{aligned} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{\bar{\Omega}_k}{k^p} &= \sum_{k=n}^{\infty} \frac{1}{k^p} \int_{\frac{1}{k+1}}^{\frac{1}{k}} \frac{\omega(t)}{t^p} dt \lesssim 2^p \sum_{k=n}^{\infty} \int_{\frac{1}{k+1}}^{\frac{1}{k}} \omega(t) dt \\ &= 2^p \int_0^{\frac{1}{n}} \omega(t) dt \lesssim \frac{1}{n^p} \int_{\frac{1}{n+1}}^1 \frac{\omega(t)}{t^p} dt \lesssim \frac{1}{n^p} \sum_{k=1}^n \int_{\frac{1}{k+1}}^{\frac{1}{k}} \frac{\omega(t)}{t^p} dt = \frac{1}{n^p} \sum_{k=1}^n \bar{\Omega}_k \end{aligned}$$

Из (5)–(7) следует (3).

Докажем обратное утверждение, т.е. из (3) следует $\omega \in RB_p$. Для этого рассмотрим функцию $f_n(x) = \sum_{v=0}^{m_n-1} \psi_v(x)$, $n \in \mathbb{N}$.

Тогда по лемме 1 и по неравенству (3) имеем

$$\begin{aligned} m_n \left(\int_0^{1/m_n} \omega(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} &\lesssim \left(\int_0^1 |f_n(x)|^p \omega(x) dx \right)^{\frac{1}{p}} \\ &\leq \left(\sum_{v=0}^{\infty} \Lambda_v^p \left(\int_{1/m_{v+1}}^{1/m_v} \frac{\omega(x)}{x^p} dx \right) \right)^{1/p} \\ &\leq \left(\sum_{v=p}^n \left(\int_{1/m_{v+1}}^{1/m_v} \frac{\omega(x)}{x^p} dx \right)^p \right)^{1/p} = \left(\int_{1/m_{n+1}}^1 \frac{\omega(x)}{x^p} dx \right) \end{aligned}$$

Отсюда следует, что $\omega \in RB_p$. Теорема 1 доказана.

Замечание: теорема 1 является аналогом соответствующей теоремы, доказанной С. Тихоновым [5] для рядов по тригонометрической системе. При доказательстве теоремы 1 мы воспользовались специфическими свойствами мультипликативной системы.

Теорема 2. Пусть $1 < p \leq q < \infty$ и $\sup_n p_n = K < \infty$,

$\{\lambda_k\}$ – последовательность ограниченной вариации, $\lambda_n \rightarrow 0$ и пусть

$$\Lambda_n = \sum_{k=n}^{\infty} |\lambda_k - \lambda_{k+1}|, f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k \psi_k(x)$$

и пусть

$$\begin{aligned} I_1 &:= \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{v=1}^n u_v \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_{\frac{1}{n}}^1 \frac{\omega(x)}{x^q} dx \right)^{\frac{1}{q}} < \infty \\ I_2 &:= \sup_{n \in \mathbb{N}} V_n \left(\int_0^{\frac{1}{n}} \omega(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} < \infty, \end{aligned}$$

где

$$V_n = \left(\sum_{v=1}^{n-1} v^{p'} \alpha_v + \frac{n^{p'}}{U_n^{\frac{p'}{p}}} \right)^{\frac{1}{p}}, p > 1,$$

$$\alpha_v = \frac{1}{U_v^{\frac{p'}{p}}} - \frac{1}{U_{v+1}^{\frac{p'}{p}}}$$

и $U_v = \sum_{k=1}^v u_k, u_k \geq 0, u_1 > 0$.

Тогда имеет место оценка

$$\|f\|_{L^q_{\omega[0,1]}} \lesssim \left(\sum_{n=1}^{\infty} u_n \Lambda_n^p \right)^{\frac{1}{p}}.$$

Доказательство. В лемме 3, полагая $\gamma_m = \Omega_m, \theta_m = 1, x_n = \Lambda_n$, и $\beta_n = u_n$ и учитывая, что $\Lambda_n \downarrow$, имеем, что неравенство

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} \Omega_n \sum_{k=1}^n (\Lambda_k)^q \right)^{\frac{1}{q}} \lesssim \left(\sum_{n=1}^{\infty} u_n \Lambda_n^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

выполняется тогда и только тогда, когда $I_1 + I_2 < \infty$. Действительно, в этом случае, согласно лемме 3, имеем

$$\begin{aligned} K_1 &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{m=1}^n \theta_m^q \gamma_m \right)^{\frac{1}{q}} \cdot \left(\sum_{m=1}^n \beta_m \right)^{-\frac{1}{p}} \\ &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{m=1}^n \Omega_m \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{m=1}^n u_m \right)^{-\frac{1}{p}}. \\ &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\int_{\frac{1}{n}}^1 \frac{\omega(x)}{x^q} dx \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{m=1}^n u_m \right)^{-\frac{1}{p}} = l_1. \end{aligned}$$

Учитывая, что $1 - p' = \frac{-p'}{p'}$, мы имеем

$$\begin{aligned} K_2 &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{m=n}^{\infty} \gamma_m \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{m=1}^{n-1} \Theta_m \right) \left(B_m^{1-p'} - B_{m+1}^{1-p'} \right) + \Theta_n^{p'} B_n^{1-p'} \Bigg)^{\frac{1}{p}} = \\ &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{m=n}^{\infty} \Omega_m \right)^{\frac{1}{q}} \left(\sum_{m=1}^{n-1} m^{p'} \left(B_m^{1-p'} - B_{m+1}^{1-p'} \right) + n^{p'} B_n^{1-p'} \right)^{\frac{1}{p}} = \end{aligned}$$

1

$$\begin{aligned}
 &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\sum_{m=n}^{\infty} \Omega_m \right)^{\frac{1}{q}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} m^{p'} \left(\frac{1}{B_s^{\frac{p}{p'}}} - \frac{1}{B_{s+1}^{\frac{p}{p'}}} \right) + \frac{n^{p'}}{B_n^{\frac{p}{p'}}} \Bigg)^{\frac{1}{p'}} = \\
 &= \sup_{n \in \mathbb{N}} \left(\int_0^{\frac{1}{n}} \omega(x) dx \right)^{\frac{1}{q}} \cdot V_n = I_2
 \end{aligned}$$

Теорема 2 доказана.

Заключение

В данной работе получены оценки нормы суммы рядов по мультипликативным системам в весовом пространстве Лебега. При этом коэффициенты рассматриваемых рядов являются последовательностью ограниченной вариации. Были найдены условия на коэффициенты и на весовую функцию для принадлежности суммы рядов по мультипликативным системам весовому пространству Лебега.

Результаты применимы в задачах гармонического анализа и теории приближений.

Информация о финансировании

Исследование М. Тургумбаев, М. Мухамбетжан выполнено при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (проект № AP26196065). Авторы выражают благодарность Н.А. Бокаеву за поставленную задачу.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Голубов Б.И., Ефимов А.В., Скворцов В.А. Ряды Уолша и преобразования. Теория и приложения // Наука. – 1987. – 343 с.
- 2 Агаев Г.Н., Виленкин Н.Я., Джафарли Г.М., Рубинштейн А.И. Множества функций и гармонический анализ на нуль-измеримых группах. – Баку: ЭЛМ, 1981. – 180 с.
- 3 Shipp F., Wade W.R., and Simon P. Walsh Series: An Introduction to Dyadic Analysis. – Adam Hilger, Bristol, 1990.
- 4 Зигмунд А. Тригонометрические ряды. – Univ. Press, 1959.
- 5 Тихонов С.Ю. Весовые неравенства для рядов Фурье и ограниченность вариации // Труды Математического института имени В.А. Стеклова. – 2021. – С. 294–312. <https://doi.org/10.4213/tm4130>.
- 6 Bari N.K. Trigonometric Series. – Fizmatgiz, Moscow, 1961.
- 7 Dyachenko M., Mukanov A. and Tikhonov S. Hardy–Littlewood theorems for trigonometric series with general monotone coefficients // Stud. Math. – 2020. – Vol. 250. – No. 3. – P. 217–234. <https://doi.org/10.4064/sm180225-13-10>.
- 8 Andersen F. On the transformation of Fourier coefficients of certain classes of functions. II // Pac. J. Math. – 1983. – Vol. 105. – No. 1. – P. 1–10. <https://doi.org/10.2140/pjm.1983.105.1>.
- 9 Tikhonov S.Yu. On integrability of trigonometric series // Mathematical Notes. – 2005. – Vol. 78. – No. 3. – P. 437–442. <https://doi.org/10.4213/mzm2606>.
- 10 Ariño M. and Muckenhoupt B. Maximal functions on classical Lorentz spaces and Hardy’s inequality with weights for nonincreasing functions // Trans. Am. Math. Soc. – 1990. – Vol. 320. – No. 2. – P. 727–735. <https://doi.org/10.2307/2001699>.

11 Bennett G., Grosse-Erdmann K.-G. Weighted Hardy inequalities for decreasing sequences and functions // *Mathematische Annalen*. – 2006. – Vol. 344. – No. 3. – P. 489–531. <https://doi.org/10.1007/s00208-005-0678-7>.

12 Volosivets S.S., Fadeev R.N. Weighted integrability of double series with respect to multiplicative systems // *Journal of Mathematical Sciences* – 2015. – Vol. 209. – No. 1. – P. 51–65. <https://doi.org/10.1007/s10958-015-2484-4>.

13 Volosivets S. S. Absolute convergence of single and double Fourier series on multiplicative systems // *Izv. Saratov Univ. Math. Mech. Inform.* – 2009. – P. 7–14. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2009-9-3-7-14>.

14 Bokayev N.A., Mukanov Z.B. Weighted integrability of double trigonometric series and of double series with respect to multiplicative systems with coefficients of class $R_0^+ BV S^2$ // *Math Notes*. – 2012. – Vol. 91. – P. 575–578. <https://doi.org/10.1134/S0001434612030327>

15 Turgumbayev K., Suleimenova A., Mukhambetzhana M. On criteria for weighted integrability of series sums with monotonic coefficients with respect to multiplicative systems // *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*. – 2024. – Vol. 2. – No. 114. – P. 197–210. <https://doi.org/10.31489/2024m2/197-210>.

16 Volosivets S.S., Fadeev R.N. Weighted integrability of double series with respect to multiplicative systems. // *Fundam. Prikl. Mat.* – 2013. – P. 69–87. <https://doi.org/10.1007/s10958-015-2484-4>.

17 Goldman M.L., Estimates for the norm of integral and discrete operators of Hardy type on cones of quasimonotone functions. // *Dokl. Math.* – 2001. – Vol. 63. – No. 2. – P. 250–255.

18 Гольдман М.Л. Точные оценки норм операторов типа Харди на конусах квазимоноотонных функций // *Тр. МИАН*. – 2001. – Vol. 232. – P. 115–143.

19 Гогатишвили А., Степанов В.Д. Редукционные теоремы для весовых интегральных неравенств на конусе монотонных функций // *УМН*. – 2013. – Vol. 68. – No. 4. – P. 3–68. <https://doi.org/10.1070/RM2013v068n04ABEH004849>.

REFERENCES

1 Golubov, B.I., Efimov, A.V., Skvortsov, V.A., *Walsh Series and Transformations: Theory and Applications* (Moscow: Nauka, 1987), 343 p. [In Russian].

2 Agaev, G.N., Vilenkin, N.Ya., Dzhaferli, G.M., Rubinstein, A.I., *Function Sets and Harmonic Analysis on Zero-Dimensional Groups* (Baku: Elm, 1981), 180 p. [In Russian].

3 Schipp, F., Wade, W.R., Simon, P., *Walsh Series: An Introduction to Dyadic Harmonic Analysis* (Bristol: Adam Hilger Ltd., 1990).

4 Zygmund, A. *Trigonometric Series*. Univ. Press, 1959. [In Russian].

5 Tikhonov, S.Yu., Weighted inequalities for Fourier series and bounded variation // *Proc. Steklov Inst. Math.*, 312, 282–300 (2021). <https://doi.org/10.1134/S0081543821010193>. [In Russian].

6 Bari, N.K. *Trigonometric Series* (Fizmatgiz, Moscow, 1961).

7 Dyachenko, M., Mukanov, A., and Tikhonov, S. Hardy–Littlewood theorems for trigonometric series with general monotone coefficients // *Stud. Math.*, 250 (3), 217–234 (2020). <https://doi.org/10.4064/sm180225-13-10>.

8 Andersen, F. On the transformation of Fourier coefficients of certain classes of functions. II. *Pac. J. Math.*, 105 (1), 1–10 (1983). <https://doi.org/10.2140/pjm.1983.105.1>.

9 Tikhonov, S.Yu. On integrability of trigonometric series // *Mathematical Notes*, 78 (3), 437–442 (2005). <https://doi.org/10.4213/mzm2606>.

10 Ariño, M. and Muckenhoupt, B. Maximal functions on classical Lorentz spaces and Hardy's inequality with weights for nonincreasing functions. *Trans. Am. Math. Soc.*, 320 (2), 727–735 (1990). <https://doi.org/10.2307/2001699>.

11 Bennett, G., Grosse-Erdmann, K.-G. Weighted Hardy inequalities for decreasing sequences and functions. *Mathematische Annalen*, 344 (3), 489–531 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00208-005-0678-7>.

12 Volosivets, S.S., Fadeev, R.N. Weighted integrability of double series with respect to multiplicative systems. *Journal of Mathematical Sciences*, 209 (1), 51–65 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10958-015-2484-4>.

13 Volosivets, S. Absolute convergence of single and double Fourier series on multiplicative systems. *Izv. Saratov Univ. Math. Mech. Inform.*, 7–14 (2009). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2009-9-3-7-14>.

14 Bokayev, N.A., Mukanov, Z.B. Weighted integrability of double trigonometric series and of double series with respect to multiplicative systems with coefficients of class $R+0$ BV S2. *Math Notes*, 91, 575–578 (2012). <https://doi.org/10.1134/S0001434612030327>.

15 Turgumbayev, K., Suleimenova, A., Mukhambetzhana, M. On criteria for weighted integrability of series sums with monotonic coefficients with respect to multiplicative systems. *Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series*, 2 (114), 197–210 (2024). <https://doi.org/10.31489/2024m2/197-210>.

16 Volosivets, S.S., Fadeev R.N. Weighted integrability of double series with respect to multiplicative systems. *Fundam. Prikl. Mat.*, 69–87 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10958-015-2484-4>.

17 Goldman, M.L. Estimates for the norm of integral and discrete operators of Hardy type on cones of quasimonotone functions. *Dokl. Math.*, 63 (2), 250–255 (2001).

18 Goldman, M.L. Sharp Estimates of Norms of Hardy-Type Operators on Cones of Quasimonotone Functions. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 232, 115–143 (2001). [In Russian].

19 Gogatishvili, A., Stepanov, V.D. Reduction Theorems for Weighted Integral Inequalities on the Cone of Monotone Functions. *Russian Mathematical Surveys*, 68 (4), 3–68 (2013). <https://doi.org/10.1070/RM2013v068n04ABEH004849>. [In Russian].

¹**Тургумбаев М.Ж.,**

ф.-м.ғ.к., доцент, ORCID ID:0009-0007-1422-8160,

e-mail: mentur60@mail.ru

^{2*}**Мұхамбетжан М.А.,**

докторант, ORCID ID:0009-0002-3632-2303,

*e-mail: manshuk-9696@mail.ru

²**Сүлейменова З.Р.,**

ф.-м.ғ.к., доцент, ORCID ID:0009-0005-9114-7247,

e-mail: zr-s2012@yandex.ru

¹Е.А. Букетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті,
Қарағанды қ., Қазақстан

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Астана қ., Қазақстан

МУЛЬТИПЛИКАТИВТІК ЖҮЙЕЛЕР БОЙЫНША ҚАТАРЛАРДЫҢ ҚОСЫНДЫСЫНА АРНАЛҒАН САЛМАҚТЫ ТЕҢСІЗДІКТЕР

Аңдатпа

Бұл жұмыста Прайс мультипликативтік жүйелері бойынша шектелген вариациялы тізбектер класына жататын коэффициенттері бар қатарлар зерттеледі. Мұндай қатарлардың қосындысының нормасын өлшенген Лебег кеңістіктерінде бағалау шарттары алынады. Бұл шарттар салмақ функциясы мен сәйкес салмақ тізбегі арқылы тұжырымдалады. Зерттеу әдістемесі гармониялық талдау тәсілдеріне, Абель түрлендіруіне және Лебегтің өлшенген кеңістіктеріндегі Харди операторының шектеулілік критерийлеріне (Макенхаупт шарттарына) негізделеді. Сонымен қатар, дискретті үш-салмақты Харди теңсіздіктері қарастырылып, олардың зерттеліп отырған қатарларға қолданылуы талданады. Жұмыстың негізгі теоремалары коэффициенттердің вариациясы мен салмақтардың интегралдық сипаттамалары арасындағы байланысты анықтайды. Алынған нәтижелер белгілі аналитикалық әдістердің қолданылу аясын кеңейтіп, оларды функционалдық қатарлардың анағұрлым кең класына таратады. Бұл нәтижелер гармониялық талдау, қатарлар теориясы, сондай-ақ функционалдық кеңістіктердегі дифференциалдық теңдеулердің шешімдерін бағалау мәселелері үшін өзекті.

Тірек сөздер: мультипликативті жүйелер, Лебегтің өлшенген кеңістіктері, шектеулі вариация класының реттілігі, Харди операторы, интегралдылық шарттары.

¹**Turgumbaev M.Zh.,**

Cand.Phys.-Math.Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0009-0007-1422-8160,

e-mail: mentur60@mail.ru

^{2*}**Mukhambetzhah M.A.,**

PhD student, ORCID ID:0009-0002-3632-2303,

*e-mail:manshuk-9696@mail.ru

²**Suleimenova Z.R.,**

Cand.Phys.-Math.Sc., Associate Professor, ORCID ID:0009-0005-9114-7247

e-mail: zr-s2012@yandex.ru

¹Karaganda Buketov University,

Karaganda, Kazakhstan

²Eurasian National University,

Astana, Kazakhstan

WEIGHT INEQUALITIES FOR THE SUM OF SERIES WITH RESPECT TO THE MULTIPLICATIVE SYSTEMS

Abstract

This paper investigates series over Price multiplicative systems with coefficients belonging to the class of sequences of bounded variation. Conditions are obtained for estimating the norm of the sum of such series in weighted Lebesgue spaces. These conditions are formulated in terms of the weight function and the corresponding weight sequence. The methodology relies on techniques of harmonic analysis, the Abel transformation, and the Muckenhoupt criteria for the boundedness of the Hardy operator in weighted Lebesgue spaces. Additionally, discrete three-weight Hardy inequalities are considered, and their applicability to the analyzed series is examined. The main theorems establish a relationship between the variation of the coefficients and the integral characteristics of the weights. The results extend the applicability of known analytical methods to a wider class of functional series and are of interest in harmonic analysis, series theory, and the estimation of solutions to differential equations in functional spaces.

Keywords: multiplicative systems, weighted Lebesgue spaces, sequence from the class of bounded variation, Hardy operator, integrability conditions.

Дата поступления статьи в редакцию: 04.07.2025

УДК 616.1:004.056.5
МРНТИ 76.25.10

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-243-270>

^{1*}**Сулейменова М.У.**,
магистр, ORCID ID: 0009-0003-8553-5353,
*e-mail: madekin940@gmail.com

²**Манапова А.Қ.**,
магистр, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,
e-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

¹**Абзалиев К.Б.**,
д.мед.н., ORCID ID: 0000-0003-2452-854X,
e-mail: abzaliev_kuat@mail.ru

¹**Абзалиева С.А.**,
к.мед.н., ORCID ID: 0009-0004-9802-0129,
e-mail: abzalieva.symbat@gmail.com

³**Шоманов А.С.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-8253-7474,
e-mail: adai.shomanov@nu.edu.kz

⁴**Чен С.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-2690-3588,
e-mail: simingchen3@gmail.com

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Институт математики и математического моделирования, г. Алматы, Казахстан

³Назарбаев университет, г. Астана, Казахстан

⁴Фуданьский университет, г. Шанхай, Китай

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОГО СТАРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация

В данном исследовании представлен инновационный подход к прогнозированию риска сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) на основе комплексного анализа клинических, иммунологических и биохимических маркеров с использованием методов математического моделирования и машинного обучения. Исходные данные включают показатели гуморального и клеточного иммунитета (CD59, CD16, IL-10, CD14, CD19, CD8, CD4 и др.), цитокины и маркеры сердечно-сосудистых заболеваний, цитокины и маркеры воспаления (TNF, GM-CSF, CRP), факторы роста и ангиогенеза (VEGF, PGF), белки, участвующие в апоптозе и цитотоксичности (перфорин, CD95), а также показатели функции печени, почек, окислительного стресса и сердечной недостаточности (альбумин, цистатин С, N-концевой про-B-тип натрийуретического пептида (NT-proBNP), супероксиддисмутаза (SOD), С-реактивного белка (CRP), холинэстеразы (ChE), холестерина и скорости клубочковой фильтрации (GFR)). Также учитываются клинические и поведенческие факторы риска: артериальная гипертензия (АГ), перенесенный инфаркт миокарда (ПИМ), аортокоронарное шунтирование (АКШ) и/или стентирование, ишемическая болезнь сердца (ИБС), фибрилляция предсердий (ФП), атриовентрикулярная блокада (АВ-блокада), сахарный диабет (СД), а также образ жизни (курение, употребление алкоголя, уровень физической активности), образование, индекс массы тела (ИМТ). В исследование было включено 52 пациента в возрасте 65 лет и старше. На основе полученных клинических, биохимических и иммунологических данных с помощью методов математического моделирования и машинного обучения была разработана модель прогнозирования риска преждевременного сердечно-сосудистого старения. Целью исследования была разработка прогностической модели, позволяющей на ранней стадии выявлять предрасположенность к развитию ССЗ и их осложнений. Для решения задачи прогнозирования были использованы численные методы математического моделирования, в том числе методы Рунге–Кутты, Адамса–Башфорта и обратного направления Эйлера, что позволило с высокой точностью описать динамику изменений биомар-

керов и состояния пациентов во времени. Наибольшую ассоциацию с процессами старения продемонстрировали HLA-DR (50%), CD14 (41%) и CD16 (38%). ИМТ коррелировал с фактором роста плаценты (37%). Скорость клубочковой фильтрации положительно коррелировала с физической активностью (47%), тогда как активность SOD отрицательно коррелировала с ней (48%), что отражает снижение антиоксидантной защиты. Полученные результаты позволяют повысить точность прогнозирования сердечно-сосудистого риска и сформировать персонализированные рекомендации по профилактике и коррекции его развития.

Ключевые слова: биомаркеры, старение сердечно-сосудистой системы, машинное обучение, математическое моделирование, старение иммунной системы, прогнозирование.

Введение

Болезни системы кровообращения, несмотря на значительный прогресс в диагностике и терапии, занимают лидирующие позиции среди всех причин смертности и инвалидности во всем мире. По данным ВОЗ, на их долю приходится более 30% всех тестов смерти, что подчеркивает необходимость раннего выявления факторов риска и разработки высокоточных прогностических моделей [1].

Традиционные подходы к прогнозированию развития ССЗ, основанные на ограниченном числе биомаркеров, зачастую недостаточно чувствительны для индивидуальной оценки риска, особенно в популяциях с атипичным клиническим профилем [2]. В связи с этим возрастает интерес к интегративным методам анализа, позволяющим учитывать системный характер патогенеза ССЗ [3, 4]. Иммунные маркеры, такие как CD16, CD56, IL-10, TNF- α и цитотоксические белки (перфорин, CD95), играют ключевую роль в развитии хронического воспаления, эндотелиальной дисфункции и атерогенеза [5, 6]. Наряду с этим белки метаболического и сосудистого профиля – альбумин, NT-proBNP, VEGF, цистатин С – все чаще рассматриваются в качестве предикторов сердечно-сосудистых осложнений [7, 8]. Поведенческие и социальные факторы – курение, физическая активность, уровень образования – также оказывают существенное влияние на здоровье сердечно-сосудистой системы [9].

Разработка математических моделей, учитывающих многомерные взаимосвязи между этими переменными, представляет особую ценность для описания динамики биомаркеров и физиологических процессов. В настоящем исследовании используются такие методы, как метод Рунге–Кутты, метод Адамса–Башфорта и обратный метод Эйлера, которые позволяют более точно аппроксимировать изменения параметров во времени и учитывать индивидуальные особенности пациентов [10, 11].

Таким образом, целью настоящей работы является разработка и валидация математической модели прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний на основе комплексного анализа клинических, иммунологических и биохимических показателей с использованием численных методов и алгоритмов машинного обучения.

Биологический возраст (БВ) в настоящее время рассматривается как более точный индикатор процессов старения по сравнению с хронологическим возрастом [12]. Однако до сих пор не существует универсального подхода или набора показателей, позволяющих достоверно и воспроизводимо оценивать скорость биологического старения в различных популяциях.

Либерт и соавторы разработали модель, которая прогнозирует биологический возраст человека на основе физиологических показателей, таких как давление, сила и реакция, полученных из данных Британского биобанка. Несмотря на ограничения, связанные с поперечным характером данных и предположением о постоянной скорости старения, результаты были подтверждены на подгруппе участников с повторными измерениями [13]. Метод оказался надежным и может быть использован для оценки биологического возраста и выявления факторов, способных замедлить старение.

Математическое моделирование показало влияние поведенческих и клинических факторов на риск развития сердечно-сосудистых заболеваний у пожилых людей [14]. Использо-

ние методов Рунге–Кутты, Адамса–Башфорта и обратного Эйлера для описания динамики факторов риска позволило разработать модель, продемонстрировавшую высокую прогностическую точность [15]. Представленная модель может стать полезным инструментом для разработки персонализированных стратегий профилактики и лечения пожилых людей, а также для увеличения продолжительности активной жизни.

Актуальным направлением в изучении возрастных изменений иммунной системы является изучение феномена иммунного старения (иммуносенесценции). Уникальный возраст-ассоциированный иммунный профиль характерен для иммунотипов, которые лучше отражают индивидуальные особенности иммунной системы, чем хронологический возраст, и обладают высокой стабильностью в течение года [16]. Так, применение математической модели продемонстрировало высокую чувствительность аутоантител к тропонину I (сTnI), альфа-актину (ACTC1) и бета-миозину (MYH7B) на доклинических стадиях повреждения миокарда, в отличие от традиционных маркеров, информативных на стадии необратимых изменений кардиомиоцитов [17]. Эти кардиоспецифические иммуноглобулины представляют собой перспективные биомаркеры для раннего выявления кардиальных изменений. Внедрение их в клиническую практику требует стандартизации протоколов и проведения дальнейших исследований на больших выборках.

Метаболические нарушения также способствуют преждевременному старению. Согласно математической модели, основанной на биохимических параметрах, анализ мононуклеарных клеток крови 196 CCS пациентов, перенесших онкологические заболевания в детском возрасте, показал, что метаболический возраст клеток CCS превышает их реальный возраст [18]. Эти результаты указывают на возможные цели для фармакологического воздействия, направленного на восстановление функции митохондрий и предотвращение возрастных патологий.

Антиоксидантный фермент СОД катализирует превращение супероксидных радикалов в менее вредные молекулы, тем самым защищая клетки от окислительного повреждения и преждевременного старения. В исследовании Мао С. и соавторов было показано, что активность СОД может служить прогностическим биомаркером смертности у пожилых женщин [19]. Необходимы дальнейшие исследования для полного понимания того, как активность СОД коррелирует со старением, и определения ее потенциала в качестве надежного биомаркера старения и возрастных заболеваний.

Другой биомаркер, традиционно используемый для оценки функции почек, низкомолекулярный белок цистатин С, обладает интересным потенциалом в качестве предиктора старения. Например, у людей с высоким уровнем цистатина С риск развития когнитивных или физических нарушений был на 39% выше, чем у людей с нормальным или низким его уровнем. Более высокие уровни цистатина С, даже при относительно нормальной функции почек, связаны с ранним старением [20]. Была обнаружена положительная и нелинейная связь между соотношением альбумина и глобулина и когнитивной функцией у пожилых американцев. Поддержание соотношения альбумина и глобулина в пределах нормы может быть одной из терапевтических стратегий, направленных на ограничение прогрессирования когнитивных нарушений у пожилых людей [21]. Недавние исследования также показали потенциал NT-proBNP, который традиционно используется для диагностики и оценки тяжести сердечной недостаточности. Представленные данные позволяют предположить, что он может быть использован в прогностических целях или в качестве суррогатной конечной точки в эпидемиологических и интервенционных исследованиях в качестве наиболее точного маркера биологического возраста. Однако следует учитывать, что на его уровень влияют как старение, так и состояние сердечно-сосудистой системы [22]. Таким образом, несмотря на многообещающие данные о прогностической значимости вышеперечисленных биомаркеров как потенциальных предикторов старения, необходимы дополнительные исследования для определения их достоверности.

Мохаamed З. Сайед-Ахмед в своей статье рассматривает интеграцию методов математического моделирования и глубокого обучения (CNN, RNN) для повышения точности прогнозирования сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) [23]. Предлагается многоэтапный подход: сначала используются дифференциальные модели, затем применяется глубокое обучение для извлечения признаков из больших наборов данных. Результаты показывают, что комбинированный подход значительно превосходит традиционные методы машинного обучения, особенно благодаря учету временной динамики и способности обнаруживать скрытые закономерности в физиологических данных. Аналогичный подход был использован для разработки высокоточного искусственного интеллекта (ИИ) для прогнозирования сердечно-сосудистого старения у людей старше 60 лет. Модель, построенная с использованием алгоритма XGBoost, оказалась наиболее эффективной, продемонстрировав точность 91% и значение AUC 0,8333, превосходя классические статистические методы, такие как логистическая регрессия и алгоритм k-ближайших соседей (k-NN). Модель позволяет оценить риски преждевременного старения с учетом ключевых иммунных маркеров, а также клинических и поведенческих показателей [24]. Abhishek и др., используя методы интеллектуального анализа данных и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования риска ССЗ на основе медицинских записей, выявили значимые закономерности. Особое внимание уделяется сравнению различных методов вменения пропущенных данных и построению моделей с использованием алгоритма CatBoost. Разработанная модель достигла точности 91% на венгерском наборе данных [25]. Полученные результаты подтверждают потенциал машинного обучения для повышения точности диагностики и прогностических подходов.

Таким образом, разработка математических моделей, учитывающих многомерные взаимосвязи между различными переменными, открывает новые возможности в прогнозировании риска ССЗ. Ценность представляют численные методы, используемые для описания динамики биомаркеров и физиологических процессов.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 52 человека в возрасте 60 лет и старше, которые находились под наблюдением в поликлиниках и медицинских центрах г. Алматы. По половому составу выборка включала 18 мужчин (35%) и 34 женщины (65%). Средний возраст мужчин составлял $82,9 \pm 10,0$ лет, а женщин – $81,5 \pm 10,0$ лет. Участники были разделены на две группы в зависимости от наличия сердечно-сосудистых заболеваний. В первую группу вошли 30 человек с подтвержденным анамнезом ССЗ, во вторую – 22 человека без сердечно-сосудистых заболеваний. Критерии исключения: ВИЧ-инфекция, известный туберкулез, острые инфекционные заболевания в течение 3 месяцев до включения в исследование, психические заболевания, ограничивающие адекватное сотрудничество, диагностированная аллергическая реакция любого типа, отказ от участия в исследовании. Все участники были надлежащим образом проинформированы о целях, методах и условиях исследования, после чего дали добровольное и осознанное согласие на участие.

Для анализа иммунологических параметров у пациентов было взято 50 мкл венозной крови, которая в течение 2 часов была доставлена в Научный центр акушерства, гинекологии и перинатологии. Образцы окрашивали моноклональными антителами (mAb), произведенными компанией Becton Dickinson (BD), направленными против CD4, CD8, CD16, CD56, CD14, CD19, CD95, HLA-DR⁺ для обнаружения рецепторов на поверхности клеток. В пробирку добавляли 5 мкл антител, перемешивали на вихревом смесителе и инкубировали в течение 15 минут при комнатной температуре в темноте. После инкубации проводили лизис с использованием буфера BD FACS Lyse Lysing Buffer, снова инкубировали в течение 10 минут при комнатной температуре. Образцы центрифугировали в течение 5 минут при 300g и удаляли супернатант. Затем проводили пермеабиллизацию мембран с помощью раствора Cytotfix/

Cytoperm и окрашивание внутриклеточных рецепторов с помощью антител против TNF, GM-CSF, VEGFR-2, IPGF и Per-forin. Исследование иммунного статуса проводили на проточном цитофлуориметре BD FACS CALIBUR (США) с использованием программного обеспечения CELL Quest.

Для биохимического анализа у пациентов ввели венозную кровь в объеме 3–5 мл в вакуумные пробирки без антикоагулянта и в течение 2 часов доставляли в лабораторию клинической диагностики. Биохимические показатели определяли с помощью автоматического биохимического анализатора в соответствии с инструкциями производителя. В качестве реагентов использовались коммерческие наборы, в том числе для определения уровня альбумина, С-реактивного белка (СРБ), пронатриуретического пептида (NT-pro-BNP), сывороточной холинэстеразы, цистатина С, супероксиддисмутазы. Полученные данные регистрировались в электронной лабораторной системе и использовались для дальнейшего статистического анализа.

На основе полученных клинических и лабораторных данных была разработана математическая модель для прогнозирования преждевременного сердечно-сосудистого старения. Она была основана на численных методах решения дифференциальных уравнений: методе Рунге–Кутты, методе Адамса–Башфорта и обратном методе Эйлера. Для выявления взаимосвязей между переменными был использован корреляционный анализ Пирсона. Модель описывает динамическое взаимодействие иммунологических, биохимических и поведенческих факторов риска во времени. Методы машинного обучения были применены не только для построения прогностических моделей, но и для визуализации взаимосвязей между клиническими, иммунологическими и поведенческими параметрами.

Для учета социально-поведенческих факторов все параметры были формализованы и приведены к числовому виду. Индекс массы тела (ИМТ) оценивался по стандартной классификации ВОЗ: недостаточный вес ($<18,5$ кг/м²), норма (18,5–24,9), избыточный вес (25–29,9), ожирение (≥ 30). Физическая активность кодировалась как низкая (0–2 раза в неделю), умеренная (3–4 раза) и высокая (≥ 5 раз в неделю). Образование рассматривалось как категориальная переменная: среднее (1), высшее (2), послеузовское (3). Поведенческие факторы (курение, употребление алкоголя) вводились в модель как бинарные переменные (0 – отсутствие, 1 – наличие). Клинические состояния (артериальная гипертензия, сахарный диабет, фибрилляция предсердий, перенесенный инфаркт, аортокоронарное шунтирование и др.) также были закодированы бинарно (0 – отсутствие, 1 – наличие). Для математического моделирования все показатели нормировались в диапазоне [0;1], что позволило объединить их с иммунологическими и биохимическими параметрами и рассчитать коэффициенты корреляции Пирсона.

Взвешивание факторов было основано на сочетании статистического анализа и методов машинного обучения. Коэффициенты корреляции Пирсона использовались для оценки силы связи между отдельными факторами и сердечно-сосудистым старением. Кроме того, численное моделирование с использованием методов Рунге–Кутты, Адамса–Башфорта и обратного метода Эйлера позволило смоделировать динамическое взаимодействие между факторами риска во времени.

В результате выбранные биомаркеры отражали основные механизмы, лежащие в основе сердечно-сосудистого старения, и их вклад в модель был определен с помощью основанного на доказательствах и всестороннего аналитического подхода. Это обеспечило как высокую точность прогнозирования, так и возможность разработки персонализированных профилактических стратегий.

Была разработана платформа машинного обучения (ML) для прогнозирования скорости старения и риска сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), включающая такие алгоритмы, как случайный лес, логистическая регрессия, k-ближайших соседей и XGBoost [24].

В таблицах 1–3 представлены определения иммунологических, биохимических биомаркеров и социально-поведенческих факторов.

Таблица 1 – Иммунологические биомаркеры

Параметр	Определение
CD59 (Protectin)	Белок, который прикрепляется к мембране клеток и защищает их от повреждения иммунной системой, предотвращая активацию комплемента.
CD16 (FC γ RIII)	Рецептор на поверхности некоторых иммунных клеток, таких как нейтрофилы, естественные клетки-киллеры (NK-клетки) и макрофаги.
Interleukin 10 (IL-10)	Противовоспалительный цитокин, который подавляет воспалительную реакцию и регулирует активность иммунной системы, предотвращая чрезмерное воспаление.
CD14	Рецептор, который находится на поверхности моноцитов и макрофагов.
Placenta Growth Factor (PGF)	Плацентарный фактор роста, связанный с развитием сосудов.
CD19	Маркер, обнаруженный на В-лимфоцитах.
Tumor Necrosis Factor (TNF)	Цитокин, играющий важную роль в воспалении.
Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF)	Фактор роста, стимулирующий образование новых кровеносных сосудов (ангиогенез).
CD56	Маркер, обнаруженный на поверхности естественных клеток-киллеров (NK).
Perforin	Белок, который секретируется цитотоксическими Т-лимфоцитами и NK-клетками для уничтожения инфицированных клеток.
Granulocyte-Macrophage Colony-Stimulating Factor (GM-CSF)	Цитокин, стимулирующий образование и дифференцировку гранулоцитов и макрофагов.
CD8	Маркер, присутствующий на цитотоксических Т-лимфоцитах, которые играют важную роль в уничтожении инфицированных вирусом и опухолевых клеток.
HLA-DR	Молекула главного комплекса гистосовместимости II класса (МНС II), обнаруженная на антигенпрезентирующих клетках.
CD95 (Fas)	Рецептор, участвующий в процессе апоптоза.
CD4	Маркер, обнаруженный на поверхности Т-хелперных клеток, координирующих иммунный ответ.

Таблица 2 – Биохимические биомаркеры

Параметр	Определение
Albumin (ALB)	Белок, синтезируемый в печени. Уровень альбумина в крови снижается с возрастом. Снижение уровня альбумина является независимым фактором риска развития сердечно-сосудистых заболеваний. Гипоальбуминемия является предвестником повышенного риска инфаркта миокарда и инсульта.
C-reactive protein (CRP)	Уровень СРБ в крови может быть показателем хронического воспаления.
ХЭ (ChE)	Фермент, участвующий в метаболизме холина.
NT-proBNP	Натрийуретический пептид, связанный с нагрузкой на сердце.
Cystatin C (CTT)	Высокие уровни цистатина С связаны с повышенным риском смертности от всех причин и сердечно-сосудистых заболеваний у пожилых людей.
Glomerular filtration rate (GFR)	Показатель функции почек, рассчитываемый на основе креатинина, цистатина С и других маркеров.
Superoxide dismutase (SOD)	Фермент, защищающий клетки от окислительного стресса. Дефицит митохондриальной СОД может привести к ускоренному старению клеток и нарушению их функций.

Таблица 3 – Клинические и социальные биомаркеры

Параметр	Определение
Smoking (S)	Один из основных факторов риска сердечно-сосудистых заболеваний.
Alcohol (A)	Один из основных факторов риска сердечно-сосудистых заболеваний.
Acute cerebral circulation disorder (ACVD)	Частота инсультов.
Physical activity (PhA)	Важный фактор профилактики сердечно-сосудистых заболеваний.
Education (E)	Социальный фактор, влияющий на здоровье через образ жизни.
AB-block (AB)	Нарушение проведения электрических импульсов между предсердиями и желудочками сердца через атриовентрикулярный (AB) узел.
Atrial fibrillation (AF)	Нарушение сердечного ритма.
Coronary heart disease (CHD)	Хроническое заболевание, связанное с недостаточным кровоснабжением сердца.
Body mass index (BMI)	Указывает весовую категорию (недостаточный вес, нормальный вес, избыточный вес, ожирение).
Postinfarction cardiosclerosis (PICS)	Хроническое состояние после инфаркта миокарда.
Stent (CABG/stent)	Показатели хирургических вмешательств по восстановлению кровоснабжения сердца.
Diabetes mellitus (DM)	Хроническое метаболическое заболевание, затрагивающее метаболизм глюкозы.
Chronic Heart Failure (CHF)	Это состояние, при котором сердце не способно перекачивать достаточное количество крови для удовлетворения потребностей организма.
Cerebrovascular diseases (CVD)	Группа заболеваний, поражающих сердце и кровеносные сосуды.
Arterial hypertension (AH)	Артериальная гипертензия.

Мы рассматриваем два набора экспериментальных данных, иммунологические (задача 1) и биохимические (задача 2) биомаркеры, для прогнозирования сердечно-сосудистого старения с помощью математической модели. Каждый набор представлен тремя тестами: биомаркеры пациентов без учета ССЗ (все пациенты) (тест I), биомаркеры пациентов с диагнозом ССЗ (тест II) и биомаркеры пациентов без диагноза ССЗ (тест III).

Коэффициенты корреляции Пирсона используются для расчета коэффициентов корреляции взаимодействия между биомаркерами (иммунологическими (задача 1) и биохимическими (задача 2)) и клиническими параметрами.

Создается математическая модель с учетом уровня взаимодействия между медицинскими биомаркерами (задача 1 и задача 2) и клиническими параметрами:

$$A' = \sum_{i=1}^6 a_i x_i y_i, \quad (1)$$

где A' – производная, отвечающая за изменения в процессе старения с течением времени t , $i = \overline{1 \dots 6}$, коэффициент a_i – коэффициент корреляции Пирсона, x_i – иммунологический биомаркер, y_i – социальный параметр.

На рисунке 1 представлены результаты коэффициента корреляции по иммунологическим биомаркерам для всех экспериментальных пациентов. Высокий уровень взаимодействия между параметрами индекса массы тела (далее ИМТ) и молекулой главного комплекса гистосов-

местимости класса II (далее HLA-DR) с коэффициентом взаимодействия a_1 , постинфарктным кардиосклерозом (далее PICS) и рецептором, обнаруженным на поверхности моноцитов и макрофагов (далее CD14) с коэффициентом взаимодействия b_1 , ИМТ и плацентарным фактором роста, связанным с развитием сосудов (IPGF) с коэффициентом взаимодействия c_1 , образованием (далее E) и белком, который прикрепляется к мембране клеток и защищает их от повреждения иммунной системой, предотвращая активацию комплемента (далее CD59) с коэффициентом взаимодействия d_1 , ИМТ и CD14 с коэффициентом взаимодействия e_1 , ишемической болезнью сердца (далее ИБС) и CD14 с коэффициентом взаимодействия f_1 .

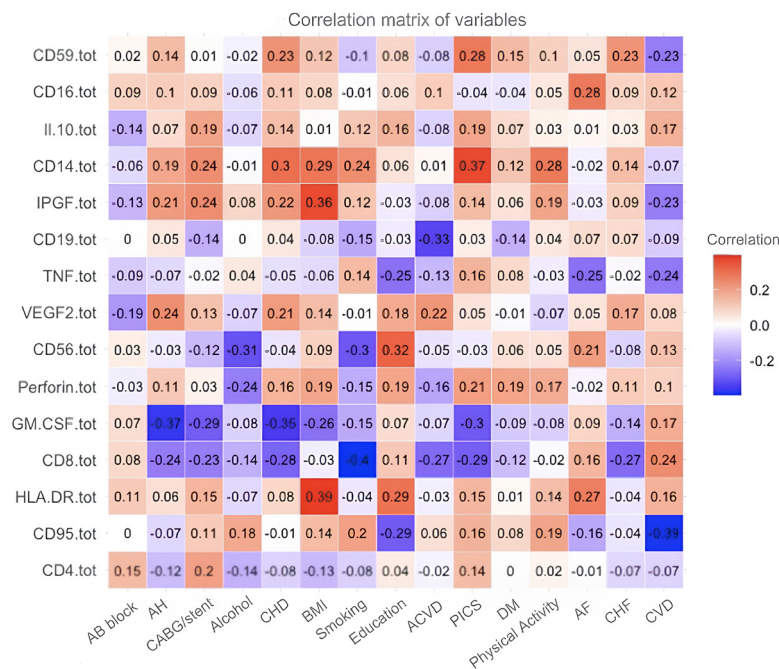


Рисунок 1 – Коэффициент корреляции иммунологических биомаркеров
всех экспериментальных пациентов (тест I задачи 1)

Из рисунка 1 выбраны высокие коэффициенты корреляции, которые представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Высокие коэффициенты корреляции для всех пациентов в соответствии с иммунологическими биомаркерами (тест I из задачи 1)

Тест	Коэффициент	Значение
Тест I задачи 1	a_1	0.39
	a_2	0.37
	a_3	0.36
	a_4	0.32
	a_5	0.29
	a_6	0.3

Для уравнения (1) медицинские биомаркеры и социально-поведенческие факторы были получены в результате корреляционного анализа и представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры математической модели преждевременного старения всех пациентов в соответствии с иммунологическими биомаркерами (тест I задачи 1).

Тест	Вид параметра	Переменная	Определение
Тест I задачи 1	Социальные	x_1	<i>BMI</i>
		x_2	<i>PICS</i>
		x_3	<i>BMI</i>
		x_4	<i>E</i>
		x_5	<i>BMI</i>
		x_6	<i>CHD</i>
	Иммунологические	y_1	<i>HLA.DR</i>
		y_2	<i>CD14</i>
		y_3	<i>IPGF</i>
		y_4	<i>CD59</i>
		y_5	<i>CD14</i>
		y_6	<i>CD14</i>

Определения представленных в таблице 5 параметров объясняются в таблицах 1 и 3.

Затем преобразуем уравнение (1) в форму (2) и построим математическую модель преждевременного старения с учетом таблицы 5 в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{dA}{dt} = a_1 \cdot BMI \cdot HLA.DR + b_1 \cdot PICS \cdot CD14 + c_1 \cdot BMI \cdot IPGF + d_1 \cdot E \cdot CD59 + e_1 \cdot BMI \cdot CD14 + f_1 \cdot CHD \cdot CD14, \quad (2)$$

где в правой части (2) $\frac{dA}{dt}$ означает изменения преждевременного старения во времени, где $\frac{d}{dt}$ – дифференциальный оператор, *A* – старение, *t* – время. А в левой части (1) каждый слагаемый представляет взаимодействие социальных и иммунологических параметров с уровнем взаимодействия, который имеет значение коэффициента корреляции, а сумма слагаемых означает, что на преждевременное старение влияют взаимодействия не только двух параметров. Из (1) можно сделать вывод, что изменения в молекуле главного комплекса гистосовместимости класса II, плацентарном факторе роста, связанном с развитием сосудов, и рецепторе, обнаруженном на поверхности моноцитов и макрофагов, вызывают аномалии в индексе массы тела, а также что рецептор, обнаруженный на поверхности моноцитов и макрофагов, влияет на возникновение постинфарктного кардиосклероза и ишемической болезни сердца. Кроме того, можно обратить внимание на очень интересный фактор: существует 32% вероятность

того, что образование пациента взаимодействует с белком, который прикрепляется к мембране клеток и защищает их от повреждения иммунной системой, предотвращая активацию комплемента. Это можно объяснить тем, что продукт гена человека оказывает прямое влияние на уровень образования человека.

Далее, в этом порядке мы представляем корреляционный анализ остальных исследованных тестов на рисунках 2–6 и в таблицах 6, 8, 10, 12, 14 с высокими коэффициентами взаимодействия между медицинскими биомаркерами и социально-поведенческими факторами, а также их определения (таблицы 7, 9, 11, 13, 15).

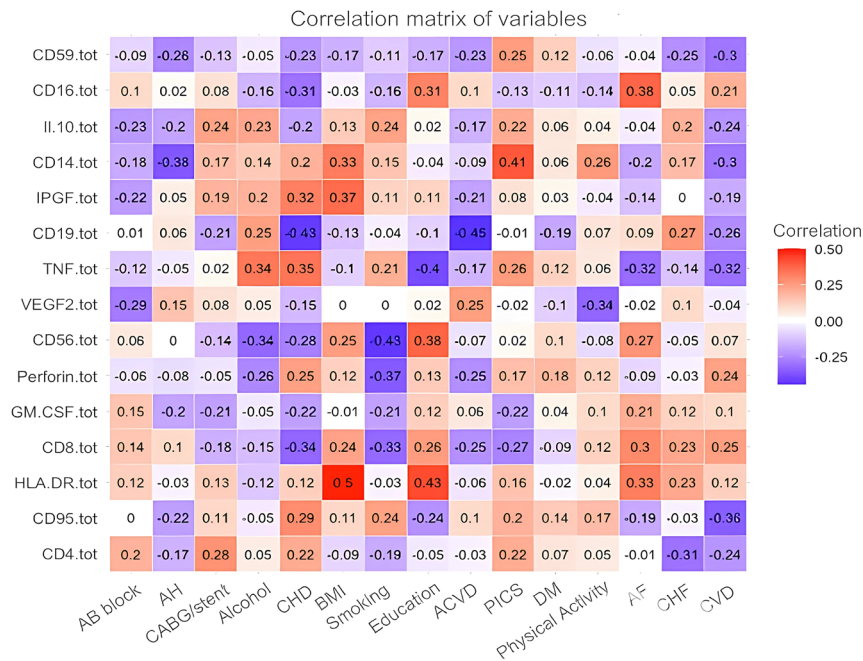


Рисунок 2 – Коэффициент корреляции иммунологических биомаркеров пациентов с СВД (вариант II задачи 1)

Таблица 6 – Высокие коэффициенты корреляции для пациентов с ССЗ в соответствии с иммунологическими биомаркерами (тест II задачи 1)

Тест	Коэффициент	Значение
Тест II задачи 1	a_1	0.5
	a_2	0.43
	a_3	0.41
	a_4	0.38
	a_5	0.38
	a_6	0.37

Таблица 7 – Параметры математической модели преждевременного старения пациентов с ССЗ по иммунологическим биомаркерам (вариант II задачи 1)

Тест	Вид параметра	Переменная	Определение
Тест II задачи 1	Социальные	x_1	<i>BMI</i>
		x_2	<i>E</i>
		x_3	<i>PICS</i>
		x_4	<i>E</i>
		x_5	<i>AH</i>
		x_6	<i>CHD</i>
	Иммунологические	y_1	<i>HLA.DR</i>
		y_2	<i>HLA.DR</i>
		y_3	<i>CD14</i>
		y_4	<i>CD56</i>
		y_5	<i>CD16</i>
		y_6	<i>IPGF</i>

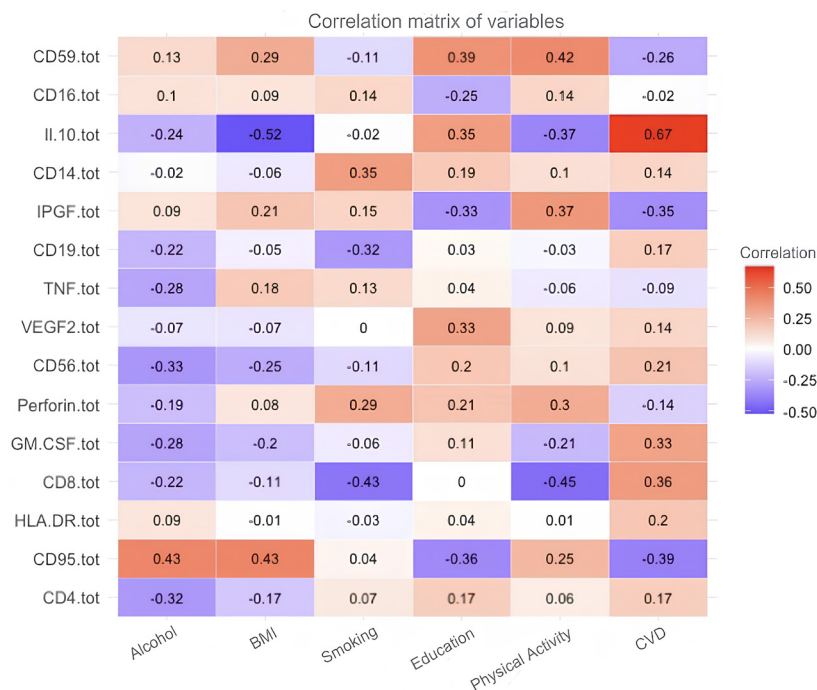


Рисунок 3 – Коэффициент корреляции иммунологических биомаркеров пациентов без ССЗ (тест III задачи 1)

Таблица 8 – Высокие коэффициенты корреляции для пациентов без ССЗ в соответствии с иммунологическими биомаркерами (тест III из задачи 1)

Тест	Коэффициент	Значение
Тест III задачи 1	a_1	0.67
	a_2	0.43
	a_3	0.43
	a_4	0.42
	a_5	0.39
	a_6	0.37

Таблица 9 – Параметры математической модели преждевременного старения пациентов без ССЗ по иммунологическим биомаркерам (тест III задачи 1)

Тест	Вид параметра	Переменная	Определение
Тест III задачи 1	Социальные	x_1	<i>CVD</i>
		x_2	<i>A</i>
		x_3	<i>BMI</i>
		x_4	<i>PhA</i>
		x_5	<i>E</i>
		x_6	<i>PhA</i>
	Иммунологические	y_1	<i>II10</i>
		y_2	<i>CD95</i>
		y_3	<i>ICD95</i>
		y_4	<i>CD59</i>
		y_5	<i>CD59</i>
		y_6	<i>IPGF</i>

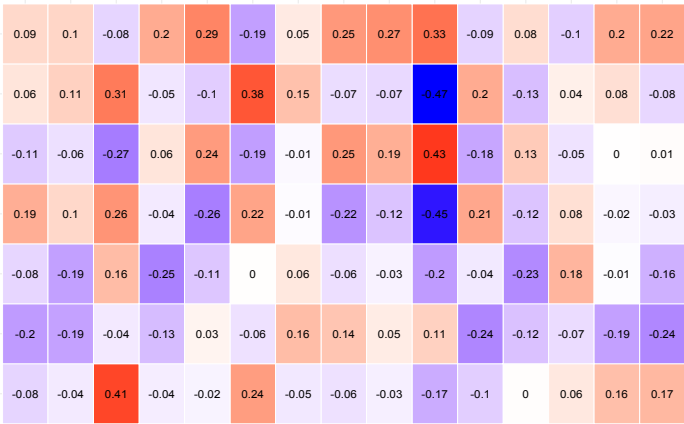


Рисунок 4 – Коэффициент корреляции биохимических биомаркеров всех исследуемых пациентов (тест I из задачи 2)

Таблица 10 – Высокие коэффициенты корреляции для всех пациентов в соответствии с биохимическими биомаркерами (тест I из задачи 2)

Тест	Коэффициент	Значение
Тест I задачи 2	a_1	0.43
	a_2	0.41
	a_3	0.38
	a_4	0.33
	a_5	0.29
	a_6	0.31

Таблица 11 – Параметры математической модели преждевременного старения всех пациентов в соответствии с биохимическими биомаркерами (тест I задачи 2).

Тест	Вид параметра	Переменная	Определение
Тест I задачи 2	Социальные	x_1	<i>CVD</i>
		x_2	<i>ACVD</i>
		x_3	<i>BMI</i>
		x_4	<i>CVD</i>
		x_5	<i>AH</i>
		x_6	<i>ACVD</i>
	Биохимические	y_1	<i>CTT</i>
		y_2	<i>ALB</i>
		y_3	<i>GFR</i>
		y_4	<i>SOD</i>
		y_5	<i>SOD</i>
		y_6	<i>GFR</i>

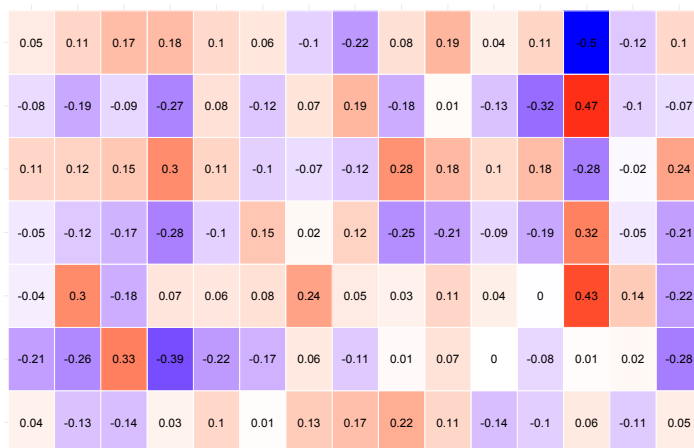


Рисунок 5 – Коэффициент корреляции биохимических биомаркеров пациентов с ССЗ (тест II задачи 2)

Таблица 12 – Высокие коэффициенты корреляции для пациентов с ССЗ в соответствии с биохимическими биомаркерами (тест II задачи 2)

Тест	Коэффициент	Значение
Тест II задачи 2	a_1	0.47
	a_2	0.43
	a_3	0.33
	a_4	0.3
	a_5	0.24
	a_6	0.24

Таблица 13 – Параметры математической модели преждевременного старения пациентов с ССЗ по биохимическим биомаркерам (тест II задачи 2)

Тест	Вид параметра	Переменная	Определение
Тест II задачи 2	Социальные	x_1	<i>PhA</i>
		x_2	<i>PhA</i>
		x_3	<i>ACVD</i>
		x_4	<i>AB</i>
		x_5	<i>S</i>
		x_6	<i>stent</i>
	Биохимические	y_1	<i>GFR</i>
		y_2	<i>ChE</i>
		y_3	<i>CRP</i>
		y_4	ChE
		y_5	<i>CTT</i>
		y_6	<i>ChE</i>

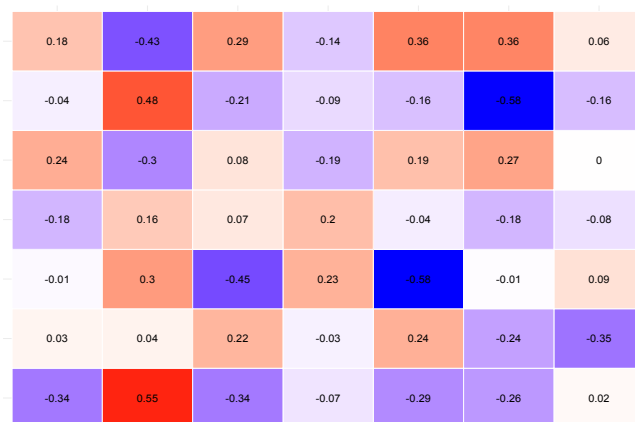


Рисунок 6 – Коэффициент корреляции биохимических биомаркеров пациентов без ССЗ (тест III задачи 2)

Таблица 14 – Высокие коэффициенты корреляции для пациентов без ССЗ в соответствии с биохимическими биомаркерами (тест III из задачи 2)

Тест	Коэффициент	Значение
Тест III задачи 2	a_1	0.55
	a_2	0.48
	a_3	0.36
	a_4	0.36
	a_5	0.29
	a_6	0.24

Таблица 15 – Параметры математической модели преждевременного старения пациентов без ССЗ по биохимическим биомаркерам (тест III задачи 2)

Тест	Вид параметра	Переменная	Определение
Тест III задачи 2	Социальные	x_1	BMI
		x_2	BMI
		x_3	E
		x_4	PhA
		x_5	CVD
		x_6	A
	Биохимические	y_1	ALB
		y_2	GFR
		y_3	SOD
		y_4	SOD
		y_5	SOD
		y_6	CTT

Теперь мы численно решаем уравнение (2) методами Рунге–Кутта 4-го порядка, Адамса–Башфорта, обратного Эйлера. Сначала рассмотрим применение первого метода к математической модели (2).

Искомая переменная представлена в виде:

$$A_{n+1} = A_n + \frac{h}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad (3)$$

где $h = \frac{b-a}{N}$ – вычислительный шаг, а k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты метода будут иметь следующий вид:

$$k_1 = a_1 \cdot BMI(x_n, t_n) \cdot HLA.DR(x_n, t_n) + b_1 \cdot PICS(x_n, t_n) \cdot CD14(x_n, t_n) + c_1 \cdot BMI(x_n, t_n) \cdot IPGF(x_n, t_n) + d_1 \cdot E \cdot CD59(x_n, t_n) + e_1 \cdot BMI(x_n, t_n) \cdot CD14(x_n, t_n) + f_1 \cdot CHD(x_n, t_n) \cdot CD14(x_n, t_n)$$

$$k_2 = a_1 \cdot BMI\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot HLA.DR\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) + b_1 \cdot PICS\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot CD14\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) + c_1 \cdot BMI\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot IPGF\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) + d_1 \cdot E\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot CD59\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) + e_1 \cdot BMI\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot CD14\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) + f_1 \cdot CHD\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right) \cdot CD14\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_1\right)$$

$$k_3 = a_1 \cdot BMI\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot HLA.DR\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) + b_1 \cdot PICS\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot CD14\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) + c_1 \cdot BMI\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot IPGF\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) + d_1 \cdot E\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot CD59\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) + e_1 \cdot BMI\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot CD14\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) + f_1 \cdot CHD\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right) \cdot CD14\left(t_n + \frac{h}{2}, x_n + \frac{h}{2}k_2\right)$$

$$k_4 = a_1 \cdot BMI(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot HLA.DR(t_n + h, x_n + hk_3) + b_1 \cdot PICS(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot CD14(t_n + h, x_n + hk_3) + c_1 \cdot BMI(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot IPGF(t_n + h, x_n + hk_3) + d_1 \cdot E(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot CD59(t_n + h, x_n + hk_3) + e_1 \cdot BMI(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot CD14(t_n + h, x_n + hk_3) + f_1 \cdot CHD(t_n + h, x_n + hk_3) \cdot CD14(t_n + h, x_n + hk_3)$$

Для сравнения численных результатов мы рассмотрели применение следующего метода Адамса–Башфорта второго порядка:

$$A_{i+1} = A_i + \frac{3}{2} \cdot \Delta t \cdot RHS_i - \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot RHS_{i-1}, \quad (4)$$

где A_i – текущее значение старения, RHS_i – правая часть уравнения (2), RHS_{i-1} – правая часть уравнения (2) в предыдущей точке, а Δt – временной шаг.

Был использован третий метод обратного Эйлера, который позволяет упростить время вычислений и является менее затратным методом:

$$A_{i+1} = A_i + \Delta t \cdot RHS_{i+1}, \quad (5)$$

где Δt – шаг по времени, а RHS_{i+1} – правая часть уравнения (2) в новой точке.

Для проверки численных методов необходимо было получить аналитические (точные) решения уравнения (2). Чтобы избежать дифференциала, проинтегрируем уравнение (2) по времени с обеих сторон:

$$A = t \cdot a_1 \cdot BMI_i \cdot HLA.DR_i + t \cdot b_1 \cdot PICS_i \cdot CD14_i + t \cdot c_1 \cdot BMI_i \cdot IPGF_i + t \cdot d_1 \cdot E_i \cdot CD59_i + t \cdot e_1 \cdot BMI_i \cdot CD14_i + t \cdot f_1 \cdot CHD_i \cdot CD14_i. \quad (6)$$

Полученное уравнение (6) является точным (аналитическим) решением уравнения (2). Запишем уравнение (6) в конечно-разностной форме для численной реализации:

$$x^{n+1} = \Delta t \cdot n \cdot (a_1 \cdot BMI_i \cdot HLA.DR_i + b_1 \cdot PICS_i \cdot CD14_i + c_1 \cdot BMI_i \cdot IPGF_i + d_1 \cdot E_i \cdot CD59_i + e_1 \cdot BMI_i \cdot CD14_i + f_1 \cdot CHD_i \cdot CD14_i). \quad (7)$$

Все эти методы были использованы для уравнений (2) и (3) таким же образом, как и для уравнения (4).

Мы выбрали временной шаг в интервале $0 < \Delta t < 1$, при этом $\Delta t = 0.01$. Шаг сетки составил $\Delta x = \frac{1-0}{100} = 0.01$.

С учетом вышеизложенного численные результаты могут быть описаны, а анализ в реальном времени может быть проведен с $N \cdot \Delta t = t$, где $N = 100$ – количество итераций в программном коде.

Созданные математические модели на основе уравнений (2)–(4) можно рассматривать в качестве экспериментов для будущих подобных исследований.

Параметры $Px(x, t)$, $A(x, t)$, $I(x, t)$, $AH(x, t)$, $S(x, t)$, $X(x, t)$, $G(x, t)$, $ch(x, t)$ и $E(x, t)$, используемые для расчета коэффициента корреляции, были взяты из статистической базы данных. Начальные условия были следующими:

$$Px(x, 0) = 0, A(x, 0) = 0, I(x, 0) = 0, AH(x, 0) = 0, S(x, 0) = 0, X(x, 0) = 0, G(x, 0) = 0, ch(x, 0) = 0, E(x, 0) = 0.$$

Первые граничные условия были следующими:

$$Px(0, t) = 1, A(0, t) = 1, I(0, t) = 1, AH(0, t) = 1, S(0, t) = 1, X(0, t) = 1, G(0, t) = 1, ch(0, t) = 1, E(0, t) = 1.$$

Для численного решения уравнений эти параметры имеют следующие выражения:

$$\begin{aligned} BMI(x, t) &= IMT(x - 1, t) + i\Delta x, \\ PICS(x, t) &= PICS(x - 1, t) + i\Delta x, \\ E(x, t) &= E(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CHD(x, t) &= IBS(x - 1, t) + i\Delta x, \\ HLA.DR(x, t) &= HLA.DR(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CD14(x, t) &= CD14(x - 1, t) + i\Delta x, \\ IPGF(x, t) &= IPGF(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CD59(x, t) &= CD59(x - 1, t) + i\Delta x, \\ AH(x, t) &= AH(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CD56(x, t) &= CD56(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CD16(x, t) &= CD16(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CVD(x, t) &= CVD(x - 1, t) + i\Delta x, \\ A(x, t) &= A(x - 1, t) + i\Delta x, \\ PhA(x, t) &= PhA(x - 1, t) + i\Delta x, \\ II10(x, t) &= II10(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CD95(x, t) &= CD95(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CVD(x, t) &= CVD(x - 1, t) + i\Delta x, \\ ACVD(x, t) &= ACVD(x - 1, t) + i\Delta x, \\ CTT(x, t) &= CTT(x - 1, t) + i\Delta x, \\ ALB(x, t) &= ALB(x - 1, t) + i\Delta x, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} GFR(x,t) &= GFR(x-1,t) + i\Delta x, \\ SOD(x,t) &= SOD(x-1,t) + i\Delta x, \\ AB(x,t) &= AB(x-1,t) + i\Delta x, \\ S(x,t) &= S(x-1,t) + i\Delta x, \\ stent(x,t) &= stent(x-1,t) + i\Delta x, \\ ChE(x,t) &= ChE(x-1,t) + i\Delta x, \\ CRP(x,t) &= CRP(x-1,t) + i\Delta x, \end{aligned}$$

здесь $\Delta x = \frac{b-a}{N}$ шаг сетки. Однако для получения предыдущих значений параметры были взяты из статистической базы данных.

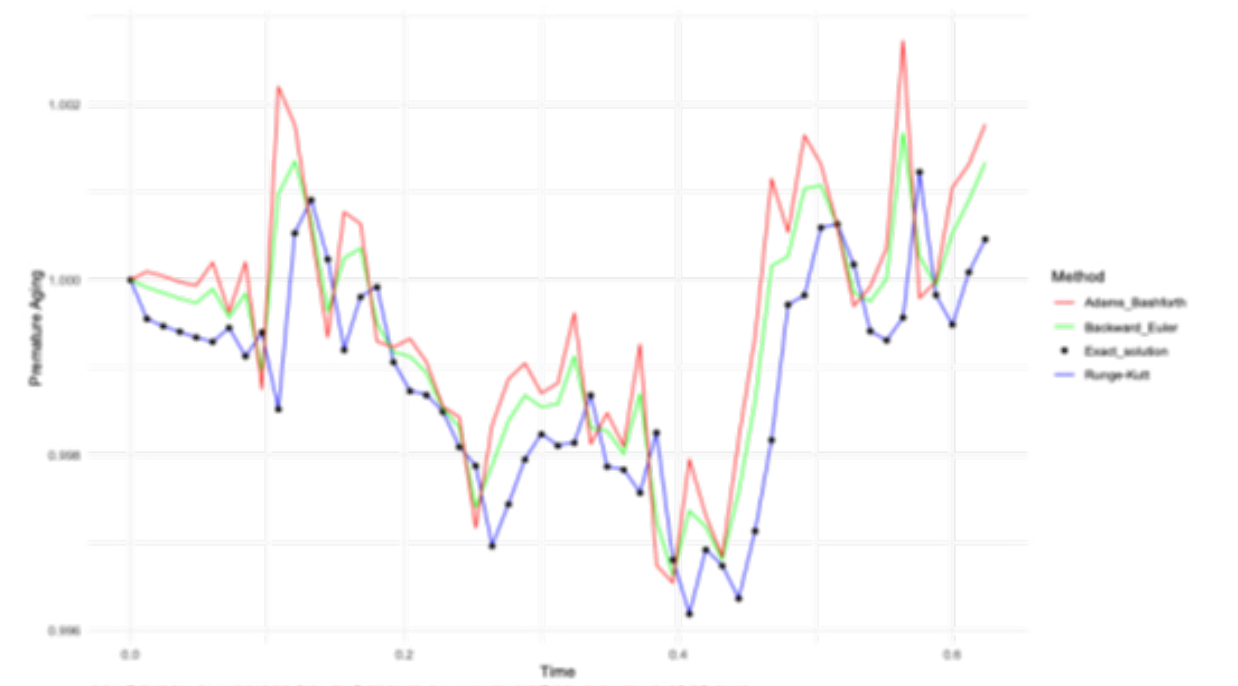
Результаты и обсуждение

Данные из таблицы 16 были использованы для моделирования численного решения.

Таблица 16 – Параметры моделирования

Определение	Значение
Шаг по времени, Δt	0.01
Шаг сетки, Δx	0.001
Количество итераций, N	1000
Интервал расчета, [a;b]	[0;1]

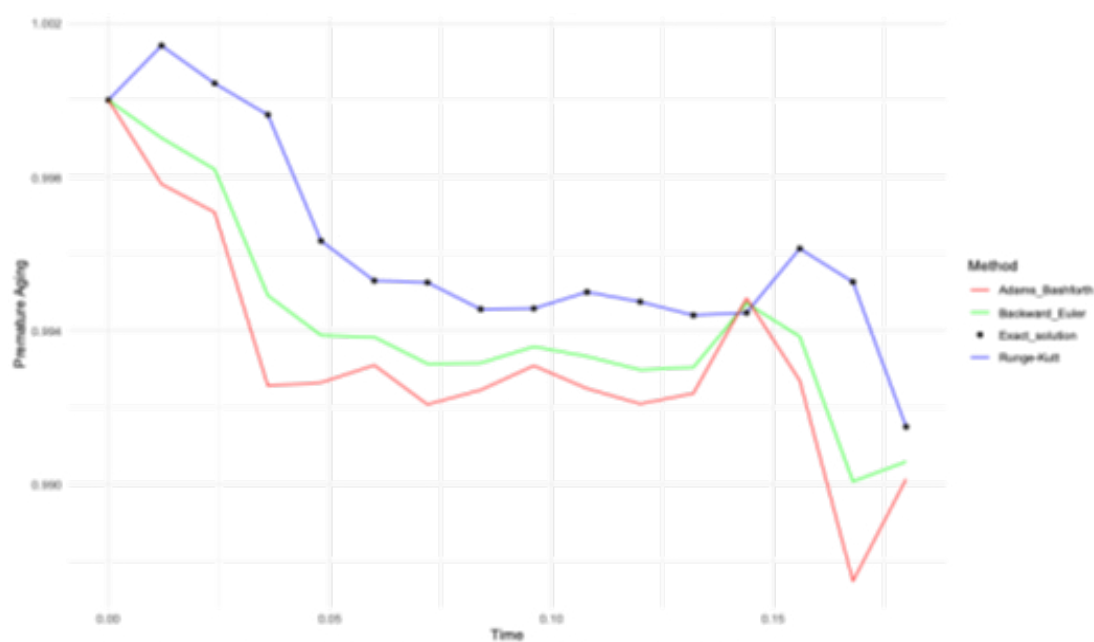
На рисунках 7 а)–в) показаны изменения в процессе старения в результате взаимодействия иммунологических биомаркеров с социально-поведенческими факторами по методам Рунге–Кутты, Адамса–Башфорта, обратного Эйлера в сравнении с точным решением.



а)



б)



в)

Рисунок 7 – а) сравнение численных методов моделирования преждевременного старения с иммунологическими биомаркерами для всех пациентов (тест I задачи 1), б) для пациентов с ССЗ (тест II задачи 1), в) для пациентов без ССЗ (тест С III задачи 1)

На рисунках 7 а)–в) показано поведение моделей преждевременного старения на основе иммунологических биомаркеров для трех тестов: все пациенты (тест I), пациенты с ССЗ (тест II) и пациенты без ССЗ (тест III). Все графики включают сравнение численных методов Рунге–Кутта, Адамса–Башфорта, обратного Эйлера и точного решения. В тесте А (рисунок 7 а)) метод Рунге–Кутта почти идеально совпадает с аналитическим решением (максимальная погрешность 0,000007536924), тогда как методы обратного Эйлера и Адамса–Башфорта имеют более выраженные отклонения (0,00424 и 0,00636 соответственно). В тесте В (рисунок 7

б)) наблюдается аналогичная картина: минимальная погрешность для Рунге–Кутты составляет 0,000004918764, в отличие от 0,00304603 и 0,004569044. В тесте С (рисунок 7 в)) метод Рунге–Кутта снова показывает наименьшую погрешность, равную 0,00000284855.

Были обнаружены различия между численными и точными решениями (таблица 17).

Таблица 17 – Порядок точности численных методов моделирования преждевременного старения с использованием иммунологических биомаркеров (задача 1)

Задача	Метод решения	Порядок метода	Тест	Максимальная ошибка $\max x_i^{exact} - x_i^{method} $
Задача 1	Рунге–Кутт	$O(\Delta x^4)$	Тест I	0.000007536924
			Тест II	0.000004918764
			Тест III	0.00000284855
	Обратный Эйлер	$O(\Delta x^2)$	Тест I	0.004240115
			Тест II	0.00304603
			Тест III	0.002952076
	Адамс–Башфорт	$O(\Delta x)$	Тест I	0.006360173
			Тест II	0.004569044
			Тест III	0.004428114

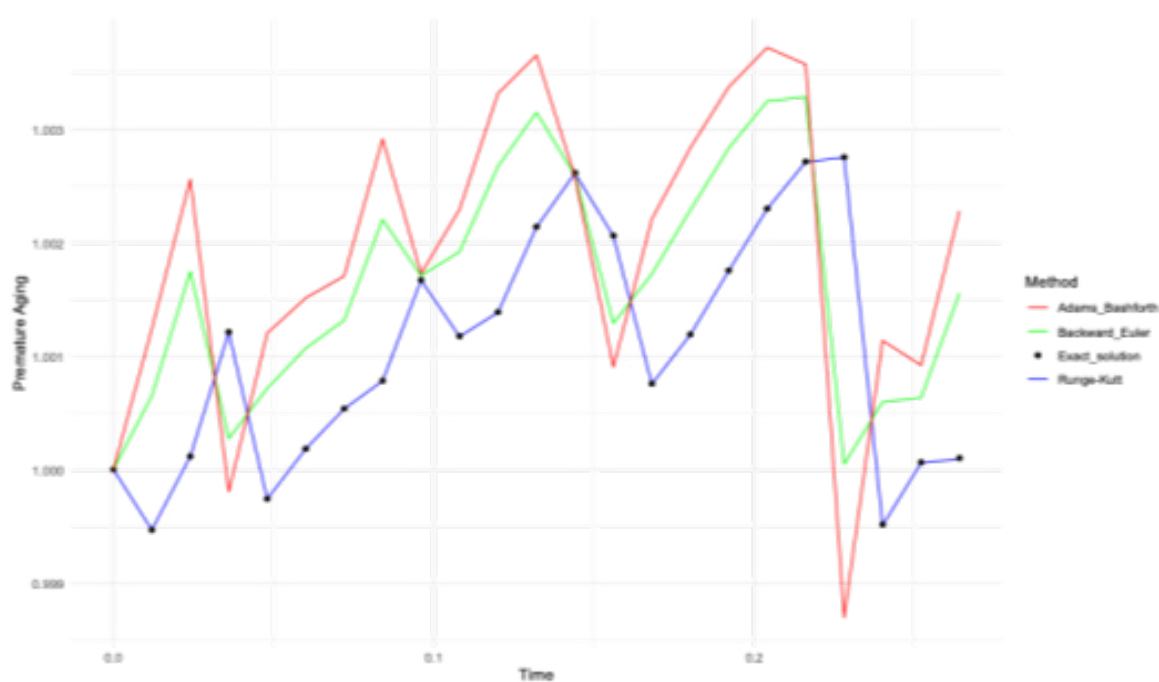
На рисунках 8 а)–в) аналогичным образом показаны результаты моделирования для биохимических биомаркеров. Для теста I (рисунок 8 а)) погрешность метода Рунге–Кутта составляет 0,000004710849, для обратного метода Эйлера погрешность составляет 0,002740348, а для метода Адамса–Башфорта – 0,004110521. В тесте II (рисунок 8 б)) для метода Рунге–Кутта она составляет 0,00001958067, для обратного метода Эйлера – 0,003500058, а для метода Адамса–Башфорта – 0,005250088. В тесте III (рисунок 8 в)) Рунге–Кутта: 0,000002147958, обратный Эйлер: 0,004239759, Адамс–Башфорт: 0,006359639. Таким образом, метод Рунге–Кутта 4-го порядка является наиболее точным численным методом решения, независимо от типа данных и наличия диагноза ССЗ.



а)



б)



в)

Рисунок 8 – а) сравнение численных методов моделирования преждевременного старения с биохимическими биомаркерами для всех пациентов (тест I задача 2), б) для пациентов с ССЗ (тест II задача 2), в) для пациентов без ССЗ (тест III задача 2)

Таблица 18 – Порядок точности численных методов моделирования преждевременного старения с использованием биохимических биомаркеров (задача 2)

Задача	Метод решения	Порядок метода	Тест	Максимальная ошибка $\max x_i^{exact} - x_i^{method} $
Задача 2	Рунге-Кутт	$O(\Delta x^4)$	Тест I	0.000004710849
			Тест II	0.00001958067
			Тест III	0.000002147958
	Обратный Эйлер	$O(\Delta x^2)$	Тест I	0.002740348
			Тест II	0.003500058
			Тест III	0.004239759
	Адамс-Башфорт	$O(\Delta x)$	Тест I	0.004110521
			Тест II	0.005250088
			Тест III	0.006359639

Согласно данным в таблице 17–18, метод Рунге–Кутта 4-го порядка показывает наименьшую погрешность по сравнению с точным решением в отличие от других численных методов; мы остановимся на этом методе. На графиках 9 (а–с) сравнивается поведение моделей преждевременного старения, основанных на иммунологических и биохимических биомаркерах, с методом Рунге–Кутта. В тесте I (рисунок 9 а)) биохимические маркеры показывают более высокие значения старения по сравнению с иммунологическими маркерами, особенно в конце временной шкалы. В тесте II (рисунок 9 б)) оба типа данных совпадают в начале временного интервала, но затем иммунологические маркеры показывают резкое увеличение старения, подтверждая их ключевую роль при наличии ССЗ. В тесте III (рисунок 9 в)) биохимические маркеры снова доминируют по уровню старения, особенно при отсутствии ССЗ.



Рисунок 9 – а) сравнение возрастных изменений иммунологических и биохимических биомаркеров для всех пациентов по методу Рунге–Кутта, б) для пациентов с ССЗ по методу Рунге–Кутта, в) для пациентов без ССЗ по методу Рунге–Кутта

На рисунках 9 (а–в) можно увидеть разницу в зависимости от вышеупомянутого (тесты I, II, III). На рисунке 9 а) можно заметить высокие показатели старения биохимических данных по сравнению с иммунологическими данными. Это ясно показывает, что без наличия данных о ССЗ можно выбрать биохимические данные, которые не требуют больших ресурсов, для исследования преждевременного старения.

На рисунке 9 б) в начале периода времени данные биомаркеров показывают схожие результаты. Со временем можно наблюдать резкий пик в иммунологических данных, что подтверждает, что данные с ССЗ имеют центральное значение для определения преждевременного старения.

На рисунке 9 в), где представлены данные без ССЗ, заметны высокие показатели биохимических данных.

Как упоминалось выше, иммунологические данные получают с большими затратами ресурсов, но в то же время они представляют высокую ценность. В результате можно сделать вывод, что данные, скорректированные с учетом ССЗ, являются наиболее подходящими для определения преждевременного старения с ССЗ.

Результаты исследования показали, что молекулы главного комплекса гистосовместимости класса II (МНС II), взаимодействующие с индексом массы тела, дали самый высокий уровень корреляции (50%), что указывает на значительное влияние этих иммунологических показателей на биологическое старение. Также было обнаружено взаимодействие уровня образования с теми же молекулами МНС II (43%), что может указывать на наличие скрытой связи между когнитивными и иммунными процессами. Рецептор CD14, расположенный на поверхности моноцитов и макрофагов, показал 41% уровень связи с постинфарктным кардиосклерозом и 30% – с ишемической болезнью сердца, что подчеркивает его роль в воспалительных и постнекротических процессах. Маркер НК-клеток CD56 коррелировал с уровнем образования на 38%, а рецептор CD16, присутствующий на НК-клетках и нейтрофилах, показал аналогичный уровень связи с показателями артериального давления. Иммунологический показатель IPGF, связанный с ангиогенезом, имел 37% корреляцию с индексом массы тела, что указывает на сосудистый компонент метаболических нарушений. В биохимическом профиле скорость клубочковой фильтрации положительно коррелировала с уровнем физической активности на 47%, в то время как супероксиддисмутаза показала отрицательную корреляцию с тем же параметром на 48%, что отражает снижение антиоксидантной активности с увеличением метаболической нагрузки.

Результаты анализа показали, что социальные факторы оказывают сопоставимое с биомаркерами влияние на темпы сердечно-сосудистого старения. Так, более высокий ИМТ положительно коррелировал с уровнем плацентарного фактора роста (IPGF), что отражает связь ожирения с сосудистой дисфункцией. Низкая физическая активность ассоциировалась со снижением скорости клубочковой фильтрации и активностью антиоксидантного фермента SOD, что подтверждает роль образа жизни в поддержании метаболического и сосудистого здоровья. Курение и употребление алкоголя усиливали воспалительные процессы, проявляясь в повышении уровня CRP. Интересной оказалась корреляция между уровнем образования и экспрессией CD59: более высокий уровень образования ассоциировался с более выраженной защитой клеточных мембран от активации комплемента. Этот результат согласуется с данными эпидемиологических исследований, демонстрирующих, что социальный статус и образ жизни напрямую влияют на иммунные и биохимические механизмы старения.

Для исследования прогнозируемых моделей преждевременного старения модели машинного обучения были первоначально обучены с использованием интегрированных клинических и иммунологических наборов данных. Такие модели, как Random Forest (RF), Logistic Regression (LR) и k-Nearest Neighbors (k-NN), достигли максимальной точности 0,81 и площа-

ди под кривой ROC (AUC) 0,69. Для повышения прогнозирующей способности впоследствии к тому же набору данных был применен алгоритм XGBoost. Эта модель продемонстрировала превосходные результаты, достигнув точности 91% и AUC 0,8333, что подчеркивает ее надежность в обнаружении иммунологических закономерностей, связанных с преждевременным старением.

Перед обучением модели была проведена обширная предварительная обработка данных. Учитывая значительный дисбаланс классов, наблюдаемый в наборе данных, была применена техника синтетической передискретизации меньшинств (SMOTE) для генерации синтетических экземпляров класса меньшинств на основе его ближайших соседей. Этот подход эффективно смягчил смещение модели в сторону класса большинства и способствовал улучшению обобщения.

Кроме того, на последующем этапе исследования была разработана прогностическая модель сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) с использованием XGBoost в сочетании с SMOTE, продемонстрировавшая высокую точность и устойчивость к мультиколлинеарности признаков.

Кроме того, альтернативный подход к решению этой проблемы предполагает использование методов машинного обучения, примененных к тщательно отобранной базе данных биомаркеров. Алгоритм и его реализация подробно описаны в нашей предыдущей работе [24], где предлагается дополнительная вычислительная стратегия для раннего выявления процессов биологического старения.

Модель имеет определенные ограничения. На ее эффективность влияет качество и полнота клинических данных, что может ограничить ее применимость к другим наборам данных. Выбранные биомаркеры отражают только часть многофакторных биологических процессов, лежащих в основе старения. Кроме того, поскольку модель была обучена на конкретной когорте, для подтверждения ее обобщаемости необходима дальнейшая валидация на более крупных и разнообразных популяциях.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что интеграция иммунологических и биохимических маркеров с социально-поведенческими факторами позволяет точно моделировать и прогнозировать процессы преждевременного старения сердечно-сосудистой системы. Иммунологические показатели, особенно у пациентов с установленными ССЗ, имеют высокую прогностическую ценность, тогда как биохимические маркеры являются информативными и доступными инструментами для оценки старения у лиц без диагностированных заболеваний. Таким образом, полученные численные результаты не только оправдывают выбор математической модели, но и открывают возможности для персонализированной медицины и ранней профилактики возрастных сердечно-сосудистых патологий.

Заключение

На основе проведенного эксперимента по иммунологическим и биохимическим биомаркерам были построены матрицы корреляции с социально-поведенческими факторами. Была построена математическая модель, определяющая уровень взаимодействия параметров для прогнозирования сердечно-сосудистого старения. Рассматривались две проблемы: влияние иммунологических и биохимических биомаркеров на преждевременное старение. Были отдельно исследованы тесты всех пациентов, без ССЗ, с ССЗ и пациентов без ССЗ. Был выбран метод численной реализации математического моделирования. Результаты показали, что из рассмотренных тестов иммунологические данные с ССЗ демонстрируют наилучшие результаты для выявления преждевременного сердечно-сосудистого старения. А биохимические маркеры эффективны для оценки риска преждевременного старения при отсутствии ССЗ.

Сравнительный анализ точности численных методов показал преимущество метода Рунге–Кутты 4-го порядка, обеспечивающего минимальные отклонения от точного аналитического решения для всех трех исследуемых тестов. Например, для пациентов с ССЗ при использовании иммунологических показателей погрешность составляла менее 0,000005, тогда как при использовании метода Адамса–Башфорта она превышала 0,0045. Аналогичная тенденция наблюдалась при моделировании с использованием биохимических данных. Эти результаты демонстрируют стабильность и эффективность выбранного численного подхода для построения математической модели биологического старения. Наиболее значимыми взаимодействиями были HLA-DR (50%), CD14 (41%) и CD16 (38%).

Индекс массы тела также коррелировал с фактором роста плаценты (37%). Скорость клубочковой фильтрации (СКФ) и цистатин С показали положительную корреляцию с физической активностью (47%), что указывает на лучшее общее состояние здоровья у более активных пациентов. А супероксиддисмутаза (СОД), фермент, защищающий клетки от окислительного стресса, показала отрицательную корреляцию с физической активностью на уровне 48%, что указывает на снижение антиоксидантной активности при увеличении метаболической нагрузки.

Таким образом, интеграция иммунологических и биохимических параметров с социально-поведенческими характеристиками позволила построить высокоточную модель для оценки риска преждевременного сердечно-сосудистого старения. Иммунологические маркеры продемонстрировали наибольшую чувствительность в популяции с установленными диагнозами, в то время как биохимические маркеры показали наилучшую прогностическую способность в общей выборке. Это подчеркивает необходимость дифференцированного подхода при выборе диагностических панелей в зависимости от клинического статуса пациента.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs) [Electronic resource]. (2023). Available at: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (accessed 12.08.2025).
- 2 D'Agostino, R.B., Vasan, R.S., Pencina, M.J., et al. General cardiovascular risk profile for use in primary care: The Framingham Heart Study. *Circulation*, 117 (6), 743–753 (2008).
- 3 Libby, P. The changing landscape of atherosclerosis. *Nature*, 592 (7855), 524–533 (2021).
- 4 Ridker, P.M. From C-reactive protein to interleukin-6 to interleukin-1: Moving upstream to identify novel targets for atheroprotection. *Circulation Research*, 118 (1), 145–156 (2016).
- 5 Hansson, G.K., & Hermansson, A. The immune system in atherosclerosis. *Nature Immunology*, 12 (3), 204–212 (2011).
- 6 Moore, K.J., Sheedy, F.J., & Fisher, E.A. Macrophages in atherosclerosis: A dynamic balance. *Nature Reviews Immunology*, 13 (10), 709–721 (2013).
- 7 Maisel, A.S., Krishnaswamy, P., Nowak, R.M., et al. Rapid measurement of B-type natriuretic peptide in the emergency diagnosis of heart failure. *New England Journal of Medicine*, 347 (3), 161–167 (2002).
- 8 Ix, J.H., & Shlipak, M.G. Cystatin C and prognosis in cardiovascular disease: A recent meta-analysis. *Journal of the American College of Cardiology*, 49 (5), 593–594 (2007).
- 9 Marmot, M., Friel, S., Bell, R., et al. Closing the gap in a generation: Health equity through action on the social determinants of health. *The Lancet*, 372 (9650), 1661–1669 (2008).
- 10 Butcher, J.C. *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*. 3rd ed. (Chichester: John Wiley & Sons, 2016).
- 11 Hairer, E., & Wanner, G. *Solving Ordinary Differential Equations II: Stiff and Differential-Algebraic Problems*. 2nd ed. (Berlin: Springer, 2010).

12 Bafei, S.E.C., & Chong, S. Biomarkers selection and mathematical modeling in biological age estimation. *Communications Biology*, 9 (1), 1–10 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41514-023-00110-8>.

13 Libert, S., et al. A mathematical model that predicts human biological age from physiological traits identifies environmental and genetic factors that influence aging. *Computational and Systems Biology* (2024). <https://doi.org/10.7554/elife.92092.1>.

14 Suleimenova, M., et al. Application of machine learning in identifying premature aging. *Archive of Gerontology and Geriatrics Research*, 9 (1), 013–021 (2024). <https://doi.org/10.17352/aggr.000038>.

15 Abzaliyev, K., Suleimenova, M., Chen, S., et al. Predicting cardiovascular aging risk based on clinical data through the integration of mathematical modeling and machine learning. *Applied Sciences*, 15 (9), 5077 (2025). <https://doi.org/10.3390/app15095077>.

16 Cevirgel, A., et al. Identification of aging-associated immunotypes and immune stability as indicators of post-vaccination immune activation. *Aging Cell*, 21 (10) (2022). <https://doi.org/10.1111/ace.13703>.

17 Levochkina, E. Immunological markers in the diagnosis of cardiovascular diseases: Prospects and forecasts [Electronic resource]. *CyberLeninka* (2023). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/immunologicheskie-markery-v-diagnostike-serdechno-sosudistyh-zabolevaniy-perspektivy-i-prognozy/viewer> (accessed 04.04.2025).

18 Ravera, S., et al. Identification of biochemical and molecular markers of early aging in childhood cancer survivors. *Cancers*, 13 (20), 5214 (2021). <https://doi.org/10.3390/cancers13205214>.

19 Mao, C., Yuan, J.Q., Lv, Y.B., et al. Associations between superoxide dismutase, malondialdehyde and all-cause mortality in older adults: A community-based cohort study. *BMC Geriatrics*, 19 (104) (2019). <https://doi.org/10.1186/s12877-019-1109-z>.

20 Sarnak, M.J., Katz, R., Fried, L.F., et al. Cystatin C and aging success. *Archives of Internal Medicine*, 168 (2), 147–153 (2008). <https://doi.org/10.1001/archinternmed.2007.40>.

21 Yang, H., Liao, Z., Zhou, Y., et al. Non-linear relationship of serum albumin-to-globulin ratio and cognitive function in American older people: a cross-sectional national health and nutrition examination survey 2011–2014 (NHANES) study. *Frontiers in Public Health*, 12 (2024). <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1375379>.

22 Muscari, A., Bianchi, G., Forti, P., et al. N-terminal pro B-type natriuretic peptide (NT-proBNP): A possible surrogate of biological age in the elderly people. *Geroscience*, 43 (2), 845–857 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11357-020-00249-2>.

23 Sayed-Ahmed, M.Z. Mathematical modelling and deep learning techniques for predicting cardiovascular disease. *Panamerican Mathematical Journal*, 34 (4), 230–244 (2024). <https://doi.org/10.52783/pmj.v34.i4.1880>.

24 Suleimenova, M., et al. A predictive model of cardiovascular aging by clinical and immunological markers using machine learning. *Diagnostics*, 15 (7), 850 (2025). <https://doi.org/10.3390/diagnostics15070850>.

25 Abhishek, et al. A machine learning model for the early prediction of cardiovascular disease in patients. 2023 Second International Conference on Advances in Computational Intelligence and Communication (ICACIC) (2023). <https://doi.org/10.1109/icacic59454.2023.10435210>.

^{1*}Сулейменова М.У.,
магистр, ORCID ID: 0009-0003-8553-5353,
*e-mail: madekin940@gmail.com

²Манапова А.Қ.,
магистр, ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,
e-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

¹Абзалиев К.Б.,
мед.ф.д., ORCID ID: 0000-0003-2452-854X,
e-mail: abzaliev_kuat@mail.ru

¹Абзалиева С.А.,
мед.ф.к., ORCID ID: 0009-0004-9802-0129,
e-mail: abzalieva.symbat@gmail.com

³Шоманов А.С.,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-8253-7474,
e-mail: adai.shomanov@nu.edu.kz

⁴Чен С.,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-2690-3588,
e-mail: simingchen3@gmail.com

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Математика және математикалық модельдеу институты, Алматы қ., Қазақстан

³Назарбаев университеті, Астана қ., Қазақстан

⁴Фудан университеті, Шанхай қ., Қытай Халық Республикасы

МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУДІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ЖҮРЕК- ТАМЫРЛАРДЫҢ ҚАРТАЮЫН БОЛЖАУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу математикалық модельдеу және машиналық оқыту әдістерін пайдалана отырып, клиникалық, иммунологиялық және биохимиялық маркерлерді кешенді талдау негізінде жүрек-қан тамырлары ауруларының (ЖҚА) қаупін болжаудың инновациялық тәсілін ұсынады. Бастапқы деректерге гуморальды және жасушалық иммунитеттің көрсеткіштері (CD59, CD16, IL-10, CD14, CD19, CD8, CD4, т.б.), цитокиндер мен жүрек-қан тамырлары ауруларының маркерлері жатады, цитокиндер және қабыну маркерлері (TNF, GM-CSF, CRP), өсу және ангиогенез факторлары (VEGF, PGF), апоптозға және цитотоксикалық әсерге қатысатын белоктар (перфорин, CD95), сондай-ақ бауыр функциясының, бүйрек функциясының, тотығу стрессінің және жүрек жеткіліксіздігінің көрсеткіштері (альбумин, N-T-S-, N-T-S, N-T-S, N-T-, 2000-2000 ж. пептид (NT-proBNP), супероксид дисмутаза (SOD), C-реактивті ақуыз (CRP), холинэстераза (ChE), холестерин және шумақтық фильтрация жылдамдығы (GFR)). Клиникалық және мінез-құлық қауіп факторлары да ескеріледі: артериялық гипертензия (АГ), бұрынғы миокард инфарктісі (PMI), коронарлық артерияларды шунттау (CABG) және/немесе стенттеу, жүректің ишемиялық ауруы (CHD), атриальды фибрилляция (AF), атриовентрикулярлық блок (AV блок), қант диабеті (ДМ), алкогольді тұтыну деңгейі (ДМ), сондай-ақ дене белсенділігі масса индексі (BMI). Зерттеуге 65 және одан жоғары жастағы 52 пациент қатысты. Алынған клиникалық, биохимиялық және иммунологиялық деректер негізінде математикалық модельдеу және машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы жүрек-қан тамырларының ерте қартаю қаупін болжау моделі әзірленді. Зерттеудің мақсаты – жүрек-қан тамырлары ауруларының және оның асқынуларының дамуына бейімділікті ерте анықтауға мүмкіндік беретін болжамдық модельді әзірлеу. Болжау мәселесін шешу үшін математикалық модельдеудің сандық әдістері, соның ішінде Рунге-Кутта, Адамс-Бэшфорт және кері Эйлер әдістері қолданылды, бұл биомаркерлердің уақыт бойынша өзгеру динамикасын және пациенттердің жағдайын жоғары дәлдікпен сипаттауға мүмкіндік берді. Қартаю процестерімен ең үлкен байланысты HLA-DR (50%), CD14 (41%) және CD16 (38%) көрсетті. BMI плацентарлы өсу факторымен корреляцияланған (37%). Гломерулярлық фильтрация жылдамдығы физикалық белсенділікпен (47%) оң корреляцияда, ал SOD белсенділігі онымен теріс корреляцияда (48%), бұл антиоксиданттық қорғаныстың төмендеуін көрсетеді. Алынған нәтижелер жүрек-қан тамырлары қаупін болжау дәлдігін арттыруға және оның дамуының алдын алу және түзету бойынша жеке ұсыныстарды тұжырымдауға мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: биомаркерлер, жүрек-қан тамырларының қартаюы, машиналық оқыту, математикалық модельдеу, иммундық қартаю, болжау.

^{1*}Suleimenova M.,

M.Ed., ORCID ID: 0009-0003-8553-5353,

*e-mail: madekin940@gmail.com

²Manapova A.,

M.Sc., ORCID ID: 0000-0003-1548-7061,

e-mail: manapova.a.k.math@gmail.com

¹Abzaliyev K.,

Dr.Med.Sc., ORCID ID: 0000-0003-2452-854X,

e-mail: abzaliyev_kuat@mail.ru

¹Abzaliyeva S.,

Cand.Med.Sc., ORCID ID: 0009-0004-9802-0129,

e-mail: abzaliyeva.symbat@gmail.com

³Shomanov A.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-8253-7474,

e-mail: adai.shomanov@nu.edu.kz

⁴Chen S.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2690-3588,

e-mail: simingchen3@gmail.com

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan²Institute of mathematics and mathematical modeling, Almaty, Kazakhstan³Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan⁴Fudan University, Shanghai, China

PREDICTION OF CARDIOVASCULAR AGING USING MATHEMATICAL MODELING

Abstract

This study presents an innovative approach to predicting the risk of cardiovascular diseases (CVD) based on a comprehensive analysis of clinical, immunological and biochemical markers using mathematical modeling and machine learning methods. The initial data include indicators of humoral and cellular immunity (CD59, CD16, IL-10, CD14, CD19, CD8, CD4, etc.), cytokines and markers of cardiovascular diseases, cytokines and inflammation markers (TNF, GM-CSF, CRP), growth and angiogenesis factors (VEGF, PGF), proteins involved in apoptosis and cytotoxicity (perforin, CD95), as well as indicators of liver function, kidney function, oxidative stress and heart failure (albumin, cystatin C, N-terminal pro-B-type natriuretic peptide (NT-proBNP), superoxide dismutase (SOD), C-reactive protein (CRP), cholinesterase (ChE), cholesterol and glomerular filtration rate (GFR)). Clinical and behavioral risk factors are also taken into account: arterial hypertension (AH), previous myocardial infarction (PMI), coronary artery bypass grafting (CABG) and/or stenting, coronary heart disease (CHD), atrial fibrillation (AF), atrioventricular block (AV block), diabetes mellitus (DM), as well as lifestyle (smoking, alcohol consumption, physical activity level), education, body mass index (BMI). The study included 52 patients aged 65 years and older. Based on the obtained clinical, biochemical and immunological data, a model for predicting the risk of premature cardiovascular aging was developed using mathematical modeling and machine learning methods. The aim of the study was to develop a prognostic model that allows for early detection of a predisposition to the development of CVD and its complications. To solve the forecasting problem, numerical methods of mathematical modeling were used, including the Runge-Kutta, Adams-Bashforth and backward Euler methods, which made it possible to describe the dynamics of changes in biomarkers and patients' condition over time with high accuracy. The greatest association with aging processes was demonstrated by HLA-DR (50%), CD14 (41%) and CD16 (38%). BMI correlated with placental growth factor (37%). Glomerular filtration rate positively correlated with physical activity (47%), while SOD activity negatively correlated with it (48%), which reflects a decrease in antioxidant protection. The obtained results make it possible to increase the accuracy of cardiovascular risk forecasting and to formulate personalized recommendations for the prevention and correction of its development.

Keywords: biomarkers, cardiovascular aging, machine learning, mathematical modeling, immune aging, forecasting.

Дата поступления статьи в редакцию: 12.08.2025

ӘӨЖ 510.67
FTAMP 27.03.66

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-271-279>

^{1,2,3}**Байжанов Б.**,
ф.-м.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0000-0002-3743-7404,
e-mail: baizhanov@math.kz

^{1,2,3}***Тазабекова Н.**,
докторант, ORCID ID: 0009-0005-3608-9259,
*e-mail: tazabekova.nargiz@gmail.com

¹**Замбарная Т.**,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-7203-1701,
e-mail: zambarnaya@math.kz

¹Математика және математикалық модельдеу институты, Алматы қ., Қазақстан

²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

³SDU университеті, Қаскелең қ., Қазақстан

ӘЛСІЗ РЕТТЕЛГЕН МИНИМАЛДЫ ТЕОРИЯЛАРДАҒЫ АЙНАЛАЛАР

Аңдатпа

Бұл жұмыста әлсіз реттелген минималды (яғни, әлсіз о-минималды) теориялардағы толық алгебралық емес 1-типтердің айналасы, әлсіз ортогоналдылық пен дерлік ортогоналдылық мәселелері қарастырылады. Типтердің айналасы – олардың жүзеге асуының жергілікті қасиеттерін сипаттау және тип ішіндегі алгебралық тұйықталу ұғымын жалпылау құралы ретінде енгізіледі. Оларды пайдалану типтердің айырмашылықтарын анықтауға және олардың өзара әрекеттесу құрылымын нақтылауға мүмкіндік береді. Біз айналасының негізгі қасиеттерін тұжырымдап, дәлелдейміз. Атап айтқанда $\alpha \in V_p(\beta) \Leftrightarrow \beta \in V_p(\alpha)$ екені анықталды. Осы нәтижелердің негізінде типтердің әлсіз және дерлік ортогоналдылығы арасындағы қатынастар қарастырылады. Атап айтқанда, олардың эквиваленттілігін, симметриялылығын және әртүрлі типтер кластары (иррационал, квазисолитарлық және квазирационалдық) үшін мінез-құлқын сипаттайтын критерийлер алынды. Осылайша, жұмыс әлсіз о-минималды теориялардағы ортогоналдылық ұғымдарын нақтылауға және дамытуға үлес қосады. Сондықтан, кейбір әлсіз о-минималды теориялар кластары үшін әлсіз және дерлік ортогоналдылықтың сәйкес келетіні көрсетілген. Алынған нәтижелер әлсіз о-минималды теориялардағы типтердің геометриясын талдау үшін жаңа құралдар береді және әлсіз о-минималды типтегі құрылымдарды әрі қарай зерттеу перспективасын ашады. Сонымен қатар, ұсынылған тәсілдер теориялардың неғұрлым жалпы кластары салыстыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Тірек сөздер: әлсіз о-минималды теориялар, әлсіз ортогоналдылық, дерлік ортогоналдылық, дөңес жиын, квазижеке тип, квазирационалды тип, иррационалды тип.

Кіріспе

Бұл мақалада әлсіз реттелген минималды теориялар контекстінде айналасы, әлсіз ортогоналдылық және дерлік ортогоналдылық мәселелері зерттеледі. Реттелген минималдылық жағдайында әрбір анықталатын қосалқы жиын нүктелер мен интервалдардың ақырлы бірігуі түрінде беріледі. Ал әлсіз реттелген минималдылық бұл шартты босаңсытып, анықталатын жиындардың дөңес жиындардың ақырлы бірігуі ретінде ұсынылуына мүмкіндік береді.

Зерттеу шеңберінде басты назар алгебралық емес толық 1-типтердің өзара әрекеттесуіне аударылады. Бұл типтерді талдау үшін негізгі құрал ретінде айналасы пайдаланылады, өйткені олар типтердің жүзеге асуы туралы локалды (жергілікті) ақпаратты сипаттайды.

Ортогоналдылық ұғымын зерделеу барысында ерекше назар айналарға бағытталады. Сонымен қатар, [10] еңбегінде сипатталған кеңейту әдістері аясында квази-айнала ұғымы негізгі рөл атқарады. Ортогоналдылық ұғымы толық емес 1-типтер үшін дөңес ортогоналдылыққа дейін жалпыланды. Бұл жерде дөңес ортогоналдылық ұғымы толық типтің дөңес жабылуына қатысты қарастырылады. Алынған нәтижелер [11] жұмысында тұжырымдалған қорытындыларды толықтыра түседі.

Сонымен қатар, ұсынылып отырған нәтижелер жарияланбаған [12] препринтінде берілген негізге сүйенеді және онда көрсетілген бірнеше маңызды дәлелдерді толықтырып, әрі кеңейтеді.

Материалдар мен әдістер

Біз мақала бойы келесі келісімді қолданамыз.

Келісім 1. Егер $\bar{a} \in M^{\ell(\bar{a})}$ мұндағы $\ell(\bar{a}) = \ell$ және $\bar{a} = \langle a_1, \dots, a_\ell \rangle$ онда $\bar{a} \in M$ дегеніміз – $\{a_1, \dots, a_\ell\} \subseteq M$. Егер $1 \leq m < \ell$, онда $\bar{a} \upharpoonright m := \langle a_1, \dots, a_m \rangle$.

Барлық жерде $\mathcal{M}'$ – әлсіз о-минималды теория T -ның моделі, ал $\mathcal{M}$ – $\mathcal{M}'$ -дің жеткілікті үлкен қаныққан элементарлы кеңейтімі.

Кез келген $C, D \subseteq M$ үшін біз $C < D$ деп жазамыз, егер $c < d$ барлық $c \in C$ және $d \in D$ үшін орындалса. Егер $c \in M$, онда $c < D$ жазу арқылы $\{c\} < D$ дегенді білдіреміз.

Параметрлердің кез келген $A \subseteq M$ жиыны бекітілген кезде, $\mathcal{M}$ -нің $|A|^+$ -қаныққан екендігін болжаймыз.

$p, q, r \in S_1(A)$ типтер әрқашан A -ның үстіндегі толық, бірақ алгебралық емес 1-типтер болады. Оқшауланған тип дегеніміз – алгебралық емес оқшауланған тип.

$\text{Aut}_A(\mathcal{M})$ – бұл M -нің барлық автоморфизмдердің тобы, олар A -ны нүктелік тұрғыда бекітеді, яғни, $f(a) = a$ кез келген $f \in \text{Aut}_A(\mathcal{M})$ және $a \in A$ үшін орындалады.

Біз келесі белгілерді қолданамыз:

$$x > F(\mathcal{M}, \bar{y}) \Leftrightarrow \forall z [F(z, \bar{y}) \rightarrow z < x]$$

$$\Psi(\mathcal{M}, \bar{x}) > F(\mathcal{M}, \bar{y}) \Leftrightarrow \forall z \forall t [F(z, \bar{y}) \wedge \Psi(t, \bar{x}) \rightarrow z < t]$$

$$p(\mathcal{M}) = \{\gamma \in \mathcal{M} \mid f \text{ кез келген } \varphi(x) \in p, \mathcal{M} \models \varphi(\gamma)\}, \quad \alpha \models p \Leftrightarrow \alpha \in p(\mathcal{M})$$

Анықтама 2. A – сызықты реттелген жиын болсын, ал $B \subseteq A$. Біз B -ні дөңес дейміз, егер кез келген $a, b \in B$ және барлық $x \in A$,

$$a < x < b \Rightarrow x \in B.$$

Анықтама 3. Формула $F(x, y, \bar{a})$, $\bar{a} \in A$ оңға қарай дөңес деп аталады, егер

$$\mathcal{M} \models \forall y \forall x [(F(x, y, \bar{a}) \rightarrow (y \leq x \wedge \forall z (y \leq z \leq x \rightarrow F(z, y, \bar{a}))))].$$

Формула $G(x, y, \bar{a})$, $\bar{a} \in A$ солға қарай дөңес деп аталады, егер

$$\mathcal{M} \models \forall y \forall x [(G(x, y, \bar{a}) \rightarrow (y \geq x \wedge \forall z (x \leq z \leq y \rightarrow G(z, y, \bar{a}))))].$$

Барлық жерде $\mathcal{M}'$ – әлсіз о-минималды теория T -ның моделі, ал $\mathcal{M}$ – $\mathcal{M}'$ -нің жеткілікті үлкен қаныққан элементарлы кеңейтімі.

Кез келген $C, D \subseteq M$ үшін біз $C < D$ деп жазамыз, егер $c < d$ барлық $c \in C$ және $d \in D$ үшін орындалса. Егер $c \in M$ онда $c < D$ жазу арқылы $\{c\} < D$ дегенді білдіреміз.

Параметрлердің кез келген $A \subseteq M$ жиыны бекітілген кезде, $\mathcal{M}$ -нің $|A|^+$ -қаныққан екендігін болжаймыз.

Анықтама 4. (Б.С. Байжанов, В.В. Вербовский [1])

1. Формула $\varphi(x, \bar{a})$ -ның дөңес жабылуы келесі формула арқылы беріледі:

$$\varphi^e(x, \bar{a}) := \exists y_1 \exists y_2 (\varphi(y_1, \bar{a}) \wedge \varphi(y_2, \bar{a}) \wedge (y_1 \leq x \leq y_2)).$$

$p(x) \in S_1(A)$ типінің дөңес жабылуы келесі типпен беріледі:

$$p^c(x) := \{\varphi^c(x, \bar{a}) \mid \varphi(x, \bar{a}) \in p\}.$$

Анықтама 5. (Б.С. Байжанов [2, 3]) $p \in S_1(A)$, $\bar{a} \in A$ болсын. Біз $\Phi(x, y, \bar{a})$, формуланы p -тұрақты (p -сақтаушы) дейміз, егер кез келген $\alpha \models p$ үшін $\gamma_1, \gamma_2 \models p$ табылып, $\gamma_1 < \Phi(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a}) < \gamma_2$ шартын қанағаттандырса.

Анықтама 6. (D. Marker [4]) $\gamma(v) \in S_1(M)$ қиылысы M -де бірімәнді жүзеге асырылатын деп аталады, егер $\gamma(v)$ -ні жүзеге асыратын кез келген c элементі $Pr(M \cup \{c\})$ бастапқы модельде $\gamma(v)$ -нің жүзеге асырылуы болып табылады.

Маркердің бірімәнді жүзеге асырылатын типтер туралы ұғымына сүйене отырып, біз бұл түсінікті әлсіз о-минималды теориялар контекстіне жалпылаймыз және мұндай типтерді жеке типтер деп атаймыз.

Анықтама 7. [5] Біз p -ті оңға қарай жартылай-квазижеке дейміз, егер оңға қарай ең үлкен p -сақтаушы оңға қарай дөңес $2-A$ -формула $F(x, y, \bar{a})$ бар болса, мұндағы $\bar{a} \in A$.

Біз p -ті солға қарай жартылай-квазижеке дейміз, егер солға қарай ең үлкен p -сақтаушы солға қарай дөңес $2-A$ -формула $G(x, y, \bar{a})$ бар болса, мұндағы $\bar{a} \in A$.

Біз p -ті квазижеке дейміз, егер ол әрі оңға, әрі солға қарай жартылай-квазижеке болса.

$F(y, x, \bar{a})$ оңға қарай ең үлкен p -сақтаушы дөңес формула, ал $G(y, x, \bar{a})$ – солға қарай ең үлкен p -сақтаушы дөңес формула болсын. [6]-да дәлелденгендей, $E_p(x, y, \bar{a}) := F(x, y, \bar{a}) \vee G(x, y, \bar{a})$ формуласы эквиваленттік қатынас болып табылады.

$p \in S_1(A)$ квазижеке тип болсын. Егер $E_p(x, y, \bar{a}) \equiv (x = y)$, біз p -ті жеке тип дейміз.

Анықтама 8. $p \in S_1(A)$ болсын, $B \subset M$ және $\mathcal{M} \models B \cup A$ – қанық болсын. Онда p -типіндегі B жиынының айналасы келесі жиын арқылы анықталады:

$$V_p(B) := \{\gamma \in M \mid \exists \gamma_1, \gamma_2 \in p(\mathcal{M}), H(x, \bar{b}, \bar{c}) \text{ формуласы бар, } \bar{b} \in B, \bar{c} \in A,$$

$$\gamma_1 < H(\mathcal{M}, \bar{b}, \bar{c}) < \gamma_2, \gamma \in H(\mathcal{M}, \bar{b}, \bar{c})\}.$$

$$\bar{a} = \langle \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k \rangle \text{ болсын, онда } V_p(\bar{a}) := V_p(\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}).$$

Нәтижелер мен талқылау

Лемма 9. $p \in S_1(A)$ болсын.

(i) $\beta \in p(\mathcal{M})$ болсын. Онда $|V_p(\beta)| = 1 \Leftrightarrow p$ – жеке тип.

(ii) p квазижеке $\Leftrightarrow \exists \beta \in p(\mathcal{M}), V_p(\beta) = (A \cup \beta)$ -анықталатын жиын. (Шындығында, $E_p(\mathcal{M}, \beta, \bar{c}_p) = V_p(\beta)$)

Дәлел.

(i) $(\Rightarrow)$ p жеке тип болсын. Онда $E_p(x, y, \bar{a}) \equiv (x = y)$. Бұл дегеніміз, кез келген $\beta \in p(\mathcal{M})$ үшін E_p -ке қатысты эквиваленттік класста тек бір ғана элемент бар, ол β -нің өзі. $V_p(\beta)$ анықтамасы бойынша β -ның E_p -ке қатысты эквиваленттік класы болып табылады. Сондықтан, егер p жеке тип болса, онда

$$V_p(\beta) = \{\beta\} \Rightarrow |V_p(\beta)| = 1.$$

$(\Leftarrow)$ $|V_p(\beta)| = 1$ болсын. Онда $E_p(x, y)$ тек тривиалды эквиваленттіліктерді ажыратады. Осыдан $E_p(x, y) \equiv (x = y)$, және p жеке тип болады.

(ii) $V_p(\beta)$ айналасы E_p -тің астындағы β -ның эквиваленттік класы ретінде анықталады, яғни: $V_p(\beta) = \{x \in M \mid E_p(x, \beta, \bar{a})\}$.

($\Rightarrow$) Егер $\gamma \in V_p(\beta)$ болса, онда $H(x, \beta)$ формуласы бар болып $\gamma \in H(\mathcal{M}, \beta) \subset p(\mathcal{M})$. Осыған қоса

$$H^c(x, \beta) := \exists x_1 \exists x_2 (H(x_1, \beta) \wedge H(x_2, \beta) \wedge x_1 \leq x \leq x_2).$$

$p(\mathcal{M})$ дөңес болғандықтан $H^c(\mathcal{M}, \beta) \subset p(\mathcal{M})$. Назар аударыңыз:

$$H^c(x, \beta) \equiv (H^c(x, \beta) \wedge x < \beta) \vee (x = \beta) \vee (H^c(x, \beta) \wedge \beta < x).$$

Сонда $V_p(\beta) \subseteq E(\mathcal{M}, \beta)$. Анықтама бойынша $E(\mathcal{M}, \beta) \subseteq V_p(\beta)$. Демек, $E(\mathcal{M}, \beta) = V_p(\beta)$.

($\Leftarrow$) Кейбір $\beta \in p(\mathcal{M})$ үшін $V_p(\beta)$ айналасы $(A \cup \{\beta\})$ -анықталатын болсын. Яғни, мынадай формула $\psi(x, \beta)$ бар: $V_p(\beta) = \{x \in M \mid \psi(x, \beta)\}$.

Сонымен қатар, $V_p(\beta)$ айналасы E_p астындағы эквиваленттік класс болғандықтан, ол дөңес және $p(\mathcal{M})$ -де қамтылған. $E_p(x, y, \bar{c})$ формуланы былай анықтаймыз:

$$E_p(x, y, \bar{c}) \equiv \forall \beta (\psi(x, \beta) \leftrightarrow \psi(y, \beta)).$$

Осылайша, $E_p(x, y, \bar{c}) - p(\mathcal{M})$ -де дөңес кластармен эквиваленттік қатынасты анықтайды, ал берілген β үшін:

$$E_p(\mathcal{M}, \beta, \bar{c}) = V_p(\beta).$$

Олай болса, p квазижеке тип болып табылады. $\square$

Лемма 10. $\alpha \in V_p(\beta) \Leftrightarrow \beta \in V_p(\alpha)$

Дәлел. $\alpha \in V_p(\beta)$ болсын. Онда $\theta(x, \beta)$ формуласы және $\gamma_1, \gamma_2 \in p(\mathcal{M})$ элементтері бар, олар мына шартты қанағаттандырады:

$$\gamma_1 < \theta(\mathcal{M}, \beta) < \gamma_2, \quad \alpha \in \theta(\mathcal{M}, \beta) \quad \text{және} \quad \models \forall y (\theta(\alpha, y) \rightarrow y < \alpha).$$

$\theta^c(x, \beta)$ формуласы осылай анықталатын болсын:

$$\theta^c(x, \beta) := \exists x_1, x_2 ((x_1 \leq x \leq x_2) \wedge \bigwedge_{i=1}^2 \theta(x_i, \beta)).$$

Егер $f \in \text{Aut}_A(\mathcal{M})$ болса, онда кез келген $H(x_1, \dots, x_n)$ формуласы үшін мынадай орындалады: $\mathcal{M} \models H(c_1, \dots, c_n) \Leftrightarrow \mathcal{M} \models H(f(c_1), \dots, f(c_n))$.

Енді A -ны бекітетін $\mathcal{M}$ -нің автоморфизмін f алайық, мұнда $f(\gamma_2) = \gamma_1, f(\beta) = \beta', f(\gamma_1) = \gamma_2$. Осыдан:

$$\gamma_1' < \theta^c(\mathcal{M}, \beta') < \gamma_2' = \gamma_1 < \theta^c(\mathcal{M}, \beta) < \gamma_2$$

Анық, $\alpha \notin \theta^c(\mathcal{M}, \beta')$, сондықтан $\models / \theta^c(\alpha, \beta')$. Демек, μ бар және ол

$$\mu < \theta^c(\alpha, \mathcal{M}) < \gamma_2.$$

Егер $\models K(\gamma_1, \beta, \gamma_2)$ болса, онда $K(\gamma_1, \beta', \gamma_2)$. Осылайша, $\theta^c(\alpha, y)$ формуласы $\beta \in V_p(\alpha)$ фактісінің куәсі болып табылады. Себебі кез келген $n < \omega$ түшін $\theta(x, f^n(\beta))$ формула $x = \alpha$ -да орындалмайды (яғни, $\models / \theta(\alpha, f^n(\beta))$). $\square$

Анықтама 11. $p \in S_1(A)$ оқшауланбаған болсын. Біз p -ны оңнан квазирационалды дейміз, егер $\bar{a} \in A$ болатын $U(x, \bar{a})$ сформуласы бар болып, кез келген $\alpha \models p$, үшін келесі тұжырым орындалса:

$$\forall \beta [\alpha < \beta \wedge \mathcal{M} \models U(\beta, \bar{a}) \Rightarrow tp(\beta/A) = p].$$

p -ны солдан квазирационалды дейміз, егер $\bar{a} \in A$ болатын $U(x, \bar{a})$ сформуласы бар болып, кез келген $\alpha \models p$ үшін келесі тұжырым орындалса:

$$\forall \beta [\beta < \alpha \wedge \mathcal{M} \models U(\beta, \bar{a}) \Rightarrow tp(\beta/A) = p].$$

Оқшауланбаған және квазирационалды емес тип p иррационалды деп аталады.

Теорема 12. [Компакттылық теоремасы, Л. Хенкин [7]]. Егер L -сөйлемдерінің жиыны T -ның әрбір ақырлы ішкі жиыны қанағаттандырылатын болса, онда T -нің өзі де қанағаттандырылады.

Ескерту 13.

(i) $p, q \in S_1(A)$ алгебралық емес болсын, $\alpha \in p(\mathcal{M})$ және $\Phi(x, y, \bar{a})$ мұндағы $\bar{a} \in A$, сондай болсын, егер $\Phi(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a}) \subseteq q(\mathcal{M})$ (яғни, p типі q типті оқшаулайды). Онда әрбір $\beta \models p$ үшін $\Phi(\mathcal{M}, \beta, \bar{a}) \subset q(\mathcal{M})$.

(ii) Егер q сол жақ бойынша иррационал болса, онда $C(x)$ формуласын анықтайтын ешбір M -анықталатын жиын болмайды, мұндағы $C(\mathcal{M}) = q(\mathcal{M})^-$.

Сонымен қатар, кез келген $\Phi(x, \bar{\beta})$, формуласы үшін, мұндағы $\bar{\beta} \in M$, егер $\Phi(\mathcal{M}, \bar{\beta}) \subseteq q(\mathcal{M})$ болса, онда $q(\mathcal{M})$ -де мынадай γ элементі табылады, ол үшін

$$\gamma < \Phi(\mathcal{M}, \bar{\beta}).$$

(iii) Егер q оң жақ бойынша иррационал болса, яғни $C(x)$ формуласын анықтайтын ешбір M -анықталатын жиын болмайды, мұндағы

$$C(\mathcal{M}) = q(\mathcal{M})^+,$$

онда кез келген $\Phi(x, \bar{\beta})$ формуласы үшін, мұндағы $\bar{\beta} \in M$, егер $\Phi(\mathcal{M}, \bar{\beta}) \subseteq q(\mathcal{M})$ болса, онда $q(\mathcal{M})$ -де мынадай γ элементі табылады, ол үшін

$$\gamma > \Phi(\mathcal{M}, \bar{\beta}).$$

Теорема 14. $p \in S_1(A)$, $B \subset M$ болсын және $\mathcal{M} \models A \cup B|^+$ – қаныққан модель болсын. Сонда келесі тұжырымдар орындалады:

1. $V_p(B)$ не дөңес, не бос жиын болады;

2. p иррационалды болсын. Онда кез келген $\bar{a} \in M \setminus M'$, кез келген $H(x, \bar{a}, \bar{a})$ формуласы және $\bar{a} \in A$ үшін

$$[H(\mathcal{M}, \bar{a}, \bar{a}) \neq \emptyset, H(\mathcal{M}, \bar{a}, \bar{a}) \subseteq p(\mathcal{M}) \Rightarrow H(\mathcal{M}, \bar{a}, \bar{a}) \subseteq V_p(\bar{a})];$$

3. $V_p(B) \neq \emptyset \Rightarrow \exists \gamma_1, \gamma_2 \in p(\mathcal{M}), \gamma_1 < V_p(B) < \gamma_2$;

4. $\forall \beta \in p(\mathcal{M}) [V_p(B) \neq \emptyset, \beta \notin V_p(B) \Rightarrow \forall q \in S_1(A), V_q(\beta) \cap V_q(B) = \emptyset]$;

5. $\forall \alpha \in p(\mathcal{M}): V_p(B) < \alpha \Rightarrow \exists \alpha_0 \in p(\mathcal{M}) [V_p(B) < \alpha_0 < V_p(\alpha)]$.

Дәлел.

1. Анықтама 8 бойынша.

2. Анықтама 8 және Ескерту 13 (ii), (iii) бойынша.

3. Анықтама 8 және Компакттылық теоремасы (Теорема 12) бойынша.

4. $q \in S_1(A)$ тип сондай болсын $V_q(\beta) \cap V_q(B) \neq \emptyset$. Онда $\Phi(x, \beta, \bar{b})$, мұндағы $\bar{b} \in A$, сондай формула бар, және $H(x, \bar{a}, \bar{c})$, мұндағы $\bar{a} \in B, \bar{c} \in A$ сондай болсын, сонда $\exists \gamma \in \Phi(\mathcal{M}, \beta, \bar{b}) \cap H(\mathcal{M}, \bar{a}, \bar{c}), \Phi(\mathcal{M}, \beta, \bar{b}) \subset V_q(\beta), H(\mathcal{M}, \bar{a}, \bar{c}) \subset V_q(B)$.

Анықтама 8 бойынша, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4 \in q(\mathcal{M})$ бар, сондай болғанда

$$\gamma_1 < \Phi(\mathcal{M}, \beta, \bar{b}) < \gamma_2, \gamma_3 < H(\mathcal{M}, \bar{a}, \bar{c}) < \gamma_4.$$

Let $\mu_1 = \min\{\gamma_1, \gamma_3\}, \mu_2 = \max\{\gamma_2, \gamma_4\}, f \in \text{Aut}_A(\mathcal{M})$ сондай болсын, $f(\mu_2) = \mu_1$.

$$\beta_1 := f(\beta), \beta_2 := f^{-1}(\beta).$$

Сондықтан: $\Phi(\mathcal{M}, \beta_1, \bar{b}) < \mu_1 < H(\mathcal{M}, \bar{a}, \bar{c}) < \mu_2 < \Phi(\mathcal{M}, \beta_2, \bar{b})$, және

$(\beta_1 < \beta < \beta_2$ немесе $\beta_2 < \beta < \beta_1)$.

$$K(y, \bar{\alpha}, \bar{b}, \bar{c}) := \exists x (H(x, \bar{\alpha}, \bar{c}) \wedge \Phi(x, y, \bar{b}))$$

болсын. Онда $\beta \in K(\mathcal{M}, \bar{\alpha}, \bar{b}, \bar{c})$ және $\beta_1, \beta_2 \notin K(\mathcal{M}, \bar{\alpha}, \bar{b}, \bar{c})$.

$K_1(x, \bar{\alpha}, \bar{b}, \bar{c})$ формаласы $K(x, \bar{\alpha}, \bar{b}, \bar{c})$ -ның дөңес ішкі формуласы болсын, сондай болғанда $\beta \in K_1(\mathcal{M}, \bar{\alpha}, \bar{b}, \bar{c})$.

Демек,

$$\beta_1 < K_1(\mathcal{M}, \bar{\alpha}, \bar{b}, \bar{c}) < \beta_2 \text{ немесе } \beta_2 < K_1(\mathcal{M}, \bar{\alpha}, \bar{b}, \bar{c}) < \beta_1.$$

Сонда $\beta \in V_p(\bar{\alpha})$ және $\beta \in V_p(B)$. Қайшылық.

5. $V_p(B) < \alpha$ деп болжайық.

1-қадам. Біз $V_p(B) < V_p(\alpha)$ екенін көрсетуге тиіспіз. Қайшылық үшін, $V_p(B)$ және $V_p(\alpha)$ қиылыспайтын жиындар емес, яғни $V_p(B) \cap V_p(\alpha) \neq \emptyset$ деп жорамалдап көрейік.

$V_p(B) = \bigcup H_i(\mathcal{M}, \bar{b}, \bar{c})$ болсын, ал

$$V_p(\alpha) = \{\delta \mid \delta \in \Phi(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a}), \exists \gamma_1, \gamma_2 (\gamma_1 < \Phi(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a}) < \gamma_2)\}.$$

Бір $\gamma \in H(\mathcal{M}, \bar{b}, \bar{c}) \cap \Phi(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a})$ таңдайық. Сонда

$$K(y, \bar{b}, \bar{c}) := \exists x (H(x, \bar{b}, \bar{c}) \wedge \Phi(x, y, \bar{a})).$$

$\bar{b} \in B, \bar{a}, \bar{c} \in A$ болған жағдайда, $\alpha \models K(y, \bar{b}, \bar{c}, \bar{a})$, Сондықтан $\alpha \in V_p(B)$.

Қайшылық, өйткені біз $V_p(B) < \alpha$ деп болжадық. Демек, $V_p(B) < V_p(\alpha)$.

2-қадам. Енді біз $\alpha_0 \in p(\mathcal{M})$ бар екенін көрсетеміз, мұнда $[V_p(B) < \alpha_0 < V_p(\alpha)]$.

a) $V_p(\alpha)$ анықталатын.

α_1) $V_p(B)$ анықталатын.

$U(M) = V_p(B)^+$ деп $V_p(B)$ оң шекарасын белгілейік.

$$F(y, \bar{b}_0, \bar{c}) := U(x, \bar{b}_0, \bar{c}) \wedge x < y \wedge \forall x [(U(\mathcal{M}, \bar{b}_0, \bar{c}) < z \rightarrow (E_p(z, y) \vee E_p(\mathcal{M}, y) < z))]$$

$\alpha \in F(\mathcal{M}, \bar{b}_0, \bar{c})$ болғандықтан, $\alpha \in V_p(B)$.

α_2) $V_p(B) = \bigcup_{i \in I} H_i(\mathcal{M}, \bar{b}_0, \bar{c})$.

Келесі формулалар жиыны

$$\{(H_{i_1}(\mathcal{M}, \bar{b}, \bar{c}) \cup \dots \cup H_{i_n}(\mathcal{M}, \bar{b}, \bar{c})) < x < E_p(\mathcal{M}, \alpha) \mid i, i_n \in I\}$$

қайшылықсыз, сондықтан оны қанағаттандыратын α_0 бар. Сонда

$$V_p(B) < \alpha_0 < V_p(\alpha).$$

b) $V_p(\alpha)$ анықталмайды. Себебі, 1-қадам бойынша $V_p(B) < V_p(\alpha)$, сондықтан $V_p(\alpha)$ -ның төменгі шегі анықталмайды. Формулалар жиыны

$$\{H(\mathcal{M}, \bar{b}, \bar{c}) < x < \Phi(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a}) \mid H(\mathcal{M}, \bar{b}, \bar{c}) \subset V_p(B), \Phi(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a}) \subset V_p(B)\}$$

қайшылықсыз, сондықтан осы жиынды қанағаттандыратын элемент бар. $\square$

Анықтама 15. $p, q \in S_1(A)$ болсын. Біз $\mathcal{P}$ типін q -ға әлсіз ортогонал дейміз (белгіленеді $p \boxdot^w q$) егер кез келген $H(x, y, \bar{a})$, $\bar{a} \in A$, кез келген $\alpha \in p(\mathcal{M})$, үшін келесі орындалса:

$$[H(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a}) \cap q(\mathcal{M}) \neq \emptyset \Rightarrow q(\mathcal{M}) \subseteq H(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a})].$$

Егер $\mathcal{P}$ типі q -ға әлсіз ортогонал емес болса, онда оны $p \boxdot^w q$ деп белгілейміз.

Анықтама 16. $p, q \in S_1(A)$ болсын. Біз $\mathcal{P}$ типін q -ға дерлік ортогонал дейміз (белгіленеді $p \boxdot^a q$), егер $\exists \alpha \in p(\mathcal{M}) (\Leftrightarrow \forall \alpha \in p(\mathcal{M}), V_q(\alpha) = \emptyset)$. Егер $\mathcal{P}$ типі q -ға дерлік ортогонал болмаса, онда $p \boxdot^a q$ деп белгілейміз..

Осы анықтамадан $p \boxdot^a q \Leftrightarrow V_p(\alpha) \neq \emptyset$. Ал $V_p(\alpha) \neq \emptyset \Leftrightarrow \Phi(x, \alpha, \bar{a})$ формуласы бар, және $q(\mathcal{M})$ -ден γ_1, γ_2 элементтері бар болып, мына шарт орындалады:

$$\gamma_1 < \Phi(\mathcal{M}, \alpha, \bar{a}) < \gamma_2.$$

$p, q \in S_1(A)$ үшін әлсіз және дерлік ортогоналдықтың келесі қасиеттері орындалады:

1. $p \boxdot^w q \Rightarrow q \boxdot^w p$;
2. $p \boxdot^w q \Leftrightarrow p(x) \cup q(y)$ толық 2- A -тип болып табылады;
3. Егер p алгебралық болса, онда әрбір $q \in S_1(A)$ үшін $p \boxdot^w q$;
4. $p \boxdot^w q \Rightarrow p \boxdot^a q$;
5. $p \boxdot^w q, p \boxdot^a q$ орындалатын әлсіз о-минималды T теориясы бар;
6. T о-минималды болсын. Онда $p \boxdot^a q \Leftrightarrow p \boxdot^w q$.

Қорытынды

Бұл жұмыста біз әлсіз реттелген минималды теориялардағы алгебралық емес толық 1-типтердің айналаларын, сондай-ақ олардың әлсіз және дерлік ортогоналдылық қасиеттерін зерттедік. Айнала ұғымын қолдана отырып, әлсіз және дерлік ортогоналдылық арасындағы өзара байланысты сипаттап, түрлі типтер кластарында олардың мінез-құлқын талдадық. Алынған нәтижелер әлсіз о-минималды құрылымдардағы типтердің геометриясын зерттеу үшін жаңа әдістемелік тәсілдер ұсынады және болашақ зерттеулерге теориялық негіз қалыптастырады.

Қаржыландыру туралы ақпарат: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (Грант No AP19677434).

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Baizhanov, B.S., and Verbovskii, V.V. O-stable theories. *Algebra and Logic*, 50 (3), 211–225 (2011).
- 2 Baizhanov, B.S. Types in weakly o-minimal theories. 1st Congress of Kazakhstan Mathematicians (11–14 September 1996), Shymkent, p. 177 (1996).
- 3 Baizhanov, B.S. One-types in weakly o-minimal theories. *Proceedings of Informatics and Control Problems Institute*, Almaty, pp. 77–90 (1996).
- 4 Marker, D. Omitting types in o-minimal theories. *Journal of Symbolic Logic*, 51 (1), 63–74 (1986). <https://doi.org/10.2307/2273943>
- 5 Baizhanov, B.S. Orthogonality of one-types in weakly o-minimal theories. In: Pinus, A.C., and Ponomaryov, K.N. (eds.) *Algebra and Model Theory*. Novosibirsk State Technical University, pp. 5–28 (1999).
- 6 Baizhanov, B.S., and Tazabekova, N.S. Essential kinds of 1-types over sets of models of weakly o-minimal theories. *Kazakh Mathematical Journal*, 23 (4), (2023). <https://doi.org/10.70474/ckvn1r44>
- 7 Henkin, L. The completeness of the first-order functional calculus. *Journal of Symbolic Logic*, 14 (3), 159–166 (1949).
- 8 Shelah, S. *Classification theory and the number of non-isomorphic models*. North Holland (1978).
- 9 Baldwin, J. *Fundamentals of stability theory*. Springer-Verlag (1988).
- 10 Baizhanov, B.S. Expansion of a model of a weakly o-minimal theory by a family of unary predicates. *Journal of Symbolic Logic*, 66, 1382–1414 (2001). <https://doi.org/10.2307/2695114>
- 11 Baizhanov, B., Umbetbayev, O., and Zambarnaya, T. Non-orthogonality of 1-types in theories with a linear order. *Bulletin of Irkutsk State University. Series “Mathematics”* (accepted for publication).
- 12 Baizhanov, B.S. Classification of one-types in weakly o-minimal theories and its corollaries. Preprint (1996).
- 13 Baizhanov, B.S. Expansion of an o-minimal model by unary convex predicates. *Researches in theory of algebraic systems*, Karaganda (1995).
- 14 Kulpehsov, B.Sh. Weak o-minimality of a linearly ordered structure. *Researches in theory of algebraic systems*, Karaganda, 61–67 (1995).

- 15 Baizhanov, B.S., Sudoplatov, S.V., and Verbovskiy, V.V. Conditions for non-symmetric relations of semi-isolation. *Siberian Electronic Mathematical Reports*, 9, 161–184 (2012).
- 16 Dickmann, M.A. Elimination of quantifiers for ordered valuation rings. *Proceedings of the 3rd Easter Model Theory Conference*, Gross Koris, Berlin (1985).
- 17 van den Dries, L. Remarks on Tarski's problem concerning $(R, +, \cdot, \exp)$. *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics*, 112, 97–121 (1984). [https://doi.org/10.1016/S0049-237X\(08\)71811-1](https://doi.org/10.1016/S0049-237X(08)71811-1)
- 18 Laskowski, M., and Steinhorn, Ch. On o-minimal expansions of Archimedean ordered groups. *Journal of Symbolic Logic*, 60, 817–878 (1995). <https://doi.org/10.2307/2275758>
- 19 Lascar, D., and Poizat, B. An introduction to forking. *Journal of Symbolic Logic*, 44, 330–350 (1979).
- 20 Mayer, L. Vaught's conjecture for o-minimal theories. *Journal of Symbolic Logic*, 53, 146–159 (1988). <https://doi.org/10.2307/2274434>
- 21 Marker, D., and Steinhorn, Ch. Definable types in o-minimal theories. *Journal of Symbolic Logic*, 59, 185–198 (1994). <https://doi.org/10.2307/2275260>
- 22 Macpherson, D., Marker, D., and Steinhorn, Ch. Weakly o-minimal structures and real closed fields. *Transactions of the American Mathematical Society*, 352 (12), 5435–5483 (2000). <https://doi.org/10.2307/2275260>

^{1,2,3}**Байжанов Б.,**

д.ф.-м.н., профессор, ORCID ID: 0000-0002-3743-7404,

e-mail: baizhanov@math.kz

^{1,2,3*}**Тазабекова Н.,**

докторант, ORCID ID: 0009-0005-3608-9259,

*e-mail: tazabekova.nargiz@gmail.com

¹**Замбарная Т.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7203-1701,

e-mail: zambarnaya@math.kz

¹Институт математики и математического моделирования, г. Алматы, Казахстан

²Казахстанско-Британский технический университет, г.Алматы, Казахстан

³Университет СДУ, г. Каскелен, Казахстан

ОКРЕСТНОСТИ В СЛАБО УПОРОДЯЧЕННО МИНИМАЛЬНЫХ ТЕОРИЯХ

Аннотация

В данной работе исследуются окрестности, слабая ортогональность и почти ортогональность полных неалгебраических 1-типов в слабо упорядоченных минимальных (слабо о-минимальных) теориях. Окрестности вводятся как инструмент для описания локального поведения реализаций типов и обобщения понятия алгебраического замыкания внутри типа. Их использование позволяет выявить различия между типами и уточнить структуру их взаимодействия. Мы формулируем и доказываем основные свойства окрестностей. В частности, установлено, что $\alpha \in V_p(\beta) \Leftrightarrow \beta \in V_p(\alpha)$. На основе этих результатов изучаются соотношения между слабой ортогональностью и почти ортогональностью типов. В частности, получены критерии, описывающие их эквивалентность, симметричность и поведение для различных классов типов (иррациональных, квазисолитарных и квазирациональных). Таким образом, работа вносит вклад в уточнение и развитие понятий ортогональности для слабо о-минимальных теорий. Также показано, что для некоторых классов слабо о-минимальных теорий слабая и почти ортогональность совпадают. Полученные результаты предоставляют новые инструменты для анализа геометрии типов в слабо о-минимальных теориях и открывают перспективы применения в дальнейшем исследовании структур слабо о-минимального типа. Кроме того, предложенные подходы могут быть использованы для сопоставления с более общими классами теорий.

Ключевые слова: слабо о-минимальные теории, слабая ортогональность, почти ортогональность, выпуклое множество, квазиодионочный тип, квазирациональный тип, иррациональный тип.

^{1,2,3}**Baizhanov B.,**

Dr.Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0002-3743-7404,

e-mail: baizhanov@math.kz

^{1,2,3}***Tazabekova N.,**

PhD candidate, ORCID ID: 0009-0005-3608-9259,

*e-mail: tazabekova.nargiz@gmail.com

¹**Zambarnaya T.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7203-1701,

e-mail: zambarnaya@math.kz

¹ Institute of mathematics and mathematical modeling, Almaty, Kazakhstan

² Kazakh British Technical University, Almaty, Kazakhstan

³ SDU University, Kaskelen, Kazakhstan

NEIGHBORHOODS IN WEAKLY ORDERED MINIMAL THEORIES

Abstract

This paper studies neighborhoods, weak orthogonality, and almost orthogonality of complete non-algebraic 1-types in weakly ordered minimal (weakly o-minimal) theories. A neighborhood is introduced as a tool to describe the local properties of type realizations and to generalize the notion of algebraic closure within a type. Their use allows us to distinguish between types and to refine the structure of their interaction. We formulate and prove the main properties of neighborhoods. In particular, it was established that $\alpha \in V_p(\beta) \Leftrightarrow \beta \in V_p(\alpha)$. On the basis of these results, we investigate the relationships between weak and almost orthogonality of types. In particular, we obtain criteria describing their equivalence, symmetry, and behavior for various classes of types (irrational, quasisolitary, and quasirational). Thus, the paper contributes to clarifying and developing the concepts of orthogonality in weakly o-minimal theories. It is also shown that for certain classes of weakly o-minimal theories, weak and almost orthogonality coincide. The results obtained provide new tools for analyzing the geometry of types in weakly o-minimal theories and open perspectives for further research on structures of weakly o-minimal type. In addition, the proposed approaches can be used for comparison with more general classes of theories.

Keywords: weakly o-minimal theories, weak orthogonality, almost orthogonality, convex set, quasisolitary type, quasirational type, irrational type.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 23.08.2025

**ФИЗИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
PHYSICAL SCIENCES
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ**

UDC 53.03
IRSTI 29.03.45

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-280-289>

¹Muratov M.M.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-7270-9834,
e-mail: mukhit.muratov@gmail.com

²Zaitsev S.I.,

Dr.Phys.-Math.Sc., Professor, ORCID ID: 0000-0001-5120-8651,
e-mail: bachokg@gmail.com

¹Pshikov M.I.,

PhD, Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0002-6602-0018,
e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com

¹Guseinov N.R.,

Master's degree, ORCID ID: 0000-0003-4804-5323,
e-mail: solar_neo@mail.ru

¹Nemkayeva R.R.,

Master's degree, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X,
e-mail: quasisensus@mail.ru

¹Mukhametkarimov Ye. S.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,
e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

¹Tolepov Zh.K.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434,
e-mail: mr.tolepov@mail.ru

^{1*}Akhmetsadyk D.S.,

PhD student, ORCID ID: 0000-0003-2138-3314,
e-mail: d.akhmetsadyk@gmail.com

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS,
142432 Chernogolovka, Moscow region, Russia

**DETERMINATION OF RESIST CONTRAST IN ELECTRON
BEAM LITHOGRAPHY UNDER DEPTH-DEPENDENT
NONUNIFORM ENERGY DEPOSITION**

Abstract

The paper presents an analytical model for determining the resist contrast in electron lithography with nonuniform deposited energy over the depth, which is typical for low-energy electron exposure. In the classical

approach, the contrast is determined from the logarithmic dependence of the residual resist thickness on the exposure dose and assumes the homogeneity of the deposited energy over the layer depth, which leads to an overestimation of the contrast value in the presence of a gradient of the deposited energy. The proposed model takes into account the linear change in the energy profile in the resist, which is neglected in existing generally accepted model, thus allowing us to extract the "true" contrast value reflecting the resist properties under given development conditions. To validate the model, experiments were carried out with an ELP-20 resist 200 nm thick on silicon substrates at an electron beam energy of 5, 15 and 25 keV. Dose wedges were exposed for each energy, followed by development and topography analysis by atomic force microscopy. By fitting the model curves to the experimental dependence of the residual resist thickness on the exposure dose for each electron energy, the values of the contrast and the parameter characterizing the gradient of the deposited energy by depth were calculated. In this case, the contrast remains almost constant when varying the energy of incident electrons and has an average value of $\gamma = 1.67$. Thus, the increase in contrast with a decrease in the electron energy observed within the classical approach should be considered as an artifact of the model used. The proposed model is applicable for precision calibration of the processes of forming three-dimensional resist structures using the grayscale lithography.

Keywords: Electron beam lithography (EBL), Resist contrast, Nonuniform energy deposition, Analytical modeling, Grayscale lithography.

Introduction

Electron beam lithography is one of the most versatile and high-precision nanofabrication methods, widely used in such fields as micro- and nanoelectronics [1, 2], photonics [3] and plasmonics [4]. This method provides a resolution at the sub-10 nm level without the need for photomasks, which makes it an indispensable tool for creating integrated circuits [5], quantum devices [6] and nanostructures [7]. Despite its advantages, EBL has not received widespread use in mass production due to its relatively low productivity and high cost of equipment. However, it remains a key technology for prototyping [8], preparing samples for academic research [9], creating templates used in photolithography [10] and nanoimprint lithography [11]. Recently, special attention has been paid to the possibilities of three-dimensional structuring realized using grayscale EBL [12], in which modulation of the exposure dose allows the formation of continuous reliefs in the resist. This approach opens up prospects for the creation of complex phase plates [13, 14], photonic nanostructures and other functional 3D structures with micro- and nanometer accuracy [12, 15]. The implementation of such processes directly depends on the lithographic properties of the resists used, in particular their sensitivity and contrast, which are fundamental parameters determining the accuracy of creating a given profile, as well as the efficiency and resolution of the EBL processes. The sensitivity of the resist in EBL, determined by the minimum exposure dose required to completely remove the layer in a given development time, depends on the chemical composition of the resist, its molecular structure, layer thickness, incident electron energy and development time. In this case, a decrease in the incident electron energy, as a rule, leads to an increase in the sensitivity of the resist, which makes the low-energy EBL region (5–15 keV) especially attractive in terms of increasing the productivity of the process. This is due to the general physical principle: as the energy decreases, the interaction intensity increases. During exposure, the energy of penetrating electrons is spent on breaking molecular chains in the polymer matrix, which determines the rate of dissolution of the exposed resist in the developer. The resist contrast, reflecting the steepness of the transition from the undeveloped to the developed state, is determined not only by the molecular properties of the resist, but also by the exposure and development conditions, which significantly affect the clarity of the relief and the quality of the resulting structures. Knowledge of both parameters is critically important for both classical binary and grayscale EBL, especially when creating three-dimensional structures with high accuracy [16, 17]. It is generally accepted that under fixed conditions of resist formation and development, its contrast remains a value that does not depend on the energy of incident electrons. At the same time, the existing method for determining the resist contrast is to estimate the slope of the contrast curve [18] (the dependence of the residual resist thickness on the logarithm of the exposure dose). This approach is based on the assumption that the rate of resist dissolution is determined by the exposure dose according to a power law:

$$V \propto D^\gamma \quad (1)$$

where γ corresponds to the resist contrast. This is true in the case of electron exposure, when the penetration depth of the electron beam significantly exceeds the resist layer thickness, and the deposited energy is uniform across the resist thickness [16–19]. And since in real conditions there is always, albeit not always pronounced, a gradient of the deposited energy across the resist thickness, the determined contrast can be considered only a more or less effective estimate [20, 21]. However, at relatively low electron energies (5–15 keV) and films with a thickness of about 200 nm and higher, this assumption ceases to be valid, since the energy is deposited extremely nonuniformly across the layer thickness. This is due to a decrease in the penetration depth of electrons into the material and, thus, a shift in the maximum density of the absorbed energy to the surface, which leads to the formation of a pronounced gradient across the resist depth. As a result, such inhomogeneity leads to a significant distortion of the dose curve and, consequently, to a deviation of the measured contrast from the "true" value. At the same time, it is known from the results of numerical modeling of energy profiles using the Monte Carlo method that the growth of the deposited energy with depth can be approximated with good accuracy by a linear law [22, 23]. Based on this, relying on the existing development model and the results of Monte Carlo modeling, this paper proposes an analytical model for determining the "true" contrast of the electron resist under low-energy electron lithography conditions. The model is based on the assumption of a linear profile of the deposited energy with depth, which allows adjusting the contrast calculation taking into account the inhomogeneity of energy deposition with depth. This ensures obtaining a contrast value independent of the exposure conditions: electron energy and substrate material. This eliminates the contradiction between the overestimated contrast values obtained by the classical method and the "true" behavior of the resist, determined by its own properties under specific development conditions. The model also contains a parameter determined as a result of fitting, which characterizes the dose gradient by depth, i.e. the sensitivity of the dissolution rate to the inhomogeneity of the deposited energy. This parameter has both practical significance for optimizing development modes and scientific significance. The aim of this work is to develop a physically justified method for evaluating resist contrast that accounts for depth-dependent nonuniform energy deposition, thereby enabling the determination of the intrinsic ("true") contrast of the resist, as opposed to the conventionally defined effective contrast.

Materials and methods

The substrate was a square of $\sim 25 \times 25$ mm², cut with a diamond cutter from a standard silicon wafer of 100 mm diameter (orientation (111), n-type, thickness 500 μ m, specific resistance 1–10 Ohm cm). Before use, it was cleaned in an ultrasonic bath: successively in acetone (purity 99.99%) and isopropyl alcohol (purity 99.8%), 10 minutes in each solution. The final stage of preparation was annealing at 200 °C for 5 minutes. The commercial positive resist ELP-20, intended for electron-beam lithography (JSC "NIOPIK"), was used as an electron-sensitive material, applied in the form of a 6% solution in chlorobenzene. The resist with a thickness of 200 nm was applied to the substrate by spin coating using an INSTRAS SCIENTIFIC spin coater in two stages: preliminary droplet spreading at 500 rpm for 5 seconds, followed by the main spin process at 3500 rpm for 60 seconds. After application, the resist films were subjected to heat treatment on a hot plate (FOUR E'S SCIENTIFIC) at 180 °C for 15 minutes to remove residual solvent and impart the required hardness. Exposure of the resist with electrons was carried out on the basis of a Quanta 3D 200i (FEI company) scanning electron microscope under the control of the NanoMaker hardware and software complex, in the software environment of which structures were created and data for exposure were prepared. For the study of the resist sensitivity and contrast, a "dose wedge" test structure was used. It consisted of a sequential array of identical rectangles, each measuring 20×4 μ m, with a total structure length of 84 μ m. The exposure dose increased linearly from left to right along the wedge with a specified step within the required range. This approach made it possible to evaluate the dependence of the resist development on the received dose. Exposure was carried out at accelerating voltages of 5, 15, and 25 keV. After exposure, the samples were developed in a mixture of methyl isobutyl ketone (MIBK,

purity 99.0%) and isopropyl alcohol (IPA, purity 99.8%) in a ratio of 1:3 at a temperature of 25 °C for 20 seconds. Development was stopped by rinsing in deionized water for 5–10 seconds. The thickness of the resist film and the topography of the fabricated structures were studied by atomic force microscopy using a combined AFM-Raman Solver Spectrum system (NT-MDT, Russia) in the semi-contact scanning mode at a speed of 0.1 Hz to follow sharp thickness steps. NSG01 cantilevers from TipsNano with a tip curvature radius of less than 10 nm (resonance frequency ~170 kHz, typical stiffness 1.45–15.1 N/m) were used. Initial AFM scans with a typical scan area of $95 \times 95 \mu\text{m}$ were processed in specialized Nova Px software, with data averaging performed over 10 profiles, and height profiles were constructed based on the processed data.

Proposed Method for Resist Contrast Determination

In positive resists, the primary mechanism responsible for the difference in solubility between exposed and unexposed regions is the radiation-induced scission of polymer chains [24, 25]. Irradiated chains, having a lower molecular weight, are less entangled and, accordingly, dissolve faster than unirradiated ones. The dependence of the dissolution rate V on the molecular weight M is described by a power law [25–28]:

$$V = cM^{-\gamma} \quad (2)$$

where c is a coefficient reflecting the amount of substance, and γ is the contrast [18]. The molecular weight M of the irradiated resist is inversely proportional to the average number of breaks in the polymer chain [29] and, therefore, is inversely proportional to the density of absorbed energy. This allows us to establish a relationship between the dissolution rate and the density of absorbed energy (ε):

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{\gamma} \quad (3)$$

When measuring the contrast curve, relatively large (compared to the beam size) areas of the resist are exposed uniformly, then the etch depth is measured for each area at a given dose. Thus, the absorbed energy density can be considered as dependent only on the depth z and related to the exposure dose D by the expression:

$$\varepsilon(z) = \frac{D}{q} E_b \varepsilon_p(z) \quad (4)$$

where q is the electron charge, E_b is the electron energy, $\varepsilon_p(z)$ is the fraction of energy absorbed at depth z . The expression describing the fraction of deposited energy as a function of the resist depth during electron exposure was proposed based on the analysis of numerical modeling data presented in [22, 23], and has the following analytical form:

$$\varepsilon_p(z) = A(1 + az) \quad (5)$$

where a is a parameter that depends on the accelerating voltage and the nature of the substrate; A is the normalization coefficient.

The model based on equations (3)–(5) allows us to derive the dependence of the resist development depth h on the exposure dose D from the equation:

$$\int_0^{h(D)} \frac{dz}{(1+az)^{\gamma}} = \text{const}(D)^{\gamma} \quad (6)$$

Here const is a combination of the constants V_0 , ε_0 and A . In practice, however, it is more convenient to use not the absolute etching depth, but the normalized remaining resist thickness $H(D)$, defined as:

$$H(D) = 1 - \frac{h(D)}{h_0} \quad (7)$$

where h_0 is the initial resist thickness; for the full development (etching) of this thickness to the substrate, an exposure dose of D_0 is required. The contrast γ and the parameter a are restored by numerically fitting the theoretical dependence (7) to the experimental curve $H_{\text{exp}}(D)$, measured using atomic force microscopy.

Results and discussion

Figure 1 shows the experimental dose dependences of the ELP-20 resist thickness at different electron energies. The resist thickness is shown in relative units, and the dose axis is presented in a logarithmic scale. As can be seen from the presented data, with an increase in the electron energy, an increase in the dose required for complete development of the resist to the substrate is observed, since the value of this dose is determined by the specific energy losses of electrons in the material, described by the Bethe equation. In the energy range of 5–25 keV, and for a sufficiently thin resist, the specific energy losses of electrons in the resist can be considered inversely proportional to the energy of incident electrons – $dE/dx \propto 1/E$. In this case, the dose required to develop the resist to the substrate increases proportionally to the energy $D_0 \propto E$. This explains the quasi-linear increase in the dose D_0 with increasing electron energy observed in the experiment: at high energies, electrons lose less energy in the resist per unit length and penetrate deeper, which requires a higher dose to achieve an equivalent level of change as under low-energy conditions. The corresponding values of D_0 for different electron energies are given in Table 1.

The contrast calculation performed using the classical model according to [18, 27] is based on a quantitative analysis of the slope of the linear region of the dose curve on a logarithmic scale. The contrast γ^* is defined as:

$$\gamma^* = \text{tg}(\theta^*) = \left| \frac{d(h/h_0)}{d \log_{10}(D/D_0)} \right| \quad (8)$$

where h is the residual resist thickness, h_0 is the initial thickness, D is the dose, D_0 is the dose required to develop the resist to the substrate (sensitivity). The contrast γ is related to γ^* by the relation $\gamma = \gamma^* / \ln(10)$; the corresponding values are given in Table 1. As can be seen from the presented data, the contrast value increases with decreasing incident electron energy. Since all dose wedges were formed on the same substrate and developed under identical conditions, with the exception of the electron energy of the exposure beam, differences in the measured contrast values can be due to a change in the nature of energy deposition across the resist depth. Since the calculations were performed assuming a uniform energy distribution across the layer thickness, the obtained contrast values should be interpreted as effective, reflecting the combined effect of the dose gradient in the resist. Then, the contrast curves were fitted to the experimentally obtained dependences of the residual thickness on the exposure dose for different electron energies in accordance with formula (7). In addition to the contrast, the parameter a served as a fitting parameter. The fitting was performed individually for each energy, and in all cases the value of the determination coefficient R^2 (quantifying the fraction of the experimental data variance accounted for by the model) exceeded 0.97. The results of fitting the model curve to the experimental dependence of the residual resist thickness on the dose for different electron energies are given in Table 1. As can be seen, the calculations performed on the basis of the proposed model give an average contrast value of $\gamma = 1.67$. In addition, at high energies of incident electrons, the contrast values obtained both in the classical approximation and within the framework of the proposed model converge to the same limiting value.

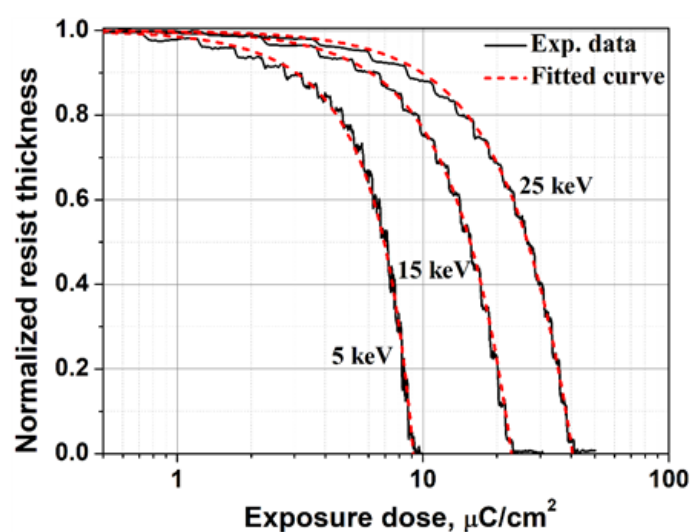


Figure 1 – Dependence of the residual thickness of ELP-20 resist on the exposure dose at electron energies of 5, 15, and 25 keV. The model curves were obtained by parametric fitting to the experimental data using the proposed approach

Table 1 – Lithographic parameters of the ELP-20 resist determined as a function of electron energy. For comparison, the values calculated using the classical model (γ_{eff}) and the model proposed in this work (γ) are presented

Lithographic parameters	Electron beam energy (in keV)		
	5	15	25
$D_0, \mu\text{C}/\text{cm}^2$	9.1	22.8	41.2
γ_{eff}	2.61	1.85	1.65
γ	1.69	1.65	1.67
$a, (10^{-3} \text{ nm}^{-1})$	3.55	0.45	0.10

The behavior of the parameter a , which characterizes the gradient of the deposited energy, deserves special attention in Table 1. Its sharp decrease with increasing energy (from $3.55 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$ at 5 keV to $0.10 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$ at 25 keV) reflects a physically justified weakening of the inhomogeneity of the energy profile. This behavior is generally consistent with the calculations performed by the Monte Carlo method in [22, 23] and indicates an increase in the density of the deposited energy from the surface to the substrate, which is especially pronounced with a decrease in the electron beam energy. The exact degree of agreement depends on the chosen calculation model, including the description of the braking and the parameters of the interaction of electrons with matter. For the case of 5 keV energy and resist thickness $h_0 = 200 \text{ nm}$, with gradient coefficient $a = 3.55 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$, the value of the product $ah_0 \approx 0.71$, according to expression (5), ah_0 shows a pronounced increase in the deposited dose from the surface to the substrate and the ratio of the absorbed energy values at $z=0$ and $z=h_0$ is 1.71. In contrast, at 25 keV energy, the value $ah_0 \approx 0.02$, which indicates a virtually uniform dose distribution across the layer thickness. Thus, the introduced parameter a has not only an adjustable meaning, but also a physical interpretation, characterizing the degree of exposure inhomogeneity.

Conclusion

A 200 nm thick ELP-20 resist layer on a silicon substrate was exposed using low-energy electrons in the range of 5–25 keV. The deposited dose distribution was modeled using a semi-analytical approach, assuming a linear increase in absorbed energy density with depth, which is consistent with Monte Carlo simulation results. The resist contrast was determined by numerically fitting the development depth as a function of dose, taking into account the dose gradient characterized by the parameter a . This approach eliminates the contrast overestimation inherent in the classical model, which assumes uniform energy deposition. It was shown that the true resist contrast remains nearly constant with varying energy $\gamma \approx 1.67$, whereas the effective contrast γ_{eff} increases from 1.65 to 2.61 as the energy decreases, due to the nonuniform dose distribution. The dose required for complete development increases quasi-linear from 9.1 to 41.2 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$, in accordance with the dependence $-dE/dx \propto 1/E$. The parameter a , reflecting the degree of the dose gradient, decreases from 3.55×10^{-3} to $0.10 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$ with increasing energy, indicating a reduction in the inhomogeneity of the deposition profile. The developed model is a physically grounded method for contrast determination, suitable for three-dimensional resist structuring using grayscale lithography. It eliminates the influence of exposure parameters and substrate properties, extends the classical approach to contrast evaluation, and is easily integrated into standard dose-response analysis techniques.

Acknowledgments

This research was carried out with financial support from the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19576960).

REFERENCES

- 1 Flodgren, V., Das, A., Sestoft, J.E., Löfström, N., Alcer, D., Jeddi, H., Borgström, M.T., Pettersson, H., Nygård J. and Mikkelsen A. Flexible fabrication of aligned multi-nanowire circuits for on-chip prototyping. *Microelectronic Engineering*, 300, article 112363 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.mee.2025.112363>.
- 2 Pan, Y. and Xu, K. Recent progress in nano-electronic devices based on EBL and IBL. *Current Nanoscience*, 16 (2), 157–169 (2020). <https://doi.org/10.2174/1573413715666190701111638>.
- 3 Sahoo, P.K., Coates, E., Silver, C.D., Li, K., and Krauss, T.F. On the reproducibility of electron-beam lithographic fabrication of photonic nanostructures. *Scientific Reports*, 14, article 8703 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58842-w>.
- 4 Chen, Y., Zhang, H., Zhang, Z., Zhu, X., and Fang, Z. Dual views of plasmonics: from near-field optics to electron nanoscopy. *Photonics Insights*, 4 (2), article R04 (2025). <https://doi.org/10.3788/PI.2025.R04>.
- 5 Bakar, R.A., Hassan, H., and Herman, S.H. Patterning of monolithic integrated circuit using electron beam lithography. *Proc. of the 2023 IEEE 13th International Conf. on System Engineering and Technology (ICSET)*, (Shah Alam, Malaysia, 2 October, 2023), pp. 319–323. <https://doi.org/10.1109/ICSET59111.2023.10295127>.
- 6 Ko, T., Kumar, S., Shin, S., Seo, D., and Seo, S. Colloidal quantum dot nanolithography: direct patterning via electron beam lithography. *Nanomaterials*, 13 (14), article 2111 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13142111>.
- 7 Chen, Y. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: a review. *Microelectronic Engineering*, 135, 57–72 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.mee.2015.02.042>.
- 8 Yasar, F., Muller, R.E., Khoshakhlagh, A., and Keo, S.A. Large-area fabrication of nanometer-scale features on GaN using e-beam lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 42, article 022801 (2024). <https://doi.org/10.1116/6.0003270>.
- 9 Zheng, X., Calò, A., Albisetti, E., et al. Patterning metal contacts on monolayer MoS_2 with vanishing Schottky barriers using thermal nanolithography. *Nature Electronics*, 2, 17–25 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0191-0>.

- 10 Hudek, P., Jurkovic, M., Choleva, P., Wroczewski, W., Hashimoto, M., Ono, K., Fukui, T., Takahashi, T., and Takahashi, K. Multi-beam mask writer exposure optimization for EUV mask stacks. *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology*, 20 (4), article 041402 (2021). <https://doi.org/10.1117/1.JMM.20.4.041402>.
- 11 Baracu, A.M., Avram, M.A., Breazu, C., Bunea, M.-C., Socol, M., Stanculescu, A., Matei, E., Thrane, P.C.V., Dirdal, C.A., Dinescu A. and Rasoga O. Silicon metalens fabrication from electron beam to UV-nanoimprint lithography. *Nanomaterials*, 11 (9), article 2329 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11092329>.
- 12 Khonina, S.N., Kazanskiy, N.L., and Butt, M.A. Grayscale lithography and a brief introduction to other widely used lithographic methods: a state-of-the-art review. *Micromachines*, 15 (11), article 1321 (2024). <https://doi.org/10.3390/mi15111321>.
- 13 Massari, M., Ruffato, G., Gintoli, M., Ricci, F., and Romanato, F. Fabrication and characterization of high-quality spiral phase plates for optical applications. *Applied Optics*, 54 (13), 4077–4083 (2015). <https://doi.org/10.1364/AO.54.004077>.
- 14 Grushina, A. Direct-write grayscale lithography. *Advanced Optical Technologies*, 8 (3–4), 163–169 (2019). <https://doi.org/10.1515/aot-2019-0024>.
- 15 Li, K., Li, J., Reardon, C., Schuster, C.S., Wang, Y., Triggs, G.J., Damnik, N., Muenchenberger, J., Wang, X., Martins, E.R., and Krauss, T.F. High speed e-beam writing for large area photonic nanostructures – a choice of parameters. *Scientific Reports*, 6, article 32945 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep32945>.
- 16 Zaitsev, S., Knyazev, M., Dubonos, S., and Bazhenov, A. Fabrication of 3D photonic structures. *Microelectronic Engineering*, 73–74, 383–387 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.mee.2004.02.074>.
- 17 Svintsov, A.A., Knyazev, M.A., and Zaitsev, S.I. Calculation of the absorbed electron energy 3D distribution by the Monte Carlo method, presentation of the proximity function by three parameters α , β , η and comparison with the experiment. *Materials*, 15, article 3888 (2022). <https://doi.org/10.3390/mi14112060>.
- 18 Knyazev, M.A., Dubonos, S.V., Svintsov, A.A., and Zaitsev, S.I. Fast electron resist contrast determination by “fitting before measurement” approach. *Microelectronic Engineering*, 84 (5–8), 1080–1083 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.145>.
- 19 Myrzabekova, M.M., Guseinov, N.R., Zaitsev, S.I., Shabelnikova, Ya.L., Muratov, M.M., Muradova, S.R., and Turarbaeva, T.B. Study of the electron lithography parameters by AFM. *Recent Contributions to Physics*, 68 (1), 81–90 (2019). <https://doi.org/10.26577/RCPh-2019-1-1112>.
- 20 Gangnaik, A.S., Georgiev, Y.M., and Holmes, J.D. New Generation Electron Beam Resists: A Review. *Chemistry of Materials*, 29 (5) (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b03483>.
- 21 Jin, Y., Moreno, M., Vianez, P.M.T., Tan, W.K., Griffiths, J.P., Farrer, I., Ritchie, D.A., and Ford, C.J.B. Microscopic metallic air-bridge arrays for connecting quantum devices. *Applied Physics Letters*, 118, article 162108 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0045557>.
- 22 Rogozhin, A.E., and Sidorov, F.A. E-beam lithography simulation techniques. *Russian Microelectronics*, 49 (2), 108–122 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1063739720010096>.
- 23 Tabata, T. Theoretical evaluation of absorbed doses in materials irradiated by low-energy electron beams: a short review. *Bulletin of University of Osaka Prefecture, Series A*, 44 (1), 41–46 (1995). <https://doi.org/10.24729/00008333>.
- 24 Ed. P.W. Hawkes, *Advances in Imaging and Electron Physics* (Academic Press, 1998).
- 25 Ed. P. Rai-Choudhury, *Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication*, Chapter 2 (SPIE, 1997).
- 26 Asmussen, F., and Ueberreiter, K. Velocity of dissolution of polymers. Part II. *Journal of Polymer Science*, 57, 199–208 (1962). <https://doi.org/10.1002/pol.1962.1205716516>.
- 27 Bernstein, G.H., Hill, D.A., and Liu, W.-P. New high-contrast developers for poly(methyl methacrylate) resist. *Journal of Applied Physics*, 71, 4066–4075 (1992). <https://doi.org/10.1063/1.350831>.
- 28 Moreau, W.M. *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials* (Springer Science & Business Media, 2012).
- 29 Moreau, W.M. *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials*, part II (Mir, 1990, in Russ.).

¹Муратов М.М.,

PhD, қауымдастырылған профессор, доцент, ORCID ID: 0000-0001-7270-9834,

e-mail: mukhit.muratov@gmail.com

²Зайцев С.И.,

ф.-м.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0000-0001-5120-8651,

e-mail: bachokg@gmail.com

¹Пшиков М.И.,

PhD, ассистент-профессор, ORCID ID: 0000-0002-6602-0018,

e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com

¹Гусейнов Н.Р.,

магистр, ORCID ID: 0000-0003-4804-5323,

e-mail: solar_neo@mail.ru

¹Немкаева Р.Р.,

магистр, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X,

e-mail: quasisensus@mail.ru

¹Мухаметкаримов Е.С.,

PhD, қауымдастырылған профессор, доцент, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,

e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

¹Төлепов Ж.Қ.,

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434,

e-mail: mr.tolepov@mail.ru

^{1*}Ахметсадық Д.С.,

докторант, ORCID ID: 0000-0003-2138-3314,

*e-mail: d.akhmetsadyk@gmail.com

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан²Микроэлектроника технологиясы және жоғары тазалықтағы материалдар институты РФА,
Черноголовка, Мәскеу облысы, Ресей

ТЕРЕҢДІК БОЙЫМЕН ЭНЕРГИЯНЫҢ БІРКЕЛКІ БӨЛІНБЕУІ ЖАҒДАЙЫНДА ЭЛЕКТРОНДЫ-СӘУЛЕЛІК ЛИТОГРАФИЯДАҒЫ РЕЗИСТ КОНТРАСТЫН АНЫҚТАУ

Аңдатпа

Бұл жұмыста төмен энергиялы электрондық сәулемен экспонирлеу кезінде тереңдік бойымен энергияның біркелкі емес тұнуына тән жағдайларда резистің контрастын анықтауға арналған аналитикалық модель ұсынылған. Классикалық әдісте контраст экспонирлеу дозасына қатысты резистің қалдық қалыңдығының логарифмдік тәуелділігі арқылы анықталады және энергияның қабат тереңдігі бойынша біркелкі тұнады деп қарастырылады, бұл энергияның градиенті болған жағдайда контраст мәнін асыра бағалауға әкеледі. Ұсынылған модель резистегі энергия профилінің сызықты өзгерісін ескеруге мүмкіндік береді, осылайша берілген өңдеу жағдайларында резистің шынайы қасиеттерін бейнелейтін «нақты» контраст мәнін алуға жол ашады. Модельді тексеру мақсатында 5, 15 және 25 кэВ энергиялы электрондар шоғырымен кремний төсеніштеріне отырғызылған 200 нм қалыңдықтағы ЭЛП-20 резисті сынақтан өткізілді. Әрбір энергия үшін дозалық сынақтар экспонирленіп, кейін өңделіп, топографиясы атомдық-күштік микроскопия әдісімен зерттелді. Резистің қалдық қалыңдығының дозаға тәуелді эксперименттік деректеріне модельдік қисықтарды сәйкестендіру арқылы әрбір энергия үшін контраст мәндері және тереңдік бойымен энергия тұну градиентін сипаттайтын параметр есептелді. Нәтижесінде, электрондар энергиясы өзгергенімен контраст шамамен тұрақты болып қалып, орташа мәні $\gamma = 1.67$ болды. Осылайша, классикалық әдіс бойынша энергия төмендеген сайын байқалатын контрастың артуы модель артефактісі ретінде қарастырылуы тиіс. Ұсынылған модель сұр ренді литография әдісімен үш өлшемді резистік құрылымдарды дәл қалыптастыру процестерін калибрлеу үшін қолдануға жарамды.

Тірек сөздер: электронды-сәулелік литография, резист контрасты, тереңдік бойымен энергияның біркелкі емес тұнуы, аналитикалық модель, сұр ренді литография.

¹**Муратов М.М.,**

PhD, ассоциированный профессор, доцент, ORCID ID: 0000-0001-7270-9834,
e-mail: mukhit.muratov@gmail.com

²**Зайцев С.И.,**

д.ф.-м.н., профессор, ORCID ID: 0000-0001-5120-8651,
e-mail: bachokg@gmail.com

¹**Пшиков М.И.,**

PhD, ассистент-профессор, ORCID ID: 0000-0002-6602-0018,
e-mail: mustahim.pshikov@gmail.com

¹**Гусейнов Н.Р.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0003-4804-5323,
e-mail: solar_neo@mail.ru

¹**Немкаева Р.Р.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X,
e-mail: quasisensus@mail.ru

¹**Мухаметкаримов Е.С.,**

PhD, ассоциированный профессор, доцент, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,
e-mail: m.c.erzhan@mail.ru

¹**Толепов Ж.К.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0001-7895-0434,
e-mail: mr.tolepov@mail.ru

^{1*}**Ахметсадык Д.С.,**

докторант, ORCID ID: 0000-0003-2138-3314,
*e-mail: d.akhmetsadyk@gmail.com

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
г. Черноголовка, Московская область, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТРАСТА РЕЗИСТА В ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ ПРИ НЕОДНОРОДНО ОСАЖДЕННОЙ ЭНЕРГИИ ПО ГЛУБИНЕ

Аннотация

В работе представлена аналитическая модель определения контраста резиста в электронной литографии при неоднородно осажденной энергии по глубине, что характерно для низкоэнергетического электронного экспонирования. В классическом подходе контраст определяется из логарифмической зависимости остаточной толщины резиста от дозы экспонирования и предполагает однородность осажденной энергии по глубине слоя, что приводит к переоценке значения контраста при наличии градиента осажденной энергии. Предлагаемая модель учитывает в существующей модели линейное изменение энергетического профиля в резисте, позволяя извлечь «истинное» значение контраста, отражающее свойства резиста при заданных условиях проявления. Для валидации модели были проведены эксперименты с резистом ЭЛП-20 толщиной 200 нм на кремниевых подложках при энергии электронов в пучке 5, 15 и 25 кэВ. Дозовые клинья экспонировались для каждой энергии с последующим проявлением и анализом топографии методом атомно-силовой микроскопии. Путем подгонки модельных кривых к экспериментальной зависимости остаточной толщины резиста от дозы экспонирования для каждой энергии электронов были рассчитаны значения контраста и параметра, характеризующего градиент осажденной энергии по глубине. При этом контраст остается практически постоянным при варьировании энергии падающих электронов и имеет среднее значение $\gamma = 1.67$. Таким образом, увеличение контраста при уменьшении энергии электронов, наблюдаемое в рамках классического подхода, следует рассматривать как артефакт используемой модели. Предложенная модель применима для прецизионной калибровки процессов формирования трехмерных резистных структур методом литографии серого тона.

Ключевые слова: электронно-лучевая литография, контраст резиста, неоднородное осаждение энергии по глубине, аналитическая модель, литография серого тона.

Article submission date: 17.07.2025

UDC 539.215.9
IRSTI 29.19.31

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-290-301>

¹**Kadau A.T.,**

Master's degree, ORCID ID: 0009-0008-9714-0304,

e-mail: aidoskadau@gmail.com

^{1,2}**Kalkozova Zh.K.,**

Cand.Phys.-Math.Sc., Associate Professor, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,

e-mail: zhanar.kalkozova@kaznu.edu.kz

^{1,3*}**Gritsenko L.V.,**

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0003-0726-1118,

*e-mail: l.gritsenko@satbayev.university

^{1,2}**Markhabayeva A.A.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,

e-mail: aiko.marx87@gmail.com

^{1,2}**Abdullin Kh.A.,**

Dr.Phys.-Math.Sc., Professor, ORCID ID: 0000-0002-2729-2272,

e-mail: kh.abdullin@physics.kz

¹Institute of Applied Science & Information Technology, Almaty, Kazakhstan

²National nanotechnology laboratory of open type (NNLOT),

Al-Farabi Kazakh National university, Almaty, Kazakhstan

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

INFLUENCE OF PARAMETERS OF LOW-COST SYNTHESIS METHODS ON ZINC OXIDE MORPHOLOGY

Abstract

The morphology of zinc oxide (ZnO) powders synthesised via a modified microwave assisted method under varying heating parameters, as well as by chemical bath deposition, was investigated. Image analysis revealed clear correlations between synthesis parameters and structural features. Increasing the microwave heating time at constant power led to a consistent transformation from loose nanoparticles to dense, well-faceted microstructures. In contrast, reducing heating power slowed crystallisation and agglomeration, preserving a finer, more porous structure. Scanning electron microscopy also demonstrated significant morphological differences in samples grown by chemical bath deposition, which were strongly influenced by the initial molar concentration of zinc acetate while keeping the concentrations of other solution components constant. These findings confirm that low-cost, environmentally friendly synthesis approaches can be used to control ZnO particle morphology through careful adjustment of precursor concentrations, heating time, and microwave power. Photocatalytic degradation tests of rhodamine B demonstrated a strong link between particle morphology and degradation rate. The highest rate ($\sim 0.5 \text{ h}^{-1}$) was recorded for a chemically precipitated sample, whereas the lowest ($\sim 0.1 \text{ h}^{-1}$) corresponded to a microwave-synthesised sample.

Keywords: zinc oxide, morphology, microwave assisted method, chemical bath deposition method, photocatalysis.

Introduction

Zinc oxide (ZnO) is a semiconductor material with a wide bandgap ($\sim 3.37 \text{ eV}$) that has attracted significant research interest owing to its unique optical, electronic, and catalytic properties [1–3]. Its high photostability, low toxicity, and relatively low cost make it suitable for a variety of applications, including solar cells, gas sensors, light-emitting diodes, and photocatalysis [4, 5]. One particularly

promising application is the degradation of organic dyes such as methylene blue, rhodamine B, and methyl orange and others, which are extensively used in the textile, paper, and food industries and pose serious environmental hazards when released into wastewater [6, 7].

The performance of a photocatalyst is largely determined by its morphology, particle size, and defect structure [8]. Recently, attention has shifted towards low-cost, energy-efficient methods for producing nanostructured ZnO, such as microwave synthesis and chemical bath deposition from aqueous solutions. These techniques allow precise control over morphology by varying parameters such as temperature, processing time, reagent concentrations, and pH [9, 10].

Microwave synthesis offers rapid, uniform heating, enabling the formation of finely dispersed, uniformly sized particles with high crystallinity [11]. It also minimises energy consumption and shortens processing time, making it a promising candidate for large-scale production [10, 11]. In comparison, the chemical bath deposition method is simple, cost-effective, and does not require sophisticated equipment [12, 13].

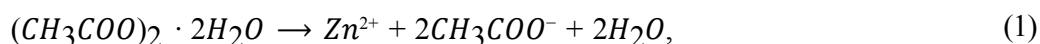
ZnO morphology directly influences photoinduced electron – hole pair generation and recombination [14, 15]. For example, nanorods and nanowires facilitate directional charge transport and reduce recombination rates, while porous and aggregated structures provide a high surface area for pollutant adsorption. Studies have shown that combining low-cost synthesis with surface modification can further enhance photocatalytic efficiency [16, 17].

Despite progress in the field, the influence of synthesis parameters, such as microwave irradiation power and duration, and solution composition and pH during precipitation on ZnO morphology and photocatalytic performance remains insufficiently explored. A systematic comparative study of these factors is needed.

This work presents a comparative analysis of ZnO samples synthesised by chemical bath deposition and microwave assisted methods under various conditions. It examines the effects of synthesis parameters on phase purity, texture, and crystallite size, and correlates these with photocatalytic activity in the degradation of rhodamine B.

Materials and methods

Two low-cost synthesis techniques were investigated: the chemical bath deposition method and a modified microwave assisted method. Both are attractive due to their accessibility, ease of implementation, and minimal equipment requirements. For the chemical bath deposition method, zinc acetate dihydrate ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich), sodium hydroxide (NaOH, Sigma-Aldrich), and the anionic surfactant sodium dodecyl sulfate ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$) were used. Three sample compositions were studied: sample #CD1 (0.2 M ZnAc_2 , 0.5 M NaOH and 10 mM surfactant), sample #CD2 (0.1 M ZnAc_2 , 0.5 M NaOH and 10 mM surfactant), sample #CD3 (0.075 M ZnAc_2 , 0.5 M NaOH and 10 mM surfactant). Zinc acetate was dissolved in 50 ml of distilled water and placed on a magnetic stirrer for homogenisation at 500 rpm without heating. Sodium hydroxide solution was prepared in the same way. NaOH was dissolved in 100 ml of distilled water and the solution was also stirred on a magnetic stirrer until complete homogenisation. During the stirring process, $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and NaOH dissociate into ions according to formulae (1) and (2). Free hydroxide ions (OH^-) appear in the solution and participate in the precipitation of $\text{Zn}(\text{OH})_2$. After both solutions became homogeneous they were mixed.

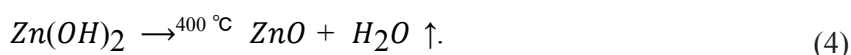


When solutions of zinc acetate and sodium hydroxide are mixed, zinc hydroxide precipitation reaction occurs according to formula (3)



$\text{Zn}(\text{OH})_2$ is a white precipitate insoluble in water. The reaction occurs at a pH greater than 7, which is ensured by the presence of NaOH. When surfactant is added to the solution, it adsorbs on the surface of zinc hydroxide, preventing agglomeration of particles in solution [18]. The resulting solution was left on a magnetic stirrer at room temperature for a day to achieve complete homogeneity of the solution.

The samples thus obtained were washed thoroughly with distilled water by centrifugation at 3000 rpm and dried in a desiccator at 100 °C for three hours followed by heat treatment in a muffle furnace at 400 °C for one hour. The drying leaves only a precipitate of $\text{Zn}(\text{OH})_2$, stabilised by surfactant. During the heat treatment, zinc hydroxide decomposes with the release of water (formula (4)) and pure ZnO powder is formed

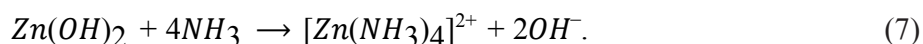
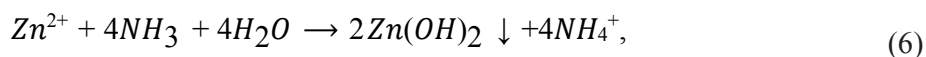


It should be noted that annealing improves crystallinity and removes residual organic impurities [19].

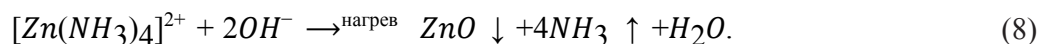
In the synthesis of ZnO by the modified microwave assisted method, 0.02 mol of zinc chloride (ZnCl_2 , Sigma Aldrich) were dissolved in 200 mL of distilled water and stirred at 700 rpm without heating until complete homogeneity. Zinc chloride dissociated into ions in water according to formula (5)



To the resulting solution, 30 ml of aqueous ammonia solution was added dropwise while still stirring the mixture. Immediately after addition, a white precipitate was formed. As addition proceeded, excess ammonia caused the precipitate to dissolve and an ammonia complex $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ was formed during reactions (6) and (7). Upon completion of the reactions, the solution became transparent.



The next step was microwave heating. The solutions were heated for 2.5 minutes at 350 W (sample #MW1), 5 minutes at 350 W (sample #MW2), 10 minutes at 350 W (sample #MW3), 15 minutes at 350 W (sample #MW4), 20 minutes at 350 W (sample #MW5), and 20 minutes at 70 W (sample #MW6) in an LG MS 1924x household microwave oven. Upon microwave heating of the tetraamminzinc solution $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ thermal decomposition of the complex occurs, accompanied by the release of ammonia and the formation of zinc oxide. The complex becomes unstable and decomposes into the ammonia gas phase, with zinc ions interacting with hydroxide ions to form an insoluble precipitate in the form of zinc oxide



After heating in microwave oven, the solution was cooled naturally at room temperature. After cooling, the solution was purified from impurities by centrifugation. In the last step, the solution was placed in a Petri dish and dried in a desiccator at 8°C.

Results and discussion

The morphological characteristics of the grown samples were examined using a Quanta 200i 3D electron scanning microscope (SEM) with a direct filament tungsten cathode (FEI, Hills Boro, Oregon, USA). This instrument provides images with a resolution of less than 2.5 nm and allows both qualitative and quantitative analyses of nanoscale structures. Figure 1 shows SEM images of the powders obtained by chemical bath deposition.

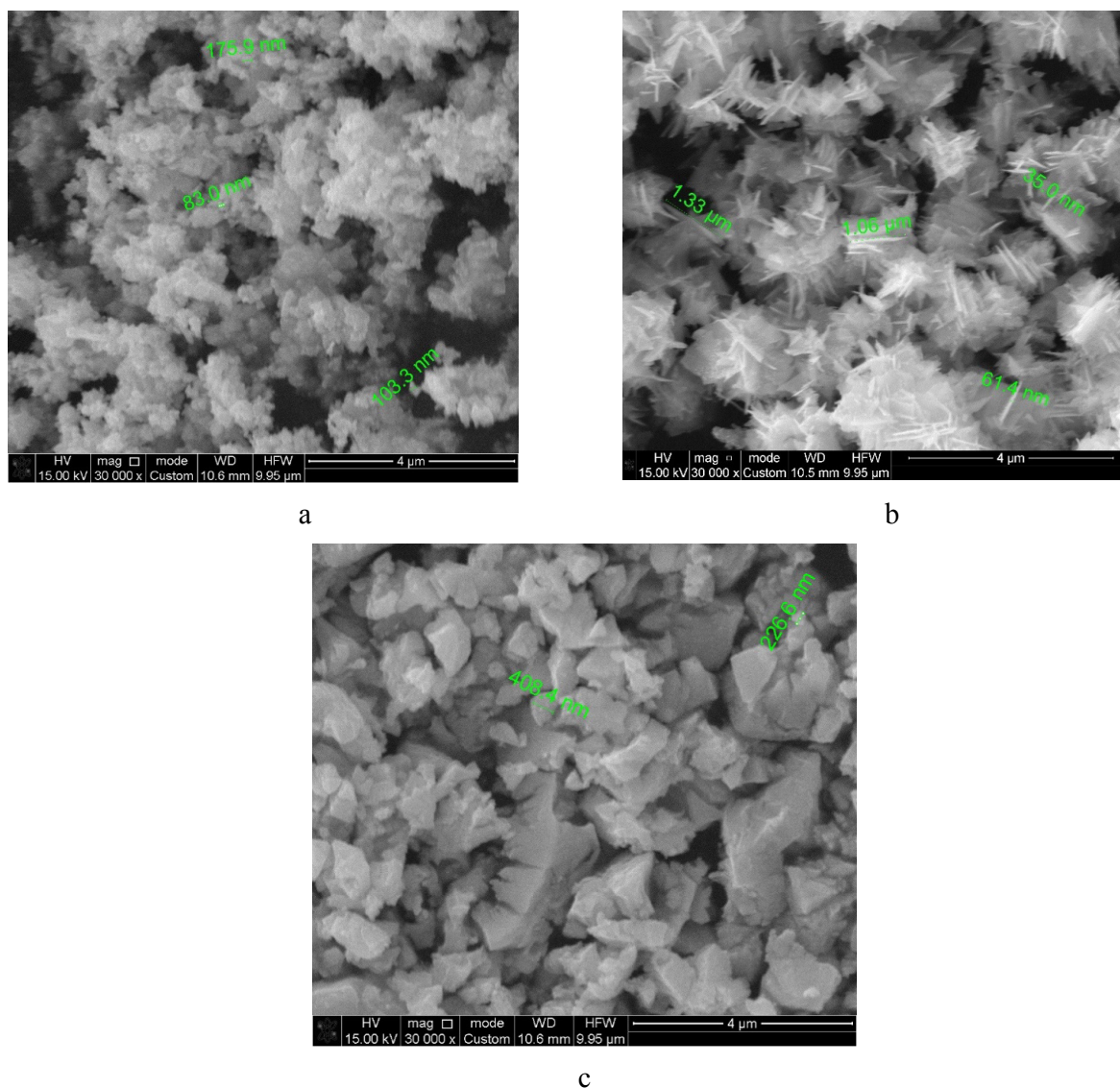


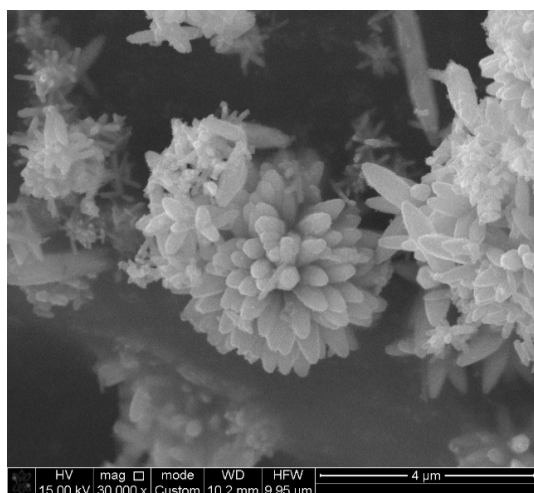
Figure 1 – SEM images of samples obtained by chemical deposition:
(a) sample #CD1, (b) sample #CD2, (c) sample #CD3

In Figure 1a, it is worth noting the polymorphic morphology including both quasi-spherical and polyhedral nanoparticles with characteristic sizes of 50–100 nm. This image shows a tendency towards agglomeration formation, with individual crystals exhibiting pronounced hexagonal symmetry, consistent with the wurtzite structure of ZnO. Of particular interest are the observed interparticle boundaries and in the form of cracks, which may be a consequence of capillary stresses arising during the sample drying process.

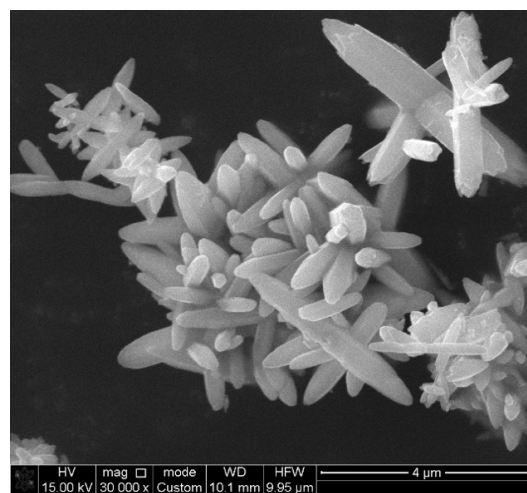
Figure 1b clearly shows highly anisotropic structures morphologically corresponding to nanowires or columnar crystals. The average diameter of these structures is 20–30 nm with lengths up to 500 nm. The directional growth mainly along the crystallographic axis [001] is a characteristic feature of the hexagonal modification of ZnO with high packing density. In Figure 1c it can be observed that the particles have irregular and angular shape with sharp edges, there are no pronounced crystals of hexagonal shape. Aggregates ranging in size from 200 nm to 1–2 μm can be seen. However, these aggregates are composed of smaller nanoparticles. This indicates secondary aggregation of small crystallites into larger structures. The particles are densely packed and a pronounced agglomeration characteristic of dry ZnO powders is observed. The surfaces of the particles appear rough and multifaceted, indicating the crystalline nature and good growth of individual facets. This may also be due to the formation of particles through nucleation and growth stages. The obtained morphological data are in agreement with literature data on characteristic shapes of ZnO nanocrystals, where the growth anisotropy is determined by differences in the surface energy of crystallographic planes of wurtzite structure [20].

Figure 2 shows SEM images of zinc oxide powders obtained by microwave assisted method at different synthesis parameters. It should be noted that the particles possess a flower-like morphology consisting of multiple elongated or lamellar crystallites with radial symmetry. This morphology is characteristic of self-organised nanostructures, often encountered in microwave synthesis, due to rapid heating and saturated growth of crystallites along certain crystallographic directions. The figures show that the size of a single “flower” varies between 2 and 5 μm . Individual elements within these aggregates - thin needle-like or lamellar crystals can vary from 100 to 500 nm in length and tens of nanometres in width. It should also be noted that the “flowers” are in close contact with each other, forming dense aggregations. Such agglomeration can be caused by the high surface energy of nanoparticles, rapid growth and deposition during microwave synthesis or the lack of stabilising agents.

It is noted that the sample #MW1 (Figure 2a) is characterised by the presence of predominantly spherical and weakly faceted nanoparticles of the order of 80–150 nm, forming loose agglomerates with high porosity. A short duration of heating leads to limited crystallite growth and partial preservation of amorphous sites, which in the long term can provide high specific surface area and activity of the material in adsorption and catalytic processes. Sample #MW2 (Figure 2b) contains particles with more pronounced hexagonal faceting characteristic of the wurtzite structure of ZnO. The crystallite size increases to 120–200 nm at a synthesis duration of 5 min, while particle agglomeration increases and porosity decreases.



a



b

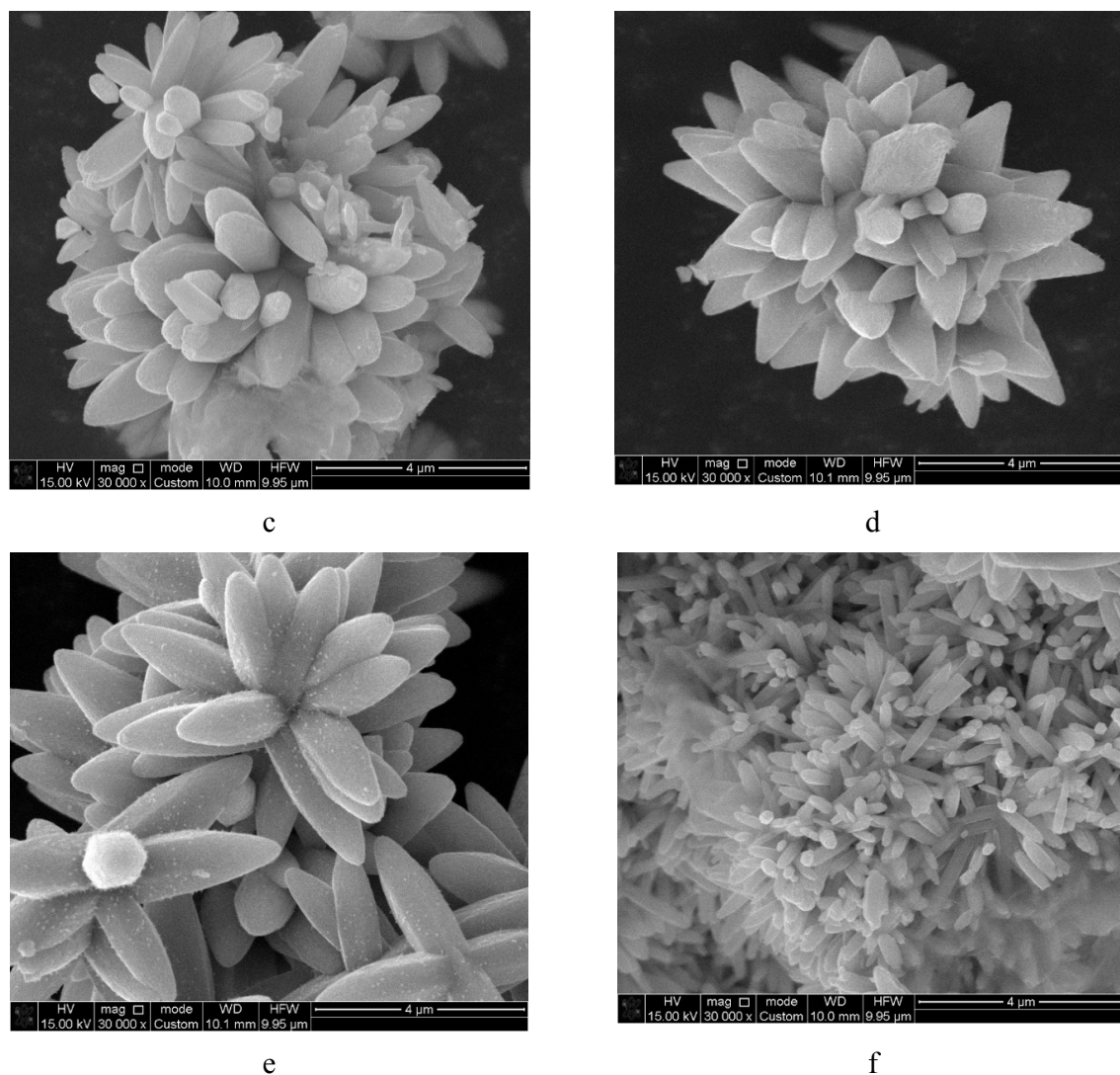


Figure 2 – SEM image of powder obtained by microwave assisted method at:
(a) sample #MW1, (b) sample #MW2, (c) sample #MW3, (d) sample #MW4,
(e) sample #MW5, (f) sample #MW6

The increase in the degree of crystallinity is due to more complete nucleation and growth processes at increasing microwave heating time. When the synthesis time is further increased up to 10 min, the formation of well-defined prismatic crystals of 200–300 nm length occurs (Figure 2c). In this case, the particles form dense aggregates, which indicates the activation of Ostwald ripening processes leading to crystallite enlargement and a decrease in specific surface area. In sample #MW4 (synthesis duration 15 min), well faceted prismatic and rod-like structures up to 500 nm in length were observed (Figure 2d). The high packing density and fusion of neighbouring particles in this sample indicate the predominance of directed crystal growth processes.

The morphology of sample #MW4 acquires features characteristic of evolved one-dimensional ZnO structures, which may be promising for optoelectronic and sensor applications. At the duration of microwave synthesis of zinc oxide of 20 min, the formation of elongated rod-shaped crystals of 0.5–1 μm length with smooth faces occurs (Figure 2e). Significant enlargement of particles and almost complete loss of porosity of this sample are due to the intensive growth of crystals under prolonged microwave exposure. These structures can provide high electron mobility, but their specific surface

area is significantly lower than that of samples with finer morphology. Reducing the power to 70 W allows crystals with lengths between 150 nm and 600 nm to be grown with a more reduced particle agglomeration (Figure 2f). The presence of interparticle voids indicates slower crystal growth and retention of an increased specific surface area, potentially enhancing the activity of the material in photocatalytic and sensing applications.

X-ray phase analysis of synthesised ZnO samples was performed on a Rigaku MiniFlex600 desktop X-ray diffractometer. Figure 3 shows the diffractograms of samples #CD1, #MW1 and #MW6. The analysis showed that all samples crystallise according to the hexagonal structure of wurtzite (card JCPDS 36-1451 — sample #CD1, card JCPDS 80-0075 — samples #MW1 and #MW6) with peaks characteristic of reflection planes (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201),

corresponding to the hexagonal structure of wurtzite [21]. All three samples contain only ZnO phases, indicating high phase purity. It was observed that the synthesis method influences the texturisation, crystallite size and intensity of the diffraction peaks. In particular, the #CD1 sample obtained by chemical bath deposition shows the highest texturisation along the (101) direction. Such texturing is characteristic of isometric or aggregated particles growing without directional external influence. At the same time, samples #MW1 and #MW6 obtained by microwave assisted method are characterised by a more isotropic distribution of orientations, which is characteristic of fast microwave synthesis, in which crystallisation occurs under conditions of uniform heating and short growth time. It is worth noting that the peak width at half width (FWHM) of these samples is almost the same despite different synthesis parameters, indicating that microwave exposure provides efficient and uniform heating, and the final structure is determined by nucleation kinetics rather than stress. At high power (sample #MW1), rapid nucleation of centres occurs, resulting in the formation of small crystallites. At low power but for a long time (sample #MW6) an increase in limited diffusion, which also does not lead to a significant increase in size.

The photocatalytic activity of the obtained zinc oxide powders was investigated on a Cary Series UV-NIR spectrophotometer.

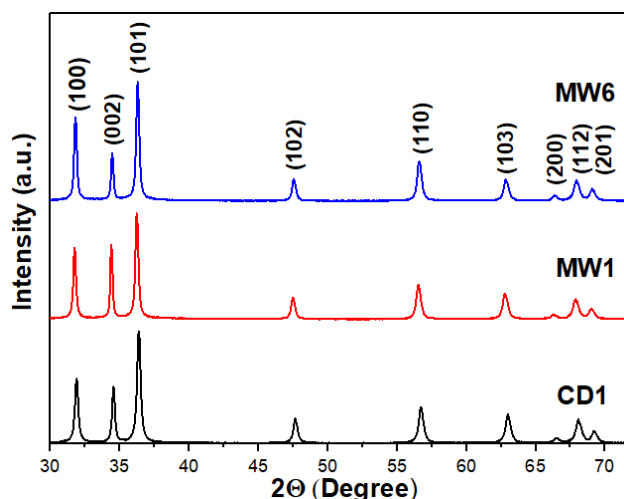


Figure 3 – X-ray diffraction patterns of synthesised ZnO samples #CD1, #MW1 and #MW6

For the analysis, rhodamine-B was used as a dye. For this purpose, 9 mg of the investigated ZnO sample was added to 112.5 mL of aqueous dye solution. Firstly, the dye and powder were mixed on a magnetic stirrer at 700 rpm, then to increase dispersion they were treated for 30 minutes in an ultrasonic bath PSB-12808-05 without heating to increase dispersion. Exposure was carried out using a quartz lamp with a sampling interval of 30 minutes. Figure 4 shows the change in optical density spectra with increasing exposure time for samples #CD2 (Figure 4a) and #MW5 (Figure 4b).

In Figure 4, it can be observed that the maximum absorption intensity is observed at a wavelength of 545 nm, which corresponds to the absorption peak of rhodamine-B. The relative concentration of organic dye decreases with exposure time, which shows the high photocatalytic activity of the samples.

For a more accurate analysis, kinetic curves showing the dependence of the change in optical density of rhodamine-B solution on the exposure time are shown in Figure 5. The analysis of photocatalytic degradation curves shows that sample #CD2 demonstrates the highest photocatalytic activity in the considered series at the average degradation rate $k_{av} \approx 0.5 \text{ hr}^{-1}$, achieving a concentration reduction to ~30% of the initial concentration in 120 min.

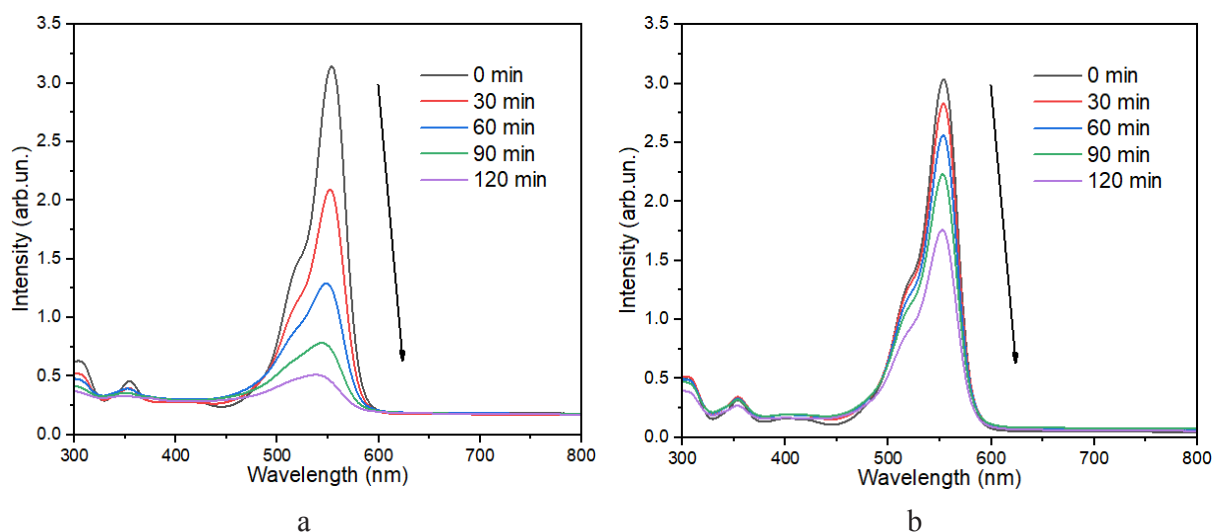


Figure 4 – Optical density spectra of ZnO samples: (a) #CD2, (b) #MW5

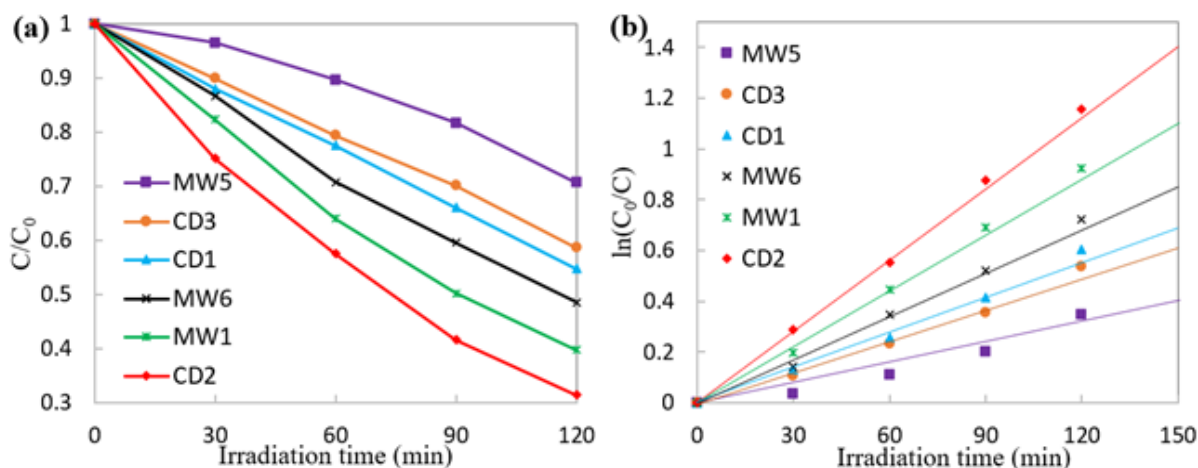


Figure 5 – Kinetic curves of dependence of absorption intensity on exposure time

This is probably due to the lamellar morphology of this sample and its high specific surface area providing efficient charge carrier transport. Slightly less high photocatalytic activity is possessed by sample #MW1 ($k_{av} \approx 0.4 \text{ hr}^{-1}$), which is due to the fine porous structure and high number of active centres on the surface involved in the photocatalytic decomposition of the dye. Despite somewhat inferior characteristics, the activity of powders obtained by the microwave assisted method can be significantly increased by optimising the synthesis conditions, in particular by introducing

surfactants to suppress agglomeration and reducing the heating power for more controlled crystal growth. Intermediate activity values are occupied by samples #MW6 and #CD1 ($k_{av} \approx 0.3 \text{ hr}^{-1}$), which corresponds to their morphology - moderate particle sizes, presence of interparticle voids (#MW6) and polyhedral structure (#CD1). Sample #CD3 showed lower activity ($k_{av} \approx 0.2 \text{ hr}^{-1}$), possibly due to dense agglomeration of particles and lower specific surface area. Sample #MW5 ($k_{av} \approx 0.1 \text{ hr}^{-1}$) showed the lowest photocatalytic efficiency, consistent with large rod-shaped crystals and almost no porosity. Thus, the key factors determining the photocatalytic activity of ZnO are particle size, degree of aggregation, specific surface area, and crystal growth anisotropy.

Conclusion

Thus, varying the molar concentration of ZnAc_2 using the chemical bath deposition method, other conditions of synthesis being equal, has a pronounced effect on the morphological characteristics of ZnO. An increase in concentration favours the formation of dense arrays of elongated nanostructures, whereas its decrease leads to the formation of loose and less ordered structures. These differences in morphology have the potential to significantly influence the optical and catalytic properties of the obtained materials. Moreover, comparative analysis of the obtained data showed that increasing the microwave heating time at constant power leads to the transition from loose nanostructures with high porosity to dense microstructures with low specific surface area. Decreasing the power at prolonged heating (#MW6) allows to slow down the crystallisation and aggregation processes, preserving a more finely dispersed and surface-developed structure. These results confirm the possibility of targeted regulation of morphology and, consequently, functional properties of ZnO by optimising microwave synthesis parameters. The sample of zinc oxide #CD2 synthesised by chemical bath deposition showed higher characteristics both in terms of morphological parameters, such as reduced average particle size and lower degree of agglomeration, and in terms of photocatalytic activity. The results obtained allow for a greater degree of control of morphology and crystallite size in the synthesis of ZnO to optimise its photocatalytic properties. Nanoplatelet and fine morphology (#CD2, #MW1) provides the highest activity due to the developed surface and directional transport of charge carriers. Large single-crystal structures with low porosity (#MW5) show the minimum efficiency. Reduced microwave heating power (#MW6) preserves the fine structure and moderate activity, making this regime promising for photocatalytic applications. The synthesised photocatalytically active samples are promising for water purification from organic contaminants in food, textile industries, as well as in sensor applications.

Funding information: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grants No AP23488569 and AP26103537).

REFERENCES

- 1 Zhao, Z., Agulto, V.C., Iwamoto, T., Kato, K., Yamanoi, K., Shimizu, T., Sarukura, N., Fujii, T., Fukuda, T., Yoshimura, M., Nakajima, M. Investigation of the optical and electrical properties of zinc oxide by terahertz time domain ellipsometry. *Optical Materials: X*, 24, 100352 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.omx.2024.100352>.
- 2 Pavan Kumar, M.A., Suresh, D., Sneharani, A.H. Centella asiatica mediated facile green synthesis of nano zinc oxide and its photo-catalytic and biological properties. *Inorganic Chemistry Communications*, 133, 108865 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108865>.
- 3 Abdullin, A.Kh., Cicero, G., Gritsenko, L.V., Kumekov, S.E., Markhabaeva, A.A. Effect of annealing and hydrogen plasma treatment on the luminescence and persistent photoconductivity of polycrystalline ZnO films. *Journal of Applied Physics*, 121, 245303-1–245303-6 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4989826>.

4 Haygood, K.J.F., Dinny Harnany, Jamasri, Santos, G.N.C., Muflikhun, M.A., Promising CO₂ gas sensor application of zinc oxide nanomaterials fabricated via HVPG technique. *Heliyon*, 10 (17), e36692 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36692>.

5 Olavo Cardozo, Ricardo Maia-Junior, Sajid Farooq, Braulio Tostes, Andreas Stingl, Patricia Farias, Severino Alves Junior, Zinc oxide nanostructures for third generation solar cells: A comprehensive review, *Solar Energy*, 299, 113710 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113710>.

6 Kedruk, Y.Y., Contestabile, A., Zeng, J., Fontana, M., Laurenti, M., Gritsenko, L.V., Cicero, G., Pirri, C.F., Abdullin, K.A. Morphology Effects on Electro- and Photo-Catalytic Properties of Zinc Oxide Nanostructures. *Nanomaterials*, 13, 2527 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13182527>.

7 Rana, A., Kumar, P., Thakur, N., Kumar, S., Kumar, K., Thakur, N. Investigation of photocatalytic, antibacterial and antioxidant properties of environmentally green synthesized zinc oxide and yttrium doped zinc oxide nanoparticles. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 38, 101188 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101188>.

8 Ulker, G., Penlik, Y., Gorduk, S. Synthesis, characterization and investigation of photocatalytic activity of ZnO Nanoparticles from *Tilia Tomentosa* (silverly linden) plant by green synthesis method. *Journal of Molecular Structure*, 1344, 142929 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.142929>.

9 Arepalli, V.K., Yang, E., Patil, A.A., Wi, J.-S., Park, J.S., Lee, J.-M., Lee, S., Chung, Ch.-H. ZnO nanowire broadband ultra-wide-angle optical diffusers grown by aqueous chemical bath deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 1008, 176660 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176660>.

10 Gilani, S.E.H., Younas, M., Nazar, R., Rasheed, M.H., Mehmood, U. Microwave-assisted synthesis of ZnO nanostructured photoanodes for advanced dye-sensitized solar cells. *Materials Letters*, 400, 139146 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.139146>.

11 Rustembekkyzy, K., Sabyr, M., Kanafin, Y.N., Khamkhash, L., Atabaev, T.Sh. Microwave-assisted synthesis of ZnO structures for effective degradation of methylene blue dye under solar light illumination. *RSC Advances*, 14 (23), 16293–16299 (2024). <https://doi.org/10.1039/d4ra02451f>.

12 Ahmed, M., Coetsee, L., Goosen, W.E., Urgessa, Z.N., Botha, J.R., Venter, A. Characterization of Bi-doped ZnO nanorods prepared by chemical bath deposition method. *Physica B: Condensed Matter*, 666, 415105 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415105>.

13 Zhu, J., Feng, Y., Dai, B., Qi, Y. Morphology and orientation controlling of ZnO nanofibers via chemical bath deposition. *Materials Chemistry and Physics*, 305, 128028 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128028>.

14 Sandhu, G.S., Nine, M.J., Purasinhala, K., Dadkhah, M., Hassan, K., Losic, D. Morphology and charge effect of ZnO nanostructures on the performance of anticorrosion coatings. *Surfaces and Interfaces*, 69, 106750 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106750>.

15 Alp, E., Olivieri, F., Aulitto, M., Castaldo, R., Contursi, P., Cocca, M., Gentile, G. The effect of ZnO nanoparticles morphology on the barrier and antibacterial properties of hybrid ZnO/graphene oxide/montmorillonite coatings for flexible packaging. *Surfaces and Interfaces*, 55, 105307 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105307>.

16 Kowalik, P., Konkol, M., Antoniuk-Jurak, K., Próchniak, W., Wiercioch, P., Rawski M., Borowiecki T. Structure and morphology transformation of ZnO by carbonation and thermal treatment. *Materials Research Bulletin*, 65, 149–156 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.01.032>.

17 Tolubayeva, D.B., Gritsenko, L.V., Kedruk, Y.Y., Aitzhanov, M.B., Nemkayeva, R.R., Abdullin, K.A. Effect of hydrogen plasma treatment on the sensitivity of ZnO based electrochemical non-enzymatic biosensor. *Biosensors*, 13, 793 (2023). <https://doi.org/10.3390/bios13080793>.

18 Uribe-López, M.C., Hidalgo-López, M.C., López-González, R., Frías-Márquez D.M., Núñez-Nogueira G., Hernández-Castillo D., Alvarez-Lemus M.A. Photocatalytic activity of ZnO nanoparticles and the role of the synthesis method on their physical and chemical properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 404, 112866 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112866>.

19 Hussein S.N.C.M., Fuad F.S.M., Ismail M. Synthesis of zinc oxide nanoparticles for oil upgrading and wax deposition control: effect of calcination temperature. *Indonesian Journal of Chemistry*, 20 (4), 746–754 (2020). <https://doi.org/10.22146/ijc.43317>.

20 Dobrozhan, O., Shelest, I., Stepanenko, A., Kurbatov, D., Yermakov, M., Čerškus, A., Plotnikov, S., Opanasyuk, A., Structure, substructure and chemical composition of ZnO nanocrystals and films deposited onto flexible substrates. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 108, 2020, 104879, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104879>.

21 Salazar R., Saidi B., Delamoreanu A., Ivanova V. Electrochemical growth of hexagonally arranged ZnO nanowall structures on ZnO substrates. Influence of surface polarity. Journal of Electroanalytical Chemistry, 850, 113397 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113397>.

¹Қадау А.Т.,

магистр, ORCID ID: 0009-0008-9714-0304,

e-mail: aidoskadau@gmail.com

^{1,2}Калкозова Ж.К.,

ф.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,

e-mail: zhanar.kalkozova@kaznu.edu.kz

^{1,3*}Гриценко Л.В.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0003-0726-1118,

*e-mail: l.gritsenko@satbayev.university

^{1,2}Мархабаева А.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,

e-mail: aiko.marx87@gmail.com

^{1,2}Абдуллин Х.А.,

ф.-м.ғ.д., профессор, ORCID ID: 0000-0002-2729-2272,

e-mail: kh.abdullin@physics.kz

¹Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Алматы қ., Қазақстан

²Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертхана (АТҰНЗ),

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

³Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

ТӨМЕН ШЫҒЫНДЫ СИНТЕЗ ӘДІСТЕРІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ МЫРЫШ ОКСИДІНІҢ МОРФОЛОГИЯСЫНА ӘСЕРІ

Андатпа

Қыздырудың әртүрлі параметрлерінде модификацияланған микротолқынды әдіспен және химиялық тұндыру әдісімен синтезделген мырыш оксиді (ZnO) ұнтақтарының морфологиясы зерттелді. Бейнелерді талдау синтез параметрлеріне байланысты құрылымның қалыптасу заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді. Микротолқынды қыздыру уақытының тұрақты қуатта ұлғаюы босаң нанобөлшектерден тығыз, жақсы қырланған микроқұрылымдарға бірізді ауысуға алып келетіні көрсетілді. Сонымен қатар, қыздыру қуатының төмендеуі кристалдану мен агрегация процестерін баяулатып, ұсақдисперсті әрі кеуекті құрылымды сақтауға мүмкіндік береді. Сканерлеуші электрондық микроскопия өсу ерітіндісінің қалған компоненттерінің концентрациялары тұрақты болған жағдайда, мырыш ацетатының бастапқы мольдік концентрациясының өзгеруіне байланысты химиялық тұндыру әдісімен өсірілген үлгілер морфологиясындағы елеулі айырмашылықтарды да анықтады. Осылайша, прекурсорлар концентрациясын өзгерту, микротолқынды синтездің уақыты мен қуатын оңтайландыру арқылы бөлшектер морфологиясын мақсатты түрде басқаруға мүмкіндік беретін, төмен шығынды, экологиялық таза және бақыланатын ZnO үлгілерін синтездеу әдістері ұсынылды. Өсірілген құрылымдарды родамин-В органикалық бояғышын фотокаталитикалық ыдыратуда қолдану мүмкіндігі көрсетілді. Фотокаталитикалық ыдырау жылдамдығы мен мырыш оксиді бөлшектерінің морфологиясы арасындағы өзара байланыс анықталды. Қарастырылған серияда родамин В фотокаталитикалық деградациясының ең жоғары жылдамдығы $\approx 0.5 \text{ сағ}^{-1}$ химиялық тұндыру әдісімен алынған үлгіде тіркелді, ең төменгісі $\approx 0.1 \text{ сағ}^{-1}$ микротолқынды әдіспен синтезделген үлгіде байқалды.

Тірек сөздер: мырыш оксиді, морфология, микротолқынды әдіс, химиялық тұндыру әдісі, фотокатализ.

¹Қадау А.Т.,

магистр, ORCID ID: 0009-0008-9714-0304,

e-mail: aidoskadau@gmail.com

^{1,2}Калкозова Ж.К.,

к.ф.-м.н., ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0002-4826-1678,

e-mail: zhanar.kalkozova@kaznu.edu.kz

^{1,3*}Гриценко Л.В.,

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0003-0726-1118,

*e-mail: l.gritsenko@satbayev.university

^{1,2}Мархабаева А.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,

e-mail: aiko.marx87@gmail.com

^{1,2}Абдуллин Х.А.,

д.ф.-м.н., профессор, ORCID ID: 0000-0002-2729-2272,

e-mail: kh.abdullin@physics.kz

¹Институт прикладных наук и информационных технологий, г. Алматы, Казахстан

²Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа (ННЛОТ),
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

³Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОЗАТРАТНЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА НА МОРФОЛОГИЮ ОКСИДА ЦИНКА

Аннотация

Исследована морфология порошков оксида цинка (ZnO), синтезированных модифицированным микроволновым методом при различных параметрах нагрева и методом химического осаждения. Анализ изображений позволил установить закономерности формирования структуры в зависимости от параметров синтеза. Показано, что увеличение времени микроволнового нагрева при постоянной мощности приводит к последовательному переходу от рыхлых наночастиц к плотным, хорошо ограненным микроструктурам. Кроме того, снижение мощности нагрева замедляет процессы кристаллизации и агломерации, сохраняя более мелкодисперсную и пористую структуру. Сканирующая электронная микроскопия выявила также существенные различия в морфологии образцов, выращенных методом химического осаждения, обусловленные изменением исходной молярной концентрации ацетата цинка при фиксированных концентрациях остальных компонентов раствора роста. Таким образом, представлены низкозатратные, экологичные, контролируемые методы синтеза образцов ZnO, позволяющие направленно управлять морфологией частиц за счет изменения концентрации прекурсоров, оптимизации времени и мощности микроволнового синтеза. Показана возможность применения выращенных структур для фотокаталитического разложения органического красителя родамина-В. Установлена взаимосвязь между скоростью фотокаталитического разложения и морфологией частиц оксида цинка. Наибольшая скорость фотокаталитической деградации родамина-В $\approx 0.5 \text{ hr}^{-1}$ в рассмотренной серии зафиксирована у образца, полученного методом химического осаждения, наименьшая $\approx 0.1 \text{ hr}^{-1}$ – у образца, синтезированного микроволновым методом.

Ключевые слова: оксид цинка, морфология, микроволновый метод, метод химического осаждения, фотокатализ.

Article submission date: 14.08.2025

ӘОЖ 546.78
FTAMP 33.15.29

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-302-312>

¹Отунчи Е.,

магистр, ФТИ инженер, ORCID ID: 0009-0006-4361-8099,

e-mail: e.otunchi@sci.kz

^{1*}Шонғалова А.,

PhD, ФТИ аға ғылыми қызметкері, ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,

*e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

¹Умирзаков А.,

докторант, ФТИ аға ғылыми қызметкері, ORCID ID: 0000-0002-0941-0271

e-mail: a.umirzakov@sci.kz

¹Бондарь Е.,

PhD, ФТИ аға ғылыми қызметкері, ORCID ID: 0000-0001-6745-5462,

e-mail: bondar@sci.kz

¹Дмитриева Е.,

ф.-м.ғ.к., ORCID ID: 0000-0002-1280-2559,

e-mail: e.dmitrieva@sci.kz

¹Кемелбекова А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-4813-8490,

e-mail: a.kemelbekova@sci.kz

²Токмолдин Н.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0663-0228,

e-mail: tokmoldin@pdi-berlin.de

¹ Физика-техникалық институт, Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

² Физика және астрономия институты, Потсдам университеті, Потсдам қ., Германия

WS₂ МЕН MXENE НЕГІЗІНДЕ ГИБРИДТІК НАНОҚҰРЫЛЫМДАРДЫ АЛУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Бұл жұмыста WS₂@MXene негізіндегі гибриді нанокұрылымды синтездеу және оның құрылымдық қасиеттерін кешенді зерттеу мәселесі қарастырылды. WS₂@MXene материалы екі кезеңді әдіс арқылы алынды. Алдымен Ti₃AlC₂ MAX фазасы фторсутек қышқылында өңделіп, қабатты Ti₃C₂ MXene материалы алынды. Кейін гидротермалдық әдіс арқылы WS₂ нанокұрылымдары синтезделіп, ультрадыбыстық араластыру арқылы екі компонент біріктірілді. Синтез нәтижесінде алынған үлгілер рентгендік дифракция, сканерлеуші электрондық микроскопия және рентген фотоэлектрондық спектроскопия әдістері арқылы зерттелді. Рентгендік дифракция мәліметтері WS₂ фазасының гексагональды құрылымын және MXene қабатаралық кеңістігінің ұлғайғанын растады. Морфология кескіндерінде MXene паракшаларына ендірілген WS₂ жапырақшалары айқын көрінді. Ал химиялық байланыстарды зерттеу нәтижелері гибридің қажетті элементтік құрамын дәл анықтады. Синтезделген материал күрделі наногүлдер мен наножіпшелерден тұратын иерархиялық құрылымға ие. Мұндай құрылым жоғары меншікті беткі аудан, тиімді электрон тасымалдау және белсенді каталикалық орталардың артуын қамтамасыз етеді. WS₂@MXene гибриді энергия сақтау жүйелері, сутек эволюциясы реакциялары және газды сезу сенсорлары үшін перспективалы материал ретінде қарастырылады.

Тірек сөздер: MXene, вольфрам дисульфиді, гибриді нанокұрылым, иерархиялық нанокұрылым, екіөлшемді материалдар.

Кіріспе

MXene және WS_2 қазіргі материалтану саласында кеңінен зерттеліп жатқан маңызды 2D материалдар [1]. WS_2 бұл өтпелі металл дихалькогенидтерінің (АМД) өкілі, ерекше электрондық қасиеттерімен танымал және арзан, каталитикалық белсенді әрі тұрақты болғандықтан түрлі зерттеулердің нысанына айналған [2]. Алайда, WS_2 материалының электрөткізгіштігі салыстырмалы түрде төмен, сондықтан оның қолдану аясын кеңейту үшін қоспалау, гетероқұрылым, гибриді құрылым түзу сияқты әдістер арқылы өткізгіштігін жақсарту қажеттігі туындайды [3].

MXene материалдары графенге ұқсас қабатты құрылымға ие жаңа 2D карбидтер тобы ретінде 2010 жылдардың басында ашылды. Олар жоғары электр өткізгіштігі мен үлкен меншікті беткі ауданының арқасында энергия сақтау, электрокатализ сияқты салаларда болашағы зор материалдар ретінде кеңінен зерттеліп келеді [4].

Дегенмен, MXene материалдарының басты мәселелерінің бірі – олардың ауада және су ортада оңай тотығуы. Мұндай деградация олардың қасиеттерін нашарлатып, қолдану мүмкіндігін айтарлықтай шектейді [5]. MXene негізіндегі гибриді нанокұрылымдарды әзірлеу бағыты әлі де даму сатысында болғанымен, күрделі иерархиялық құрылымы мен жоғары функционалдық сипаттамалары бар мұндай гибриды ғылыми қауымдастық тарапынан үлкен қызығушылық тудырып отыр [4].

WS_2 мен MXene-ді біріктіру – осы екі материалдың кемшіліктерін толықтырып, артықшылықтарын біріктіруге мүмкіндік береді [6]. Соңғы зерттеулерге сәйкес, MXene қабаттары басқа 2D материалдарды, соның ішінде WS_2 -ні, өз арақабаттарында біркелкі және тұрақты орналастыра алады [5, 6]. Өз кезегінде, WS_2 қабаттарын MXene матрицасына енгізу композиттің электрондық, оптикалық және каталитикалық қасиеттерін едәуір жақсартады. Әсіресе мұндай гибриды энергия сақтау жүйелері мен сенсорлық құрылғыларда қолдану жоғары тиімділік береді [7].

WS_2 /MXene негізіндегі нанокмползиттер су электролизі арқылы сутек өндіруге арналған жоғары тиімді электрокатализаторлар ретінде сыналып, таза WS_2 немесе MXene-мен салыстырғанда айтарлықтай төмен аса кернеу мен жоғары ток тығыздығын көрсетті [7]. Сонымен қатар, WS_2 наноқабыршақтарымен безендірілген көпқабатты MXene негізінде аммиак пен азот диоксидін анықтауға арналған сезімтал химиялық сенсорлар жасалғаны туралы хабарланған.

Алайда WS_2 @MXene гибридытерін зерттеу әлі бастапқы кезеңде тұр. Бұл бағытта көптеген ашық сұрақтар сақталуда және кейбір алдыңғы зерттеулерде материалдың толық мүмкіндіктері жүзеге асырылмаған. Осы жұмыстың өзектілігі де осында – WS_2 пен MXene-нің синергетикалық қасиеттерін пайдалана отырып, жаңа гибриді материал синтездеп, оны жан-жақты сипаттау арқылы нанокұрылымды композициялық материалдар саласына елеулі үлес қосу.

Материалдар мен әдістер

Ti_3C_2 MXene синтезі бірнеше негізгі кезеңнен тұрады. Алдымен 1 г Ti_3AlC_2 MAX фазасы 20 мл 48 масс.% фторсутек (HF) қышқылы ерітіндісімен араластырылды. Бұл кезеңде Al қабаты селективті түрде еріп, HF қышқылы Ti_3AlC_2 құрылымындағы алюминий атомдарын ерітіп, олардың орнында бос кеңістіктер қалдырады.

Синтездеудің келесі кезеңінде алынған қоспа бірнеше рет деионизацияланған сумен жуылды. Жуу барысында артық қышқыл, алюминий фториді тәрізді реакция өнімдері және басқа иондар толықтай шайылып кетеді. Бұл кезеңде центрифугалау процесі қолданылды.

Соңғы кезеңде алынған Ti_3C_2 MXene ұнтағы вакуумдық пеште 60 °C температурада 24 сағат бойы кептірілді. Вакуумдық ортада кептіру MXene қабаттарының тотығуын азайтады және олардың құрылымын сақтауына ықпал етеді.

Осы үш кезеңнің үйлесімі нәтижесінде MAX фазасынан алюминий қабатын селективті түрде жою арқылы қабатты Ti_3C_2 MXene материалы алынды. WS_2 синтезі.

Синтез үшін реактивтер ретінде вольфрам гексахлориді (WCl_6 , Sigma-Aldrich), L-цистеин ($C_3H_7NO_2S$, Sigma-Aldrich) және этанол (C_2H_5OH , Sigma-Aldrich) қосымша тазартусыз қолданылды. WS_2 құрылымы бірсатылы гидротермалдық әдіс арқылы синтезделді. Ол үшін 0,005 М WCl_6 , 0,02 М L-цистеин және дистилденген су араластырылып, бөлме температурасында 30 минут бойы араластырылды. Кейін алынған ерітінді 50 мл көлеміндегі автоклавқа құйылып, 180 °C температурада 24 сағат бойы қыздырылды. Қара түсті тұнба центрифугалау арқылы бөлініп алынып, үш рет дистилденген сумен жуылып, вакуумдық пеште 60 °C температурада 12 сағат бойы кептірілді.

WS_2 /MXene синтезі. Алдын ала синтезделіп, кептірілген WS_2 нанокұрылымдары мен MXene парақшалары (немесе нанокабаттары) ультрадыбыстық өңдеу арқылы араластырылды. Бұл процесс жоғары жиілікті (40 кГц) ультрадыбыстық толқындардың көмегімен жүзеге асырылды.

Үлгілерді сипаттау. Үлгілердің беттік химиялық құрамын зерттеу үшін рентген фотоэлектрондық спектроскопия (XPS) қолданылды. Зерттеулер Thermo Scientific компаниясының NEXSA аспабында ультра жоғары вакуум жағдайында (шамамен 10^{-9} мбар) жүргізілді. Зерттеу аумағы шамамен 5×5 мкм, ал талдау тереңдігі 5–10 нм аралығында болды. Үлгілердің бетінде заряд жиналуын болдырмау үшін заряд компенсациясы жүйесі қолданылды. WS_2 /MXene ұнтағы алдын ала дайындалып, арнайы субстратқа орналастырылып, вакуумдық камераға енгізілді.

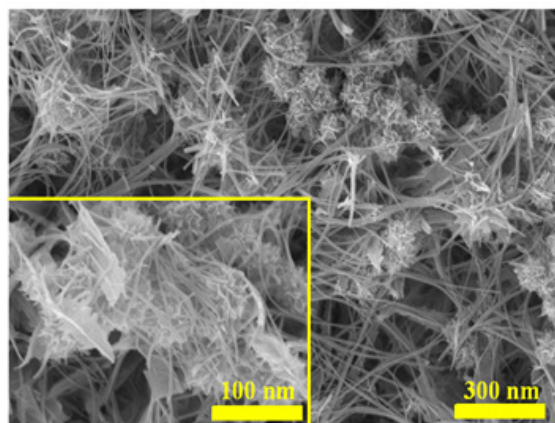
Үлгілердің беткі морфологиясын зерттеу үшін сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) және оған қосымша энергия-дисперсиялық спектроскопия (ЭДС) қолданылды. Зерттеу JSM-7500F, JEOL Ltd. (Жапония) электрондық микроскопының көмегімен жүргізілді. Сонымен қатар, ЭДС модулі арқылы үлгінің элементтік құрамы талданды.

Үлгілердің кристалдық құрылымы рентгендік дифракция (XRD) әдісімен зерттелді. Зерттеулер Жапонияның Rigaku Co. компаниясы шығарған SmartLab құрылғысында жүргізілді. Cu K α сәулесі (толқын ұзындығы $\lambda = 0.154056$ нм) қолданылып, дифракциялық мәліметтер 2 θ бұрыштарының 20–80° аралығында, 6°/мин сканерлеу жылдамдығымен тіркелді.

Нәтижелер мен талқылау

WS_2 -нің морфологиясы мен кристаллдық құрылымы. 1-суретте синтезделген WS_2 материалының морфологиясының кескіндері ұсынылған. Материалдың морфологиясын бағалау мақсатында бейнелер әртүрлі үлкейтулерде алынды. Суреттен көрініп тұрғандай, L-цистеиннің 1:2 мольдік қатынасында алынған WS_2 үлгісінде наногүл тәрізді және наножіпше тәрізді құрылымдар қатар байқалады. Жұқа жіп тәрізді наноталшықтар диаметрі шамамен ондаған нанометрге тең болып, ұзындығы жүздеген нанометрге дейін жетеді. Бұл талшықтар өзара айқаса өскен тор түрінде ұйымдасып, басқа зерттеулерде де байқалған құрылымға ұқсас сипатталады [8]. Жіпшелердің түйісу нүктелерінде және бойында гүл жапырақшаларына ұқсас наногүлдер түзіледі. Бұл наногүлдер радиалды бағытта орналасқан жұқа пластинкалардан немесе жапырақшалардан құралған шоқ-гүл тәрізді агрегаттарды құрайды. Әрбір наногүлдің өлшемі шамамен жүз нанометрден бірнеше жүз нанометрге дейінгі диапозонда, ал оның құрамындағы нано-пластинкалардың қалыңдығы бірнеше нанометрмен шектеледі [9]. Бұл үлгіде агрегация дәрежесі жоғары: наножіпшелер көптеген наногүл кластерлерін өзара байланыстырып, кеңістіктік тұтасқан тор түзеді. Нәтижесінде материал көлемді «қаңқа» тәрізді иерархиялық құрылымға ие болады, мұнда наногүлдер – торап, ал наножіпшелер – оларды байланыстыратын көпірлер рөлін атқарады. Мұндай күрделі морфология материалының аса үлкен меншікті беткі ауданына ие иерархиялық құрылымын көрсетеді [9]. 1:2 қатынастағы морфологиялық құрылымның негізгі ерекшелігі – оның құрамында бір мезгілде әрі гүл тәрізді көпжапырақты, әрі жіп тәрізді бірөлшемді түзілімдердің қатар кездесуі. Бұл процесте

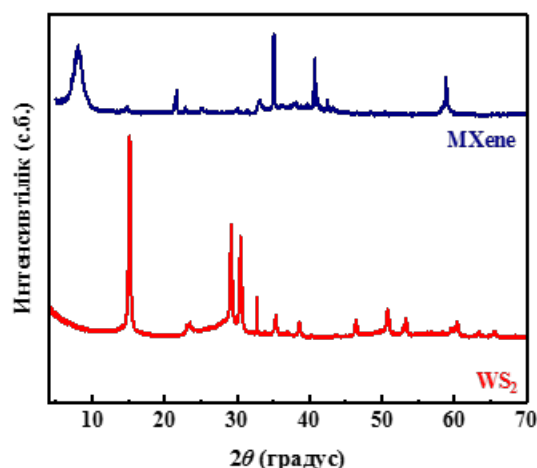
L-цистеин көпқырлы рөл атқарады: ол күкірт көзі ретінде WS_2 түзілуін қамтамасыз етіп қана қоймай, сонымен қатар органикалық бағыттаушы агент ретінде реакция ортасында кристалдану процесін бағыттайды [9]. Соның нәтижесінде вольфрам сульфидінің кристалдануы кезінде екі түрлі наноқұрылым түзіледі: жазық нано-пластинкалар өзара жиналып гүл шоғырын құрайды, ал қалған бөлігі жіп тәрізді талшықтар ретінде өседі. Осы синтез процесінің нәтижесінде 1-суретте көрсетілген наногүлдер мен наножіпшелерден өрілген матрицалық құрылым қалыптасады.



Сурет 1 – СЭМ көмегімен алынған WS_2 кескіні

Жалпы алғанда, L-цистеиннің қатынасы өзгерген сайын WS_2 морфологиясында келесі заңдылықтар көрінеді: күкірт көзі шамадан тыс аз болса (1:1), вольфрам толық сульфидке айнамай, аралық оксидті кристалдар (әдетте жіпше, өзек тәрізді) түзіледі де, нәтиже көбіне бірөлшемді наножіп тәрізді құрылымдарға саяды; ал күкірт пен органикалық агент мөлшері өте көп болса (1:3), кристалдар өсімі баяулап, жапырақшалар толық бөлшектенбей, ірілеу жинақы гүлдер пайда болады. Ал 1:2 қатынасы осы екі шектік жағдайдың арасындағы онтайлы теңгерімді қамтамасыз етіп, әрі наножіпшелер, әрі наногүлдер қатар дамитын күрделі иерархиялық морфология береді. L-цистеиннің редукциялаушы, күкірттендіруші және бағыттаушы қасиеттері дәл осы 1:2 деңгейінде үйлесімді әсер етіп, WS_2 -нің ерекше наноқұрылымын түзетіні байқалады. Бұл морфологиялық айырмашылықтардың негізінде кристалдану кинетикасының айырмашылығы, ядролану жылдамдығы мен өсу бағыты, аралық өнімдердің түзілуі, сондай-ақ беттік активті молекулалардың ықпалы жатқаны ғылыми салыстырулар арқылы расталған [9]. Қорытындылай келгенде, L-цистеиннің 1:2 мольдік қатынастағы WS_2 үлгісі наногүл тәрізді кластерлер мен наножіпше тәрізді талшықтардың иерархиялық өрілген морфологиясымен сипатталады; бұл құрылымдардың өлшемдері наномасштапта, жіпшелердің ұзындығы ~100-нм тәртібінде, гүл шоғырлары ~0.1–0.3 мкм шамасында, және айқын агрегатталған тор түзіп орналасқан. Басқа қатынастарда морфология айтарлықтай өзгереді: күкірттің аздығы бірөлшемді наножіпшелердің басым болуына, ал оның көптігі іріленген наногүлдердің түзілуіне әкеледі. Әдебиеттегі деректермен салыстырғанда, біздің жағдайда алынған аралас морфология – L-цистеиннің бірегей бағыттаушы әсерінің нәтижесі.

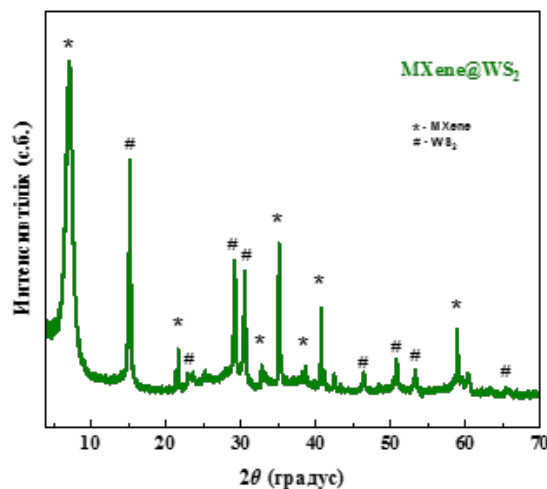
WS_2 мен MXene кристаллдық құрылымы. Синтезделген үлгінің кристалдық құрылымы мен фазалық құрамы рентгендік дифракция физикалық әдісі арқылы расталды. Алынған WS_2 наноқұрылымының және MXene наножапырақшаларының рентгендік дифрактограммасы 2-суретте көрсетілген. Барлық дифракциялық шыңдар WS_2 -нің гексагональды фазасына сәйкес келетіні байқалады, ұяшық параметрлері $a = 3.154 \text{ \AA}$ және $c = 12.362 \text{ \AA}$, бұл JCPDS стандартты картасына №08–0237 сәйкес келеді [10]. Рентгендік құрылымда басқа фазалар тіркелмеген, сондықтан таза WS_2 -нің гексагональды фазасы түзілгенін анық айта аламыз.



Сурет 2 – MXene және WS₂ рентгендік дифракция спектрлері

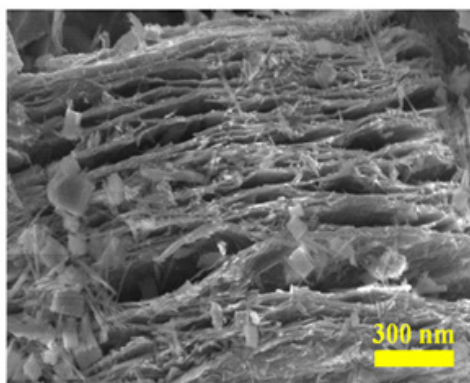
MXene үшін 39.00° аймағындағы (104) жазықтыққа тән дифракциялық шың байқалмайды, ал (002) жазықтығының шыңы 9.64°-тан 6.53°-қа дейін төмен қарай ығысады. Бұл нәтижелер MAX-фазадан Al³⁺ иондарының толықтай алынғанын және қабатаралық қашықтықтың ұлғайғанын көрсетеді. 14.25°, 28.00°, 32.04°, 34.04°, 36.83°, 49.50° және 56.70° градус аймақтарындағы дифракциялық шыңдар сәйкесінше (002), (004), (100), (101), (102), (105) және (106) жазықтықтарына сәйкес келеді және 2H-WS₂ гексагональды фазасына (JCPDS №84–1398) тән [11]. (002) жазықтығына сәйкес келетін дифракциялық шың 2θ ≈ 9.7°-тан 6.5–7.0° аралығына ығысады. Бұл қабатаралық қашықтықтың ұлғайғанын және MXene құрылымының кеңейгенін білдіреді. Мұндай өзгерістер MXene парақшаларының арасындағы кеңістіктердің ұлғаюына және олардың функционалдық топтармен, мысалы, –OH, –F, –O, байытылуына байланысты [12].

Mxene/WS₂ кристаллды құрылымы мен морфологиясы. Mxene@WS₂ рентгендік дифракциялық спектрінде MXene мен WS₂ материалдарына тән дифракциялық шыңдар бір уақытта байқалады, бұл MXene@WS₂ құрылымының сәтті синтезделгенін көрсетеді. Айта кетерлігі, MXene@WS₂ жартылай кристалдық фазасы электрон тасымалдау интерфейстері мен белсенді орталықтардың санын арттыруы мүмкін. Кескінде Mxene фазасы жұлдызшамен (*), ал WS₂ фазасы торша белгісімен көрсетілген (#) (3-сурет).



Сурет 3 – Mxene@WS₂ рентгендік дифракция спектрі

Синтезделген $WS_2@MXene$ гибридинің (4-сурет) беткі морфологиясы сканерлеуші электрондық микроскопия әдісі арқылы зерттелді. Морфологияның кескінінен көрініп тұрғандай, $MXene$ толықтай көпқабатты, аккордеон тәрізді құрылымға айналғаны байқалады, бұл МАХ-фазадан алюминий қабаттарының толықтай алынғанын көрсетеді. $MXene$ -нің қабатты құрылымы сақталғаны көрінеді, ал WS_2 қабаттары $MXene$ бетінің арақабаттарына ендірілген.



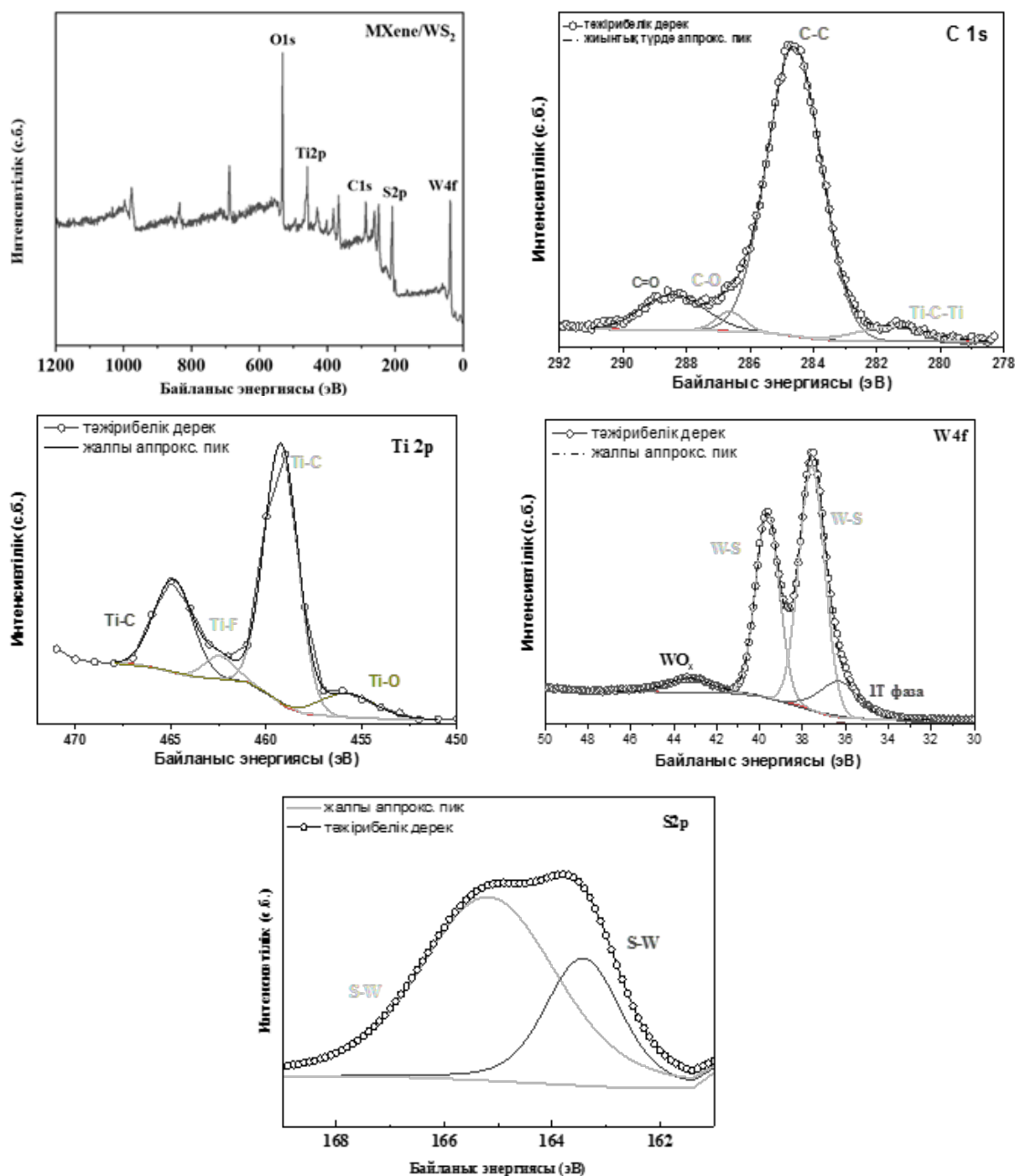
Сурет 4 – СЭМ көмегімен алынған $MXene/WS_2$

Ұқсас морфологияны [5] зерттеуінде кездестіруге болады, онда МАХ-фазаның алюминий қабатын тандамалы түрде алу арқылы $MXene$ көпқабатты құрылымы сақталып, аккордеон тәрізді бүктемелерге айналғаны анықталған. WS_2 осындай қабаттар арасына енгізу соңғы зерттеулерде көрсетілгендей, материалдардың өткізгіштігін және каталитикалық қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді. Мысалы, $MXene$ материалдарының WS_2 сияқты басқа 2D материалдарын тұрақты орналастыру және таратуда маңызды рөл атқаратыны байқалған [6].

Бұл морфологияда $MXene$ -нің аккордеон тәрізді бүктемелері беткейдің ауданын кеңейтіп, қабат аралық кеңістікті ұлғайтады, бұл WS_2 -дің енгізу үшін пайдалы. WS_2 қабаттарының $MXene$ матрицасына енгізілуі, жалпы гибридинің электрондық, оптикалық және каталитикалық қасиеттерін жақсартады, әсіресе энергия сақтау және сенсорлық қолданбалар үшін [7].

Берілген 5-суретте $WS_2@MXene$ гибридинің рентген фотоэлектрондық спектроскопиясының (РФС) кең диапазондағы шолу спектрі ұсынылған. Талдау бойынша жиі кездесетін негізгі элементтердің шыңдары анық байқалады. Жалпы спектрде W және S сигналдары WS_2 фазасына, ал Ti және C сигналдары $MXene$ (Ti_3C_2) құрамына тән екені көрінеді [13,14]. Мысалы, Ti 2p өңіріндегі шыңдардың болуы Ti_3C_2 $MXene$ құрамындағы Ti–C байланыстарын және кейбір оксидтік терминалдарды көрсетсе, W 4f және S 2p шыңдары WS_2 құрамындағы W^{4+} және S^{2-} күйлерін білдіреді [13, 14]. Сонымен бірге O 1s аймағында ~531–533 эВ шамасындағы шыңдар байқалса, бұл беткі Ti–O (TiO_2) немесе C–O байланысты бекітулердің бар екенін көрсетеді [15]. Жалпы спектрдегі осындай элементтік құрамы мен шыңдар орындары $WS_2@MXene$ гибридиндегі қажетті элементтер бар екенін және синтездің табысты өткенін растауға мүмкіндік береді.

Көміртектің (C 1s) спектрі 5-суретте ұсынылған. C 1s спектрінде екі негізгі компонент анықталады. Бірінші компонент шамамен 282 эВ (немесе 281.8 эВ) диапазонында орналасып, Ti_3C_2 $MXene$ құрамындағы көміртектің Ti–C байланысын көрсетеді [15]. Екінші компонент ~285 эВ мәнінде байқалады және ол графитті көміртек (C–C немесе C=C) күйіне сәйкес келеді [15]. Сонымен қатар жоғары байланыс энергиясы (286–289 эВ) аймақтарында C–O және C=O байланыстарына тән шыңдар болуы мүмкін. Бұл аймақтар құрамдағы көміртектің оттегімен байланысуын немесе сыртқы ластаушылардан (адвертистигтік көміртек) түсуін білдіреді. Нәтижесінде, C 1s спектріндегі ~281–282 эВ (Ti–C) және ~285 эВ (C–C) шыңдары $MXene$ құрылымының сақталғанын растағанымен, қосымша 286–289 эВ жолақтары беткі функционалдық топтардың (мысалы, C–O, C=O) болуын көрсетеді [15].



Сурет 5 – РФС нәтижелері: а) WS₂@MXene үлгісінің рентген фотоэлектрондық спектроскопиясының кең диапазондағы шолу спектрі, көміртектің (C 1s) спектрі, в) Ti 2p аумағының спектрі, г) W 4f аумағының спектрі, г) S 2p аумағының спектрі

Ti 2p аймағында Ti₃C₂ MXene-ге тән бірнеше шыңдар көрінеді (5в сур.). Әдеби дерек бойынша Ti 2p_{3/2} шыңдары шамамен 454.8–455.0 эВ (Ti–C байланысын білдіретін) және 458.8 эВ–TiO₂ -дегі Ti⁴⁺ күйіне сәйкес мәндерінде болады [13]. Мысалы, зерттеулерде 454.9 эВ Ti–C шыңы және 458.8 эВ Ti–O (TiO₂, Ti⁴⁺) шыңы тіркелген [13]. Сондай-ақ ~455–457 эВ аралығындағы аралық шыңдар Ti²⁺ немесе Ti³⁺ күйіндегі Ti–X, терминаттар немесе аралық

оксидтер, көрсеткіші болуы мүмкін [13]. Нақты бақылауларда Ti 2p_{3/2} шыңының ~455 эВ (Ti–C) деңгейде болуы MXene қабатының ішкі Ti–C байланысын дәлелдесе, ~458–459 эВ (Ti–O) шыңы беткі TiO₂ немесе Ti–(OH) тотығы бар екенін көрсетеді. Бұл MXene фрагментінің құрылымдық тұтастығын және оның бетінде кем дегенде ішінара оксидизацияның бар екенін сипаттайды [13]. Осылайша Ti 2p нәтижелері Ti₃C₂ MXene-нің негізгі құрылымын (Ti–C) растайды және беткі өзгерістердің бар екенін көрсетеді.

W 4f аумағы 4f_{7/2} және 4f_{5/2} сигналдарының екілік жолақтарынан тұрады (5г сур.). WS₂-ге тән W⁴⁺ күйінде бұл шыңдар типтік түрде шамамен 32.5 эВ (W 4f_{7/2}) және 34.6 эВ (W 4f_{5/2}) мәндерінде орналасады [14]. Жоғарыда ұсынылған мәліметке сәйкес, W 4f спектріндегі ~32.5 эВ (4f_{7/2}) шыңы мен ~34.6 эВ (4f_{5/2}) шыңы W⁴⁺-ге (яғни WS₂ құрамына) тән екені дәлелденген [14]. Егер спектрде ~35–37 эВ аймағында қосымша шыңдар байқалса, олар W⁶⁺ күйіндегі оксидтерді (мысалы, WO₃) көрсетуі мүмкін. Бізде негізгі шыңдар W⁴⁺ күйіне сәйкес келетіндіктен, WS₂ фазасының сәтті түзілуі расталады. Қысқаша айтқанда, W 4f аймағындағы ~32.5 эВ және ~34.6 эВ шыңдары WS₂-дің W⁴⁺ күйін білдіріп, композициядағы туынды фазаның қалыпты күйде екенін көрсетеді [14].

S 2p аймағы екілік S 2p_{3/2} және S 2p_{1/2} шыңдарынан тұрады (5д сур.). WS₂ құрамында S²⁻ күйлеріне сәйкес кейбір ең жиі кездесетін мәндер ~162.1 эВ (S 2p_{3/2}) және ~163.3 эВ (S 2p_{1/2}) шамасында орналасады [14]. Анықталған шыңдар дәл осы диапазонда болғандықтан, олар WS₂ молекуласындағы сульфидтік күйлерді білдіреді [14]. Мысалы, WS₂ дереккөздерінде S 2p_{3/2} ~162 эВ, S 2p_{1/2} ~163 эВ деп көрсетілген, бұл толықтай S²⁻ күйін растайды [14]. Егер жоғары байланыс энергиясы жақта (~168 эВ) қосымша шың пайда болса, ол S–O (сульфат) түрін көрсете алады; бірақ негізгі шың S²⁻ болғандықтан WS₂ фазасының таза болуына сенім артуға болады. Осылайша, S 2p көрсеткіштері WS₂ құрамындағы күтілген S²⁻ күйіне сәйкес келеді және композицияның қажетті құрамдас бөлігін растайды [14].

Келесі берілген 1-кестеде материалдың рентген фотоэлектрондық спектроскопиясы (РФС) нәтижелері негізінде анықталған байланыс энергиялары мен оларға сәйкес келетін химиялық байланыстар жөніндегі толық ақпарат ұсынылған. Бұл мәліметтер WS₂@MXene гибридіті құрылымының беткі қабатының элементтік құрамын және химиялық күйін сипаттауға мүмкіндік береді. Анықталған байланыс энергиялары белгілі эталондық мәндермен салыстырылып, Ti–C, W–S, W⁶⁺, W⁴⁺, C–C, C–O, Ti–O, және O–H сияқты химиялық байланыстардың болуын растады. Сонымен қатар, РФС талдауы WS₂ бөлшектерінің MXene бетіне тиімді түрде якорьленгенін және олардың арасында күшті өзара әрекеттесу бар екенін көрсетеді.

Кесте 1 – WS₂/MXene гибридітінің элементтік құрамына сәйкес РФС спектрінің байланыс энергиялары мен химиялық байланыстардың тағайындалуы

РФС спектрінің жоғарғы сәйкестік қорытындысы		
Аумақ	Байланыс энергиясы (эВ)	Тағайындалған
Ti 2p _{3/2} (2p _{1/2})	464,8	Ti–C
	462,4	Ti–F
	459,2	Ti–C
	455,7	Ti–O
C 1S	288,4	Ti–C–Ti
	286,6	C–C
	284,6	C–O
	281,4	C=O

1-кестенің жалғасы

W 4f	43,2	WO _x
	39,6	W-S
	37,5	W-S
	36,2	1T фаза
S 2p	165,2	S-W
	163,4	S-W

Қорытынды

MXene мен WS₂ негізіндегі гибриді нанокұрылым сәтті синтезделіп, оның құрылымдық-морфологиялық ерекшеліктері жан-жақты зерттелді. WS₂@MXene гибриді біртұтас әрі біркелкі құрылым ретінде алынды, ал бұл алдыңғы зерттеулерде жиі қолданылатын физикалық араластыру немесе көпсатылы процестерден айырмашылығы бар. HF қышқылды ортада Ti₃AlC₂ MAX фазасын өңдеу арқылы алынған көпқабатты MXene құрылымы гибриді құрамында сақталғаны байқалды. Рентгендік дифракция нәтижелері MXene-ге тән (002) жазықтығының дифракциялық шыңы төменгі бұрышқа ығысқанын көрсетті, бұл қабатаралық қашықтықтың артқанын білдіреді. Сонымен қатар, WS₂ фазасының гексагональды құрылымы айқын тіркеліп, бөгде фазалардың болмауы синтездің жоғары селективтілігін растады. СЭМ талдауы MXene парақтарының «аккордеон» тәрізді жинақталған күйін және олардың араларында WS₂ наноқабатшаларының орналасқанын көрсетті. РФС (рентген фотоэлектрондық спектроскопия) элементтік талдау нәтижелері бойынша Ti₃C₂ MXene және WS₂ материалдарының негізгі элементтері – Ti, C, W және S – гибриді құрамында табылып, күтілген құрам расталды. Синтезделген WS₂@MXene материалы күрделі иерархиялық нанокұрылыммен сипатталады. WS₂ негізіндегі наногүл шоғыры мен наножіпшелер MXene қабаттарымен бірге үш өлшемді «қаңқа» тәрізді тор түзіп, үлкен меншікті беткі аудан қалыптастырады. Мұндай құрылым электрон тасымалдау үшін тиімді жолдар ұсынып, белсенді каталитикалық орталардың санын арттырады. WS₂@MXene гибриді жоғары электрөткізгіштікке, үлкен беткі ауданға және қабатты құрылымға ие болғандықтан, оны суперконденсаторлар мен аккумуляторлардағы электрод ретінде, газ және химиялық сенсорларда, фотокатализ және күн сәулесін түрлендіру жүйелерінде, сондай-ақ икемді электрондық құрылғылар мен жабындарда қолдану мүмкіндігі бар.

Нәтижесінде гибридің электрондық, оптикалық және каталитикалық қасиеттері жеке компоненттермен салыстырғанда едәуір жақсарғаны анықталды. WS₂@MXene материалы практикалық тұрғыдан сутек энергиясын өндіруге арналған тиімді электрокатализатор, жоғары сыйымдылықты суперконденсатор және сезімтал газ сенсоры тәрізді құрылғыларда қолдануға жарамды. Бұл зерттеу нәтижелері 2D материалдар негізінде жоғары тиімді композициялық наноматериалдарды әзірлеуге жол ашып, оларды таза энергия және сенсорика салаларында пайдалануға елеулі үлес қосады.

Қаржыландыру туралы ақпарат: Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің BR21881954 нөмірлі «Тиімді фотокаталитикалық электродтарды, фото және газға сезімтал сенсорларды жасау үшін нанокұрылымды материалдарды синтездеу технологияларын әзірлеу» гранты аясында жүзеге асырылды.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Chen H. et al. The Recent Progress of Two-Dimensional Transition Metal Dichalcogenides and Their Phase Transition. Cryst., 12 (10), 1381 (2022).
- 2 Joseph S. et al. A review of the synthesis, properties, and applications of 2D transition metal dichalcogenides and their heterostructures. Mater. Chem. Phys., 297, 127332 (2023).

- 3 Wilson J.A., Yoffe A.D. The transition metal dichalcogenides discussion and interpretation of the observed optical, electrical and structural properties. *Adv. Phys.*, 18 (73), 193–335 (1969).
- 4 Cheng K. et al. Research Progress on Ammonia Sensors Based on Ti_3C_2Tx MXene at Room Temperature: A Review. *Sensors*. P. 4465 (2024).
- 5 Zhang A. et al. MXene-Based Nanocomposites for Energy Conversion and Storage Applications. *Chem.*, 26 (29), 6342–6359 (2020).
- 6 Tekalgne M.A. et al. MXene Hybrid Nanosheet of WS_2/Ti_3C_2 for Electrocatalytic Hydrogen Evolution Reaction. *ACS Omega*. American Chemical Society, 8 (44), 41802–41808 (2023).
- 7 Sardana S. et al. WS_2 nanosheets decorated multi-layered MXene based chemiresistive sensor for efficient detection and discrimination of NH_3 and NO_2 . *Sensors Actuators B Chem.*, 394, 134352 (2023).
- 8 Somveer et al. Enhanced structural, morphological and optical properties of WS_2 nanorods synthesized via hydrothermal methodology. *Mater. Sci. Eng. B.*, 313 (2025).
- 9 Nayak A.K. et al. Facile Synthesis of N-Doped WS_2 Nanosheets as an Efficient and Stable Electrocatalyst for Hydrogen Evolution Reaction in Acidic Media. *Catal.*, 10 (11), 1238 (2020).
- 10 Huang F., Jian J.K., Wu R. Few-layer thick WS_2 nanosheets produced by intercalation/exfoliation route. *J. Mater. Sci.*, 51 (22), 10160–10165 (2016).
- 11 Iqbal M.A. et al. Ti_3C_2 -MXene/Bismuth Ferrite Nanohybrids for Efficient Degradation of Organic Dyes and Colorless Pollutants. *ACS Omega*. American Chemical Society, 4 (24), 20530–20539 (2019).
- 12 Adomaviciute-Grabusove S. et al. Monitoring Ti_3C_2Tx MXene Degradation Pathways Using Raman Spectroscopy. *ACS Nano*. American Chemical Society, 18 (20), 13184–13195 (2024).
- 13 Yang W. et al. Covalently Sandwiching MXene by Conjugated Microporous Polymers with Excellent Stability for Supercapacitors. *Small Methods*. John Wiley and Sons Inc, 4 (10) (2020).
- 14 Villamayor M.M.S. et al. Wafer-sized WS_2 monolayer deposition by sputtering. *Nanoscale*. Royal Society of Chemistry, 14 (17), 6331–6338 (2022).
- 15 Rozmysłowska-Wojciechowska A. et al. Influence of modification of Ti_3C_2 MXene with ceramic oxide and noble metal nanoparticles on its antimicrobial properties and ecotoxicity towards selected algae and higher plants (2019).

¹Отунчи Е.,

магистр, ФТИ инженер, ORCID ID: 0009-0006-4361-8099, e-mail: e.otunchi@sci.kz

^{1*}Шонгалова А.,

PhD, ФТИ старший научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,

*e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

¹Умирзаков А.,

докторант, ФТИ старший научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-0941-0271,

e-mail: a.umirzakov@sci.kz

¹Бондарь Е.,

PhD, ФТИ старший научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0001-6745-5462,

e-mail: bondar@sci.kz

¹Дмитриева Е.,

к.ф.-м.н., профессор, ORCID ID: 0000-0002-1280-2559, e-mail: e.dmitrieva@sci.kz

¹Кемелбекова А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-4813-8490, e-mail: a.kemelbekova@sci.kz

²Токмолдин Н.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0663-0228, e-mail: tokmoldin@pdi-berlin.de

¹Физико-технический институт, Сатпаев университет, г. Алматы, Казакстан

²Институт физики и астрономии, Потсдамский университет, г. Потсдам, Германия

ПОЛУЧЕНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ WS_2 И MXENE И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ

Аннотация

В данной работе рассмотрена проблема синтеза гибридной наноструктуры на основе $WS_2@MXene$ и комплексного исследования ее структурных свойств. Материал $WS_2@MXene$ получен двухэтапным методом. Сначала фаза Ti_3AlC_2 MAX была обработана фтористоводородной кислотой с получением слои-

стого материала Ti_3C_2 MXene, затем гидротермальным методом были синтезированы наноструктуры WS_2 и два компонента были объединены ультразвуковым перемешиванием. Образцы, полученные в результате синтеза, были изучены с помощью методов дифракции рентгеновских лучей, сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Данные дифракции рентгеновских лучей подтвердили увеличение гексагональной структуры фазы WS_2 и межслойного пространства MXene. На изображениях морфологии были четко видны лепестки WS_2 , встроенные в листочки MXene, а результаты исследования химической связи уточнили необходимый элементный состав гибрида. Синтезированный материал имеет иерархическую структуру, состоящую из сложных нанотрубок и нанопроволок. Такая структура обеспечивает высокую удельную площадь поверхности, эффективный перенос электронов и увеличение количества активных каталитических сред. Гибрид WS_2 @MXene является многообещающим материалом для систем хранения энергии, реакций водородной эволюции и датчиков обнаружения газа.

Ключевые слова: MXene, дисульфид вольфрама, гибридная наноструктура, иерархическая наноструктура, двумерные материалы.

¹Otunchi E.,

MTechSc., engineer at IPT, ORCID ID: 0009-0006-4361-8099, e-mail: e.otunchi@sci.kz

^{1*}Shongalova A.,

PhD, Senior Researcher at IPT, ORCID ID: 0000-0002-7352-9007,

*e-mail: shongalova.aigul@gmail.com

¹Umirzakov A.,

PhD student, Senior Researcher at IPT, ORCID ID: 0000-0002-0941-0271,

e-mail: a.umirzakov@sci.kz

¹Bondar E.,

PhD, Senior Researcher at IPT, ORCID ID: 0000-0001-6745-5462, e-mail: bondar@sci.kz

¹Dmitriyeva E.,

Cand. Phys-Math. Sc., Professor, ORCID ID: 0000-0002-1280-2559, e-mail: e.dmitrieva@sci.kz

¹Kemelbekova A.,

PhD, ORCID ID: 0000-0003-4813-8490, e-mail: a.kemelbekova@sci.kz

²Tokmoldin N.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0663-0228, e-mail: tokmoldin@pdi-berlin.de

¹ Institute of Physics and Technology, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

² Institute of Physics and Astronomy, University of Potsdam, Potsdam, Germany

PREPARATION OF HYBRID NANOSTRUCTURES BASED ON WS_2 AND MXENE AND STUDY OF THEIR STRUCTURAL PROPERTIES

Abstract

In this paper, the problem of synthesis of a hybrid nanostructure based on WS_2 @MXene and a comprehensive study of its structural properties is considered. The WS_2 @MXene material was obtained using a two-stage method. First, the Ti_3AlC_2 MAX phase was treated with hydrofluoric acid to obtain Ti_3C_2 MXene layered material, then WS_2 nanostructures were synthesized by hydrothermal method and the two components were combined by ultrasonic mixing. The samples obtained as a result of the synthesis were studied using X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and X-ray photoelectron spectroscopy. X-ray diffraction data confirmed an increase in the hexagonal structure of the WS_2 phase and the MXene interlayer space. The morphology images clearly showed the WS_2 petals embedded in MXene leaflets, and the results of the chemical bond study clarified the necessary elemental composition of the hybrid. The synthesized material has a hierarchical structure consisting of complex nanotubes and nanowires. This structure provides a high specific surface area, efficient electron transfer, and an increase in the number of active catalytic media. The WS_2 @MXene hybrid is a promising material for energy storage systems, hydrogen evolution reactions, and gas detection sensors.

Keywords: MXene, tungsten disulfide, hybrid nanostructure, hierarchical nanostructure, two-dimensional materials.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 01.07.2025

ӘОЖ 537.523.527.662.111.1
FTAMP 29.19.22

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-313-323>

^{1,2}**Накысбеков Ж.Т.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0002-3419-6908,
e-mail: jhasulan@gmail.com
^{1,2}**Жумадилов Б.Е.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0001-5784-3840,
e-mail: zhumadilovbe@gmail.com
^{1,2*}**Партизан Г.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0002-1989-8282,
e-mail: gulmira.partizan@gmail.com
^{1,2}**Исмаилов Д.В.,**
PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,
e-mail: ismailov_daniyar_v@bk.ru
¹**Грищенко В.Ф.,**
физ.-мат.ф.к., ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,
e-mail: labreab@mail.ru
²**Суюндыкова Г.С.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0002-5221-4233,
e-mail: gulnura_87_05@mail.ru
²**Медянова Б.С.,**
магистр, ORCID ID: 0000-0002-9160-4357,
e-mail: medyanova.b@spaceres.kz
³**Алиев Б.А.,**
физ.-мат.ф.д., ORCID ID: 0000-0003-2448-8074,
e-mail: aliyevb72@gmail.com
⁴**Мерейхан Л.,**
магистр, ORCID ID: 0009-0001-6744-6563,
e-mail: Lazka_89_89@mail.ru

¹«Ионосфера институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті,
Алматы қ., Қазақстан

³Алматы технологиялық университеті,
Алматы қ., Қазақстан

⁴Қ. Құлажанов атындағы ҚазТБУ,
Астана қ., Қазақстан

ҒАРЫШ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА ҚОЛДАНУҒА АРНАЛҒАН ГРАФЕН НАНОҚҰРЫЛЫМДАРЫНЫҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Аңдатпа

Бұл мақалада ғарыштық техникаларда қолдануға арналған графен нанокұрылымдарының синтезі және олардың трибологиялық қасиеттері талқыланады. Мақалада газдық фазадан химиялық тұндыру (CVD) әдісімен графен синтезі бойынша жүргізілген эксперименттердің нәтижелері ұсынылған. Жоғары сапалы графен алу үшін оңтайлы технологиялық параметрлерді анықтау мақсатында жүргізілген тәжірибелер сериясының нәтижесінде температура (1000°C) және газ қатынасы (0,5/200 см³/мин) сияқты синтездің

оңтайлы параметрлері анықталды. Сондай-ақ, синтезделген нанокұрылымдардың жоғары сапасын және олардың біртекті таралғандығын растайтын сканерлеуші электронды микроскопия (SEM) әдісімен алынған нәтижелер ұсынылған. Нанокұрылымның сапасын бағалау мақсатында жүргізілген Раманов спектроскопиясының нәтижесі бойынша синтезделген нанокұрылымның графен екендігі және I2D/IG қатынасы 1,89-ға тең екендігі анықталды. Талдауларға сәйкес синтезделген графендер бір қабатты екендігі көрсетілді. Трибологиялық тәжірибелер нәтижесі бойынша графен жабыны кәдімгі болатпен салыстырғанда үйкеліс коэффициентін айтарлықтай төмендететіні анықталды. Алынған нәтижелерді талдай отырып, майлау материалдарын қолданған жағдайда да, құрғақ үйкеліс жағдайында да графен жабынының үйкелісті азайтудағы тиімділігі көрсетілді. Бұл трибологиялық жүйелердің жұмысын жақсартуға және қызмет ету мерзімін ұзартуға пайдалы. Әрі қарайғы зерттеулердің міндеті – синтез әдістерін жетілдіру және ғарыш жағдайында графен нанокұрылымдарының тұрақтылығын бағалау.

Тірек сөздер: графен, көміртекті нанокұрылымдар, ғарышқа арналған материалдар, газ фазасынан термиялық-химиялық тұндыру.

Кіріспе

Ғарыштық техника шектен тыс жоғары және төмен температуралар, радиация және атмосфераның болмауы сияқты бірегей қиындықтарға тап болып жатады. Мұндай жағдайлар ғарыш аппараттарының сенімділігі мен ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ете алатын жаңа материалдарды әзірлеуді талап етеді. Осы тұрғыда графендік нанокұрылымдар өздерінің бірегей қасиеттерінің арқасында ғарыш техникасында қолдануға аса перспективалы материалдардың бірі болып саналады. Оларды пайдалану ғарыш аппараттарының сипаттамаларын айтарлықтай жақсартуы мүмкін, соның ішінде: беріктік, жеңілдік, коррозия мен үйкеліске төзімділік.

Шынында да, графен болаттан 200 есе мықты және 100 есе берік. Оның үстіне, қазіргі таңда әлемдегі ең жақсы электр және жылу өткізгіш, сондай-ақ иілгіш, мөлдірлікке ие, тұрақты және су өткізбейтін және вакуумдағы кез келген материалдың ең жоғары балку температурасына ие.

Шын мәнінде, графен болаттан 200 есе мықты және 100 есе берік. Сонымен қатар, ол ең жақсы электр және жылу өткізгіш, сондай-ақ иілгіш, мөлдір, тұрақты, өткізбеуші, және вакуум жағдайындағы балку температурасы ең жоғары материал болып табылады. Бұл қасиеттері графен негізіндегі материалдардың қазіргі таңда атқарылып жатқан және болашақ ғарыш миссияларының талаптарына толық сәйкес келетінін дәлелдейді. Себебі мұндай миссияларға шамадан тыс қызуға, радиацияға және соққыға төтеп бере алатын, сонымен қатар функционалдық тұтастығын жоғалтпайтын материалдар қажет [1].

Ғарыш миссияларының компоненттері мен құрылымдарында қолданылатын материалдар бастапқы жер үсті сынақтары мен біліктілік рәсімдері кезінде жоғары кернеулерге ұшырайды. Ұшу мен ұшыру кезеңдерінде бұл материалдар қатты дірілдерге, соққы толқындарына, ауырлық күштерінің өзгерістеріне және жоғары температуралық градиенттерге тап болады. Орбитада материалдарға ғарыш вакуумы, ғарыштық радиация, күн желі, атомарлық оттегі, плазмалық зарядталу, микрометеориттер мен ғарыштық қоқыс кері әсер етеді. Жер маңындағы орбитада орналасқан ғарыш кемесінің материалдары -180°C -тан $+180^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі температураға, басқа планеталарға жақын орналасқандары -200°C -қа дейінгі, ал күнге жақын орналасқандары 520°C -тан жоғары температураға ұшырайды.

Осындай қолайсыз факторлардың әсерінен көптеген дәстүрлі материалдар өздерінің құрылымдық және функционалдық қасиеттерінің бұзылуына ұшырайды. Осы орайда, жаңа, озық және болашағы зор жасанды материал – графен ерекше маңызға ие. Графен ашылған сәттен бастап ол ғарыш саласындағы көптеген мәселелерді шешуге үлкен мүмкіндік беретінін көрсетті [2].

Жұлдызаралық шаң мен планеталық атмосфераны астрономиялық бақылаулар, сондай-ақ комета, астероид және метеорит құрамдас бөліктерін талдау бұл жасанды жоғары тех-

нологиялық материалдың табиғи түрде пайда болатын нанокұрылым [2] екенін, жұлдызаралық көміртегінің жалпы көлемінің $\sim 1,9\%$ құрайтынын көрсетті [3,4].

Новоселов және т.б. зерттеулері [5] 2D графен жұптары жоғары қаттылықпен (1 ТПа), жоғары созылу беріктігімен (130 ГПа) және жоғары электрлік ($350\,000\text{ см}^2/\text{В с}$) және жылу өткізгіштікпен ($5,3\text{ кВт/м К}$) өте төмен массалық тығыздықты қамтитынын атап өтті. Өкінішке орай, мұндай керемет қасиеттер тек жоғары сапалы бір қабатты графенмен ғана көрсетіледі, бұл таңғажайып материал осы уақытқа дейін күрделі әдістерді қолдана отырып, аз мөлшерде өндірілуі мүмкін [6].

Осы тамаша қасиеттерді толық пайдаланудың міндетті шарты жоғары сапалы графенді өндіру болып табылады. Графенді микромеханикалық қабыршақтау [7], газдық фазадан химиялық тұндыру (CVD) [8–11], тотығу-тотықсыздану процесі [12], солвотермиялық әдіс [13] және т.б. жолдармен алуға болатыны белгілі. Бұл синтездеу әдістерінің ішінде жоғары сапалы, біркелкі, үлкен пленкалы қабықшаларды ауқымды өндіруге қойылатын талаптарды тек CVD әдісі қанағаттандыра алады.

CVD әдісінде графен жоғары температурада метан, этилен, ацетилен және бензол сияқты әртүрлі көмірсутекті газдардың әсерінен көміртеппен қанықтыру арқылы әртүрлі өтпелі металл субстраттарында, мысалы, Ni, Cu және т.б. тікелей синтезделеді. Осы металдардың ішінде мыс фольгасының жоғары балқу температурасы, төмен көміртегі атомын сіңіру жылдамдығы, төмен баға және қайта өңдеу сияқты айқын артықшылықтары бар. Дегенмен, графеннің өсуіне мыс фольгасының беткі жағдайы үлкен әсер ететіні белгілі. Жоғары сапалы графен пленкаларын өсіру үшін графенді алу алдында олардың бетінің күйін оңтайландыру үшін мыс фольгасының субстраттарына көптеген алдын ала өңдеу әдістері қолданылды [8–11].

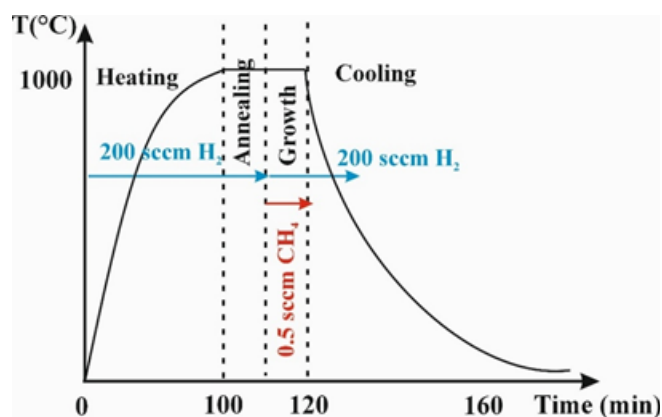
Бұл жұмыста графендік нанокұрылымдарды газ фазасынан термиялық-химиялық тұндыру әдісімен синтездеу бойынша жүргізілген эксперименттердің нәтижелері ұсынылған.

Материалдар мен әдістер

Графен нанокұрылымдарының синтезі көлденең үш аймақты құбырлы пештің көлемінде жүргізілді. Графен нанокұрылымдарын синтездеуге арналған қондырғының схемасы 1-суретте көрсетілген.

Ғарыш кеңістігінде пайдалану үшін графен нанокұрылымдарын синтездеу әдістемесін жасау үшін әртүрлі эксперименттік параметрлері бар бірнеше эксперименттер сериясы жүргізілді. Графеннің өсуіне субстрат-катализатор ретінде қалыңдығы 200 мкм, ауданы 1 см^2 және тазалығы 99,99% мыс фольга пайдаланылды. Буферлік газ ретінде сутегі, ал көміртегі көзі ретінде метан пайдаланылды. Тәжірибелер сериясының нәтижелері бойынша жоғары сапалы графенді синтездеу үшін оңтайлы температура белгіленді. Оңтайлы синтез температурасы $1000\text{ }^\circ\text{C}$ болды. Тәжірибелердің ұзақтығы 10 минут. Газ қатынасының оңтайлы мәнін анықтау үшін әртүрлі параметрлері бар тәжірибелер де жүргізілді. Газ қатынасының оңтайлы мәні $0,5/200\text{ см}^3/\text{мин}$ болды [12].

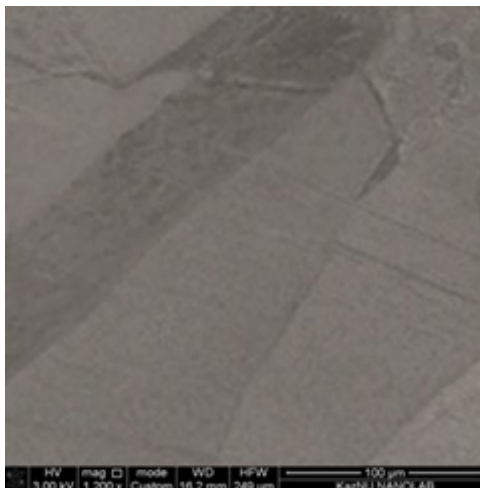
Мыс фольга үлгісін керамикалық қайыққа салып, реакторға орнатқаннан кейін реактор камерасы 10^{-2} Торр қысымға дейін сорылып алынды, содан кейін пешті қыздыру процесі басталды, қыздыру жылдамдығы 100 C/мин , қыздыру H_2 ағынында жүргізілді. Синтез температурасына жеткенде жүйе тұрақтандырылды және үлгі мыстың орташа түйіршікті мөлшерін арттыру мақсатында H_2 ағынының жылдамдығын өзгертпей $t=10$ мин жұмсартылды. Осыдан кейін реактор камерасына $0,5\text{ sccm}$ ағын жылдамдығымен метан жіберілді. Синтездеу уақытынан кейін пеш H_2 200 sccm ағынында табиғи түрде салқындатылды. Кейін үлгі түтіктің салқын бөлігіне ауыстырылып, содан кейін шығарылды. Синтез процесінің жалпы схемасы 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 – Графен нанокұрылымдарын синтездеу процесі

Нәтижелер мен талқылау

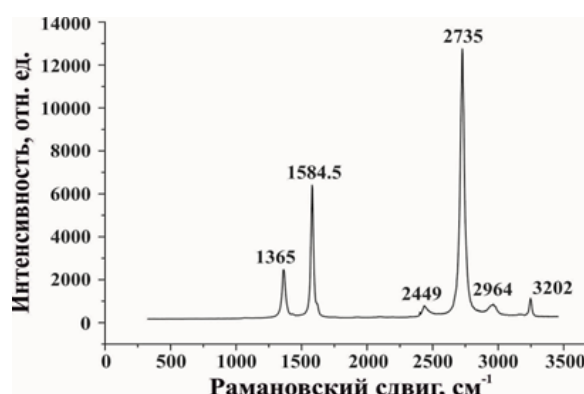
Алынған үлгілер сканерленген электрондық микроскопия (SEM) арқылы зерттелді. Үлгілерді зерттеу Quanta 3D 200i микроскопының көмегімен Ашық үлгідегі ұлттық нанотехнологиялар зертханасында жүргізілді.

Сурет 2 – Қалыңдығы $d=200$ мкм болатын мыс фольгасында синтезден нанокұрылымның SEM бейнесі

Төменде 1000°C температурада, газ қоспасының қатынасы (CH_4/H_2) $0,5/200$ $\text{cm}^3/\text{мин}$ және әртүрлі қалыңдықтағы мыс фольгаларымен жүргізілген тәжірибенің нәтижесі берілген.

SEM кескіндерін талдау арқылы 200 қалыңдықтағы мыс фольгаларында алынған субстраттардың бетінде біртекті таралған пленкаларды байқауға болады. Сонымен қатар, SEM кескіндерінен беттік қабатта қараңғы және ашық аймақтардың кездесетінін байқауға болады, бұл пленка қабаттарының бар екенін және олардың қабаттық құрылымын көрсетеді.

Графен нанокұрылымдарының сапасы, сондай-ақ қабаттар саны NTEGRA Spectra қондырғысында алынған Раман спектрлерін талдау негізінде бағаланды. Сызықтар толқын ұзындығы 473 нм болатын көк лазермен қоздырылды. 3-суретте графен нанокұрылымының Раман спектрлері көрсетілген.



Сурет 3 – Графендік наноқұрылымның ЖКШ спектрі

Суреттен спектрде көміртекке тән негізгі D және G шыңдары тиісінше 1365 және 1584,5 см^{-1} аймағының байқалатыны көрінеді. Спектрдің жоғары жиілікті аймағында екінші ретті D', 2D және D + G шыңдары байқалады, олар сәйкесінше 2449, 2735 және 2964 см^{-1} аралығында орналасқан. Бұл шыңдардың болуы графеннің бар екенін көрсетеді. 2D және G шыңдарының интенсивтіліктерінің қатынасы (I_{2D}/I_G) мен 2D шыңының жартылай максимум деңгейіндегі толық ендігі (FWHM) графен сапасын бағалаудың маңызды параметрлері болып табылады [13, 14]. Сондай-ақ, I_{2D}/I_G қатынасы бойынша графен қабаттарының санын анықтауға болады. Әдетте, I_{2D}/I_G қатынасы моноқабатты графен үшін 2–3, екі қабатты графен үшін $2 > I_{2D}/I_G > 1$, ал көпқабатты графен үшін $I_{2D}/I_G < 1$ мәндерінде болады [15, 16]. Раман спектрлерін талдай отырып, қалыңдығы 200 мкм болатын мыс фольгада алынған графен пленкалары ең аз ақауларға ие екенін көруге болады. Осыған сәйкес I_{2D}/I_G қатынасы 1,89 құрады, бұл бір қабатты графенге тән жоғары көрсеткіш болып табылады. Сонымен қатар, 2D шыңының пішіні симметриялы және толық ені жартылай максимум деңгейінде (FWHM) шамамен 30–35 см^{-1} аралығында, бұл да бір қабатты графеннің тағы бір дәлелі ретінде қарастырылады. Жалпы алғанда, алынған Раман спектрі жоғары сапалы, бір қабатты графен құрылымының түзілгенін көрсетеді.

Трибологиялық зерттеулер

Алынған үлгілердің үйкеліс жағдайында тозуын сынауды жүргізу үшін үлгіні бөлек дайындау қажет болады. Трибологиялық қасиеттерді зерттеу мақсатында графеннің өте жұқа қабаттарын басқа материалдар мен негіздер бетіне көшіру ылғалды өңдеу ерітінді әдісі арқылы іске асырылады. Графен синтездеу үшін мыс фольгасының бетін бірнеше сағат бойы ерітінді ішінде ұстады. Мысты жартылай өңдеу процесінен кейін қалған бөлік пинцетпен алынып, ал графеннің жұқа мөлдір қабатын өңдеу үшін ертінді бетінде бірнеше сағат ұстап, мыс қалдықтарынан тазартылды. Өңдеу ерітіндісі ретінде 3 г/мл, FeCl_3 сулы ерітіндісі қолданылды. Содан кейін осы қабаттар қалыңдығы 2 мм және диаметрі 58 мм болатын болат материалдың бетіне отырғызылды.

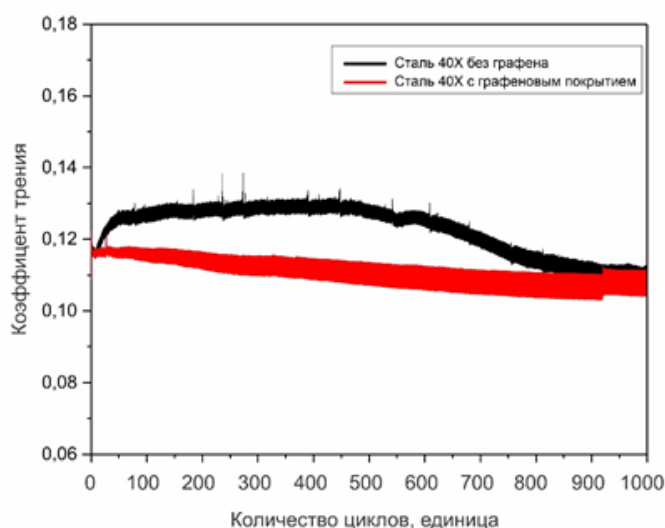
Үлгілердің трибологиялық сипаттамалары «дисктегі шар» схемасы бойынша, бөлме температурасында, майлаусыз (құрғақ үйкеліс) және майлаумен сынақтан өткізілді.

Құрғақ үйкеліс жағдайында трибологиялық сипаттамалары

Сынақтың шарттары келесідей болды: үлгінің қарсы денеге қатысты қозғалу жылдамдығы – 1 см/с, жүктеме – 100 мН, үйкеліс жолының радиусы – 16 мм, үйкеліс жолының ұзындығы – 1000 цикл. Қарсы дене ретінде 3 мм диаметрі бар 100Cr6 маркалы болат шар қолданылды. Сынақ шарттары халықаралық ASTM G99-959 стандарттарына сәйкес келді. 5-суретте 40X болатының және графенмен қапталған болаттың құрғақ үйкеліс жағдайындағы үйкеліс коэффициентінің (ҮК) өзгеру графигі ұсынылған. Алынған деректерді талдай отырып, графендік жабынды қолдану болаттың үйкеліс коэффициентін төмендететіні туралы қорытынды жасауға болады. Графенсіз 40X болатында сынақтың алғашқы кезеңдерінде 100

циклға дейін ҮК артады, бұл беттің қаттылығына байланысты болуы мүмкін. Кейіннен ҮК арта түсіп, 500–600 циклдан кейін 0.15–0.16 диапазонында шындық мәндерге жетеді, бұл өз кезегінде үйкелістің прогрессивті тозуы мен ауданының ұлғаюымен байланысты болуы мүмкін. 600 циклдан кейін ҮК төмендеуі байқалады, бұл шаршау тозуымен және бет күйінің тұрақтануымен түсіндіріледі. Ал графендік жабынмен 40Х болатында ҮК мәндері сынақтың барлық уақытында айтарлықтай тұрақты болады және 0.11–0.12 диапазонында сақталады. Бұл эффект графеннің майлау қасиеттерімен түсіндіріледі. Графеннің екі өлшемді қабатты құрылымы оның қабаттарының бір-біріне қатысты оңай сырғуына ықпал етеді, бұл үйкелісті және беттің тозуын азайтады.

[17] зерттеулер графенді жабындардың ҮК әдетте 0.05–0.15 арасында өзгеретінін көрсетті, бұл деректер зерттеу нәтижелеріне сәйкес келеді және графеннің ұзақ циклдерде де төмен үйкеліс деңгейін сақтайтынын көрсетеді. Сынақтың барлық уақытында графеннің тұрақты көрсеткіштері оның жоғары тозуға төзімділігін растайды. Бұл басқа зерттеулердің нәтижелерімен [18] сәйкес келеді, онда графен бірнеше рет салынған жүктемелердің әсерінен бетке зақым келтірмеуді және адгезияны болдырмауды қамтамасыз етті. Berman et al. [17] зерттеулері графенді жабындар құрғақ үйкеліс жағдайында ҮК -нің 0.01–0.03 аралығына дейін төмендететінін көрсеткен, бұл графиктегі деректермен сәйкес келеді. Графен үйкелісті айтарлықтай төмендетеді және беттің зақымдануын минимизациялайды, бұл жоғары жүктемелер мен ұзақ циклдар жағдайында әсіресе маңызды.



Сурет 4 – Құрғақ үйкеліс жағдайында 40Х болатының және графенмен қапталған болаттың үйкеліс коэффициенті

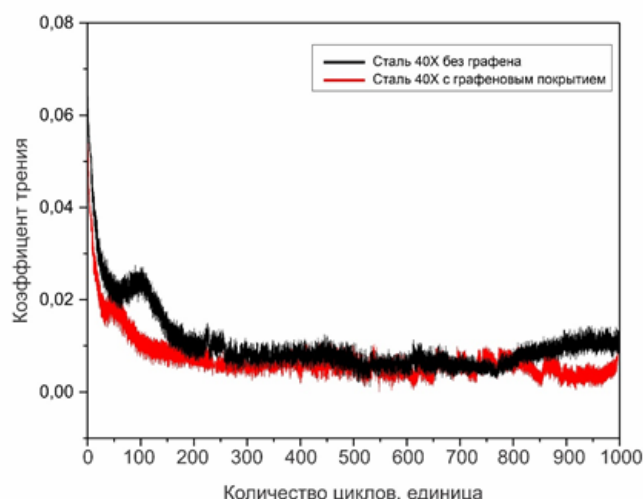
Майлаудың үйкеліс жағдайындағы трибологиялық сипаттамалары

Сынақтың шарттары құрғақ үйкеліс жағдайымен бірдей болды. Майлау ретінде ТМ-5-18 API GL-5 маркалы трансмиссионды май қолданылды. 5-суретте 40Х болатының майлау жағдайындағы және графенмен қапталған болаттың ҮК өзгеруі көрсетілген. Майлаудың әсерін қарастырсақ, нәтижелер әртүрлі болуы мүмкін, себебі майлағыш материал әдетте жанасушы беттерді бөлетін қабат қалыптастырады және ҮК дәстүрлі майлар үшін 0.01–0.02 мәндеріне дейін төмендетеді [19].

Графенмен қапталмаған болат үшін майлау жағдайында ҮК құрғақ үйкеліс нәтижелеріне карағанда төмендеуі мүмкін. Алайда, ұзақ үйкеліс кезінде майлау материалдары қышқылдану, тозу өнімдерінің ластануы немесе жергілікті артық қыздыру салдарынан тиімділігін жоғалтуы мүмкін [20].

Графенмен қапталаған болаттың, тіпті майлау қолданылған жағдайда да, үйкелісті одан әрі төмендету күтіледі, себебі графен қосымша майлау қабаты ретінде әрекет ете алады, бұл майлағыш материалдың бетке адгезиясын жақсартады [17].

Song et al [19] графен негізіндегі наноматериалдардан жасалған майлағыштарды қолдану, әсіресе жоғары температуралар мен қысым жағдайында ҮК 0.005–0.015 мәндеріне дейін қосымша төмендетуі мүмкін екенін атап өтті. Графенмен қапталмаған болат үшін 600 циклдан кейін ҮК -нің айтарлықтай өсуі байқалады, бұл прогрессивті тозумен байланысты. Бұл әсіресе жоғары жүктемелер жағдайында, үйкеліс кезінде бөлшектердің жұмыс сипаттамаларының төмендеуіне әкелуі мүмкін.



Сурет 5 – Майлау үйкеліс жағдайындағы 40X болатының және графенмен қапталаған болаттың үйкеліс коэффициенті

Графенмен қапталған болат жоғары тозуға төзімділігін көрсетіп, 1000 циклдан кейін де тұрақты ҮК мәндерін сақтайды, бұл материалдардың әсіресе трибологиялық жүйелерде қызмет ету мерзімін ұзартуға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Графенді наноқұрылымдарды ғарыш кеңістігінде қолдану үшін синтез әдісін әзірлеу мақсатында түрлі эксперименттік параметрлермен бірнеше сериялы эксперименттер жүргізілді.

Жүргізілген эксперименттер нәтижелері бойынша жоғары сапалы графен синтезі үшін оңтайлы температура анықталды және 1000°C болып табылады. Газдар арақатынасын анықтау үшін де түрлі параметрлермен тәжірибелер жүргізілді. Оңтайлы газдар арақатынасы $0,5/200 \text{ см}^3/\text{мин}$ болып шықты.

СЭМ зерттеулерінің нәтижелері көрсеткендей, 200 мкм қалыңдықта мыс фольгасына синтезделген үлгілердің беті толық жабылған пленкалар екендігі байқалды.

Раман спектроскопиясының нәтижесі бойынша синтезделген наноқұрылымның графен екендігі және I_{2D}/I_G қатынасы 1,89 тең екендігі анықталды. Талдауларға сәйкес синтезделген графендер бір қабатты екенін көрсетті.

Трибологиялық тәжірибелер нәтижесі бойынша, графен жабыны 40X болатының үйкеліс коэффициентін сынақтың бастапқы кезеңінде 0,07-ден 0,04-ке дейін төмендететінін және 100 циклден кейін 0,015–0,02 деңгейінде тұрақтанатынын көрсетеді. Графен жабынсыз болаттың үйкеліс коэффициенті 0,06–0,07 аралығынан 0,025–0,035 дейін төмендейді, бірақ ол үлкен тербелістерді көрсетеді және 600 циклден кейін артады.

Майлау материалдарын қосқанда, үйкеліс коэффициенті өңделмеген болат үшін қосымша түрде 0,01–0,02 дейін төмендеуі мүмкін, ал Графенмен қапталмаған болат үшін 0,005–0,015 дейін. Бұл нәтижелер Майлау материалдарын қолданған жағдайда да, құрғақ үйкеліс жағдайында да графен жабынының үйкелісті азайтудағы тиімділігін көрсетеді. Бұл трибологиялық жүйелердің жұмысын жақсартуға және қызмет ету мерзімін ұзарту үшін пайдалы.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Зерттеу Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылай қолдауымен жүзеге асырылды (ИРН BR21882375 «Жер және ғарыш сегменттерінің жоғары сенімділікті ғарыштық технологиялар өнімдерін жасау мен жаңғырту және ионосфераны зерттеу»).

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Ghidini, T. Materials for Space Exploration and Settlement. *Nat. Mater.*, 17, 846–850 (2018).
- 2 Chaitanya Giri, T., Steele, A., Fries, M. Evidence for protosolar graphene in Allende and QUE 94366 CV3 meteorites. *Planet. Space Sci.* 2021, 203.
- 3 Merino, P., Svec, M., Martinez, J.I., Jelinek, P., Lacovig, P., Dalmiglio, M., Lizzit, S., Soukiassian, P., Cernicharo, J., Martin-Gago, J.A. Graphene etching on SiC grains as a path to interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons formation. *Nat. Commun.*, 5, 3054 (2014).
- 4 Chen, X.H., Li, A., Zhang, K. On graphene in the interstellar medium. *Astrophys. J.*, 850, 104 (2017).
- 5 Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V., Grigorieva, I.V., Firsov, A.A. Discover of graphene: Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666–669 (2004).
- 6 Bhuyan, M.S.A., Uddin, M.N., Islam, M.M., Bipasha, F.A., Hossain, S.S. Synthesis of graphene. *Int. Nano Lett.*, 6, 65–83 (2016).
- 7 Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D.A., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I.V., Firsov, A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666–669 (2004).
- 8 Yu, Q., Lian, J., Siriponglert, S., Li, H., Chen, Y.P., Pei, S.-S., Siriponglert, S. Graphene segregated on Ni surfaces and transferred to insulators. *Appl. Phys. Lett.*, 93, 113103 (2020).
- 9 Reina, A., Jia, X., Ho, J., Nezich, D., Son, H., Bulovic, V., Dresselhaus, M. S., Kong, J. Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition. *Nano Lett.*, 9, 3087 (2018).
- 10 Kim, K.S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S.Y., Kim, J.M., Kim, K.S., Ahn, J.-H., Kim, P., Choi, J.-Y., Hong, B.H. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 457, 706–710 (2009).
- 11 Li, X., Cai, W., An, J., Kim, S., Nah, J., Yang, D., Piner, R., Velamakanni, A., Jung, I., Tutuc, E., et al. Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils. *Science*, 324, 1312–1314 (2009).
- 12 Partizan G. et al 2016 *Mater. Res. Express* 3 115010.
- 13 Ferrari, A.C., Meyer, J.C., Scardaci, V., Casiraghi, C., Lazzeri, M., Mauri, F., Piscanec, S., Jiang, D., Novoselov, K.S., Roth, S., Geim, A.K. Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers. *Phys. Rev. Lett.*, 97, 187401 (2006).
- 14 Saito, R., Hofmann, M., Dresselhaus, G., Jorio, A., Dresselhaus, M.S. Raman spectroscopy of graphene and carbon nanotubes. <http://www.tandfonline.com/loi/tadp20>.
- 15 Nguyen, V.T., Le, H.D., Nguyen, V.C., Ngo, T.T.T., Le, D.Q., Nguyen, X.N. and Phan, N.M. Synthesis of multi-layer graphene films on copper tape by atmospheric pressure chemical vapor deposition method. *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.*, 4, 035012 (5pp) (2013).
- 16 Ren, Y., Zhu, C., et. al. An improved method for transferring grapheme grown by chemical vapor deposition. *Brief Reports and Reviews.*, 7 (1), 1150001 (6 pp) (2012).
- 17 Berman, D., Erdemir, A., Sumant, A.V. Graphene: A new emerging lubricant. *Materials Today*, 18 (5), 253–264 (2015).

18 Li, H., Xu, T., Zhang, Z. Wear resistance and frictional properties of graphene-based coatings under different conditions. *Wear*, 452, 203–211 (2020).

19 Song, H., Wang, X., Zhou, F. Solid lubricants: Recent developments and applications. *Tribology International*, 129, 333–344 (2018).

20 Fang, L., Cui, Z., Wang, W. Lubrication performance of graphene as a lubricant additive. *Wear*, 384, 119–123 (2017).

^{1,2}**Накысбеков Ж.Т.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-3419-6908,

e-mail: jhasulan@gmail.com

^{1,2}**Жумадилов Б.Е.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0001-5784-3840,

e-mail: zhumadilovbe@gmail.com

^{1,2*}**Партизан Г.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-1989-8282,

*e-mail: gulmira.partizan@gmail.com

^{1,2}**Исмаилов Д.В.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,

e-mail: ismailov_daniyar_v@bk.ru

¹**Грищенко В.Ф.,**

к.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,

e-mail: labreab@mail.ru

²**Суюндыкова Г.С.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0002-5221-4233,

e-mail: gulnura_87_05@mail.ru

²**Медянова Б.С.,**

магистр, ORCID ID: 0000-0002-9160-4357,

e-mail: medyanova.b@spacere.kz

³**Алиев Б.А.,**

д.ф.-м.н., ORCID ID: 0000-0003-2448-8074,

e-mail: aliyevb72@gmail.com

⁴**Мерейхан Л.,**

магистр, ORCID ID: 0009-0001-6744-6563,

e-mail: Lazka_89_89@mail.ru

¹ТОО «Институт ионосферы», г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

³Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан

⁴КазУТБ им. К. Кулажанова, г. Астана, Казахстан

СИНТЕЗ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАФЕНОВЫХ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Аннотация

В этой статье рассматривается синтез графеновых наноструктур и их трибологические свойства для применения в космических технологиях. Приведены результаты экспериментов по синтезу графена методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). В результате серии экспериментов, проведенных с целью получения оптимальных технологических параметров для получения высококачественного графена, определены оптимальные параметры синтеза, такие как температура (1000 °C) и соотношение газов (0,5/200 см³/мин). Также представлены результаты, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), подтверждающие высокое качество синтезированных наноструктур и их однородное распределение. По результатам рамановской спектроскопии, проведенной с целью оценки качества наноструктур, установ-

лено, что синтезированные наноструктуры являются графеном и соотношение I2D/IG равно 1,89. Анализ показал, что полученные графены имеют однослойную структуру. Трибологические эксперименты показали, что графеновое покрытие существенно снижает коэффициент трения по сравнению с обычной сталью. Полученные результаты подтвердили высокую эффективность графенового покрытия как при использовании смазочных материалов, так и в условиях сухого трения. Это открывает возможности для повышения эффективности работы трибологических систем и продления их срока службы. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование методов синтеза и оценку прочностных характеристик графеновых наноструктур в условиях космической эксплуатации.

Ключевые слова: графен, углеродные наноструктуры, космические материалы, термическое химическое осаждение из газовой фазы.

^{1,2}**Nakysbekov ZH.T.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-3419-6908,

e-mail: jhasulan@gmail.com

^{1,2}**Zhumadilov B.E.,**

Master's degree, ORCID ID: 0000-0001-5784-3840,

e-mail: zhumadilovbe@gmail.com

^{1,2*}**Partizan G.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-1989-8282,

*e-mail: gulmira.partizan@gmail.com

^{1,2}**Ismailov D.V.,**

PhD ORCID ID: 0000-0002-6384-1478,

e-mail: ismailov_daniyar_v@bk.ru

¹**Grishchenko V.F.,**

Cand.Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0003-2244-5599,

e-mail: labreab@mail.ru

²**Suyundykova G.S.,**

Master's degree, ORCID ID: 0000-0002-5221-4233,

e-mail: gulnura_87_05@mail.ru

²**Medyanova B.S.,**

Master's degree, ORCID ID: 0000-0002-9160-4357,

e-mail: medyanova.b@spacere.kz

³**Aliyev B.A.**

Dr.Phys.-Math.Sc., ORCID ID: 0000-0003-2448-8074,

e-mail: aliyevb72@gmail.com

⁴**Meirkhan L.,**

Master's degree, ORCID ID: 0009-0001-6744-6563,

e-mail: Lazka_89_89@mail.ru

¹Institute of Ionosphere LLP, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

⁴K. Kulazhanov KazUTB, Astana, Kazakhstan

SYNTHESIS AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GRAPHENE NANOSTRUCTURES FOR USE IN SPACE TECHNOLOGY

Abstract

The synthesis of graphene nanostructures and their tribological properties for applications in space technologies are discussed in this article. The results of experiments on graphene synthesis using the chemical vapor deposition (CVD) method are presented. A series of experiments aimed at determining the optimal technological

parameters for obtaining high-quality graphene identified the optimal synthesis conditions: temperature (1000 °C) and gas ratio (0.5/200 cm³/min). The scanning electron microscopy (SEM) results confirm the high quality of the synthesized nanostructures and their uniform distribution. Raman spectroscopy, performed to assess the quality of the nanostructures, established that the synthesized nanostructures are graphene with an I₂D/IG ratio of 1.89. The analysis showed that the obtained graphene has a monolayer structure. Tribological experiments demonstrated that the graphene coating significantly reduces the coefficient of friction compared to conventional steel. The obtained results confirmed the high efficiency of the graphene coating both when using lubricants and under dry friction conditions. This opens up opportunities for improving the performance of tribological systems and extending their service life. Further research will focus on improving synthesis methods and evaluating the strength characteristics of graphene nanostructures under space operation conditions.

Keywords: graphene, carbon nanostructures, space materials, thermal chemical vapor deposition.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 13.08.2025

МҰНАЙ ГАЗ ИНЖЕНЕРИЯСЫ ЖӘНЕ ГЕОЛОГИЯ
OIL AND GAS ENGINEERING, GEOLOGY
НЕФТЕГАЗОВАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ГЕОЛОГИЯ

ӘОЖ 621.6
ГТАХР 55.69

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-324-339>

^{1,2*}**Иманбаева Н.С.,**

т.ғ.к., ORCID ID: 0000-0001-6889-3421,

*e-mail: imanbaevan@mail.ru

²**Тыныштиков А.А.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0008-5341-043X,

e-mail: aidost307@gmail.com

²**Мусаев М.М.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-6917-4618,

e-mail: mussayevmery@gmail.com

³**Таттимбетова С.Ж.,**

мұғалім, ORCID ID: 0009-0005-2580-7569,

e-mail: saltanattattimbetova1975@gmail.com

⁴**Алғожаева Р.С.,**

аға оқытушы, ORCID ID: 0000-0003-1575-5425,

e-mail: raihan_algozhaeva@mail.ru

¹Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
Алматы қ., Қазақстан

²Сәтбаев университеті, Алматы қ., Қазақстан

³196 жалпы білім беретін мектеп, Алматы қ., Қазақстан

⁴Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті КЕАҚ,
Алматы қ., Қазақстан

ШТАНГАЛЫҚ СОРҒЫ ҚОНДЫРҒЫ ЖЕТЕГІНІҢ
ВАТТМЕТРОГРАММАСЫН ЕСЕПТЕУДІ ТЕҢГЕРУ
РЕЖИМДЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ТИІМДІЛІГІ

Андатпа

Мұнай өндіру саласында тиімділікті жоғарылату мәселесі бүгінгі таңда ерекше маңызға ие. Мақала штангалық сорғы қондырғылары (ШСҚ) арқылы мұнай өндіру барысында энергия тиімділігін арттыру және жұмыс режимдерін оңтайландыру мәселелеріне арналған. Зерттеуде ұңғымадағы мұнай деңгейінің төмендеуін есепке алуға ерекше назар аударылған, себебі бұл фактор гидростатикалық қысым мен сорғыдағы жүктемеге тікелей әсер етеді. ШСҚ жетегінің түрлендіруші механизмінің кинематикалық және кинетостатикалық талдаулары жүргізіліп, олардың нәтижелері негізінде ваттметрограмма есептелді. Бұл

ваттметрограмма энергия тұтынуын бақылауға ғана емес, сонымен қатар қондырғының жалпы тиімділігін арттыру мақсатында тепе-теңдік механизмдері мен жетек жүйелерін дәл реттеуге және олардың әлсіз тұстарын анықтауға мүмкіндік береді. Мұнай деңгейінің төмендеуі жалпы жүктемені азайтып, ваттметрограмма амплитудасының кемуіне алып келеді. Ал динамограмма қуат профиліне жүктемедегі динамикалық тербелістерді қосып, жүйенің жұмысын күрделендіреді. Бұл екі факторды бірлесіп ескеру есептеулерді шынайы етіп, қарсы салмақты дұрыс таңдау, қозғалтқыш қуатын дәл реттеу және ШСҚ жұмысын оңтайландыруда маңызды рөл атқарады. Мақалада ұсынылған нәтижелер нақты II-класты, төрт звенолық, түзу сызықты бағыттаушы түрлендіруші механизммен жабдықталған теңгерімсіз жетекті ШСҚ-да орнатылған электромотор мен редуктор сипаттамаларын ескере отырып алынған.

Тірек сөздер: штангалық сорғы қондырғысы (ШСҚ), түрлендіруші механизм, кинематика, кинестатика, айналдырушы момент, қуат, ваттметрограмма.

Кіріспе

Штангалық сорғы қондырғысы жетегінің ваттметрограммасын есептеу – оның жұмысын оңтайландыру мен энергия тиімділігін арттырудың маңызды міндеттерінің бірі. Ваттметрограмма – уақыт, жиілік немесе басқа факторларға байланысты штангалық сорғы жетегінің қуат тұтынуын сипаттайтын график. Бұл диаграмма сорғы жұмысы барысында қуат өзгерістерін талдауға, сондай-ақ жүйенің әлсіз тұстарын анықтауға мүмкіндік береді. Мысалы, энергияны шамадан тыс тұтыну немесе тиімсіз жұмыс режимдері сияқты жағдайлар айқын көрінеді. Штангалық сорғы қондырғысы ұнғымалардан сұйықтықты көтеру үшін қолданылады. Оның құрамына электр қозғалтқыш, штангалық механизм, сондай-ақ теңгеру жүйесі (мысалы, қарсы салмақ немесе дірілді азайтатын құрылғылар) кіреді. Қондырғының тиімді жұмысы істеуі айналу жиілігіне, қарсыласу күші және штангалардың қозғалыс динамикасы сияқты дұрыс жұмыс режимдеріне байланысты. Сорғының оңтайлы жұмыс режиміне жету үшін тепе-теңдік жүйесін дұрыс орнату маңызды. Бұл дірілді азайту, тозуды азайту және жүйенің жалпы тиімділігін жақсарту үшін қажет. Штангалық сорғы қондырғысының жұмысын оңтайландыру үшін келесі тәсілдер қолданылады: жиілікті басқару – айналу жиілігін өзгерту арқылы ең жоғары жүктемелерді азайту және сорғы жұмысының үйлесімділігін қамтамасыз ету; динамикалық тепе-теңдікті реттеу – тербелістер мен жүктемелерді, сондай-ақ ваттметрограмма амплитудасын азайту мақсатында қарсы салмақтардың немесе тепе-теңдік жүйесінің массасы мен орналасуын оңтайландыру. Ваттметрограмманы есептеу арқылы келесі көрсеткіштерді анықтауға болады:

- ♦ қуат тұтынудың ең жоғары сәттері, бұл шамадан тыс діріл немесе артық жүктеменің пайда болуына әкелуі мүмкін;
- ♦ қуаттың артуы, ол механикалық ақаулардың немесе дұрыс реттелмеген тепе-теңдік жүйесінің бар екенін көрсетуі мүмкін;
- ♦ әртүрлі жұмыс режимдері үшін пайдалы әсер коэффициентін (ПӘК) бағалау, яғни жүйенің тиімділігін анықтау.

Деректерді жинау үшін қуат пен жиілік датчиктері орнатылып, әртүрлі жұмыс кезеңдерінде жетек қуатын тұтыну туралы мәліметтер жиналады. Ваттметрограмманы талдау үшін деректерді талдаудың әртүрлі әдістері қолданылады, мысалы, гармониканы анықтау үшін талдау, қуаттың жоғалуы немесе шамадан тыс тербелістердің пайда болуын дәл анықтау.

Осы мәліметтер негізінде жұмыс режимдерін реттеуге болады, яғни жиілікті реттеуді реттеуге, сорғы жабдықтарының жұмыс параметрлерін өзгертуге, сондай-ақ тиімді жұмыс істеу үшін тепе-теңдік жүйесіне түзетулер енгізуге болады.

Штангалық сорғының жұмысын оңтайландыру үшін ваттметрограмманы есептеу маңызды құралдардың бірі. Оның көмегімен энергияны тұтынуды бақылап қана қоймай, жалпы орнату тиімділігін арттыру үшін тепе-теңдік механизмдері мен жетек жүйелерін дәл реттеуге болады.

Штангалық сорғы қондырғылары (ШСҚ) арқылы мұнай өндіру барысында энергия тиімділігін арттыру және жұмыс режимдерін оңтайландыру – саладағы өзекті мәселелердің бірі.

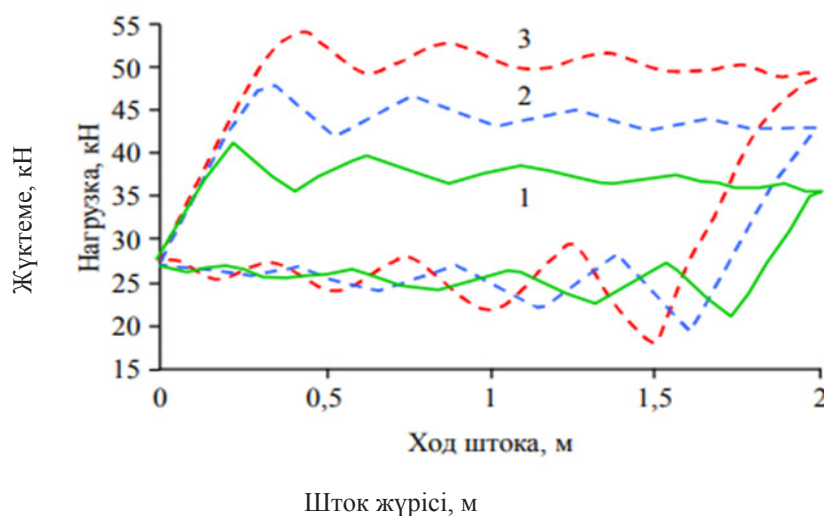
Қондырғының жұмыс қабілеттілігін арттыру жоспарлы жөндеу мен нақты техникалық қызмет көрсетуге жұмсалатын материалдық шығындарды азайтады.

Штангалық сорғы қондырғыларының күйі ваттметрограмма параметрлері және зерттелетін объектінің амплитудалық спектрі бойынша талданады.

Қарастырылған [1] жұмыста қолданылған қозғалтқыш үшін есептік статикалық сипаттамалары ұсынылған, қуат коэффициенті және реактивті қуатты толық өтеу үшін қажетті конденсатор сыйымдылығының сырғанауға байланысты өзгеруі.

Желі тогының уақыт бойынша өзгерісінің салыстырмасы, яғни сыйымдылығы алгоритм арқылы реттелетін параллель қосылған конденсаторлармен немесе конденсаторсыз жұмыс істеу режимдері ұсынылған.

Мақалада [2] теңгеруші қарсы жүк, жүкті балансир бойымен жылжытатын электрқозғалтқыш, бұранда және есептеу блогынан тұратын штангалы қондырғы жетегінің автоматты теңгеру жүйесі жасалған. Ұсынылған құрылғының тиімділігін зерттеу үшін пласт – ұңғыма – штангалы насос – штангалар тізбегі – станок-качалка жүйесінің бірлескен жұмысының кешенді математикалық моделі әзірленді. Балансирлік қарсы жүктің орнын динамикалық түзету арқылы автоматты теңгеру жүйесі иіптірек білігіндегі айналдыру моментінің амплитудалық мәнін (дәстүрлі штангалы қондырғымен салыстырғанда) айтарлықтай төмендетуге және электрқозғалтқыш жүктемесін бірқалыпты етуге мүмкіндік беретіні көрсетілген. Айналдыру моменті мен электрқозғалтқыш жүктемесінің теңгерілуі қондырғының тұтынатын қуатын азайтады.



Сурет 1 – Балансир басындағы динамикалық жүктемелер:
1 – динамикалық деңгейдің жоғарғы шекарасына сәйкес келеді;
2 – ортаңғы күйі; 3 – төменгі шекарасына сәйкес келеді.

1-суретте ұңғыдағы ағымдағы динамикалық деңгейді түрлі шамаларда өзгерткен кезде балансир басына түсетін динамикалық жүктемелер көрсетілген. Динамикалық деңгей артқан сайын насосың сору жағындағы қысым төмендейді, сонымен қатар дифференциалдық қысым (насосың шығу және сору қысымдарының айырмасы) өседі. Бұл насос плунжеріне түсетін сұйықтық жүктемесінің артуына алып келеді. Нәтижесінде штангалардың жоғары қозғалыс жарты циклінде жүктеме айтарлықтай артады (динамикалық деңгей шекті мәндерге жеткен кезде шамамен 40%-ға дейін). Сонымен қатар, динамикалық деңгейдің артуы жүктеменің

динамикалық құрауышының ұлғаюына әкеліп, балансир басындағы жүктеменің максимал мәнінің өсуіне және минимал мәнінің төмендеуіне себеп болады.

Келесі мақалада [3] қозғалтқыштың алты жұмыс күйін бейнелейтін 72 есептік қуат диаграммасы талданған. Атап айтқанда: қалыпты жұмыс жағдайы; сорғыш клапанның ағып кетуі; газдың әсері; сұйықтықтың жеткіліксіз берілуі; плунжердің төменгі және жоғарғы шектік орналасуы. Клапандардың ауысу сәтіндегі қуатты бағалау негізінде құрылған ерекшелік векторы әрбір жұмыс күйін бірегей түрде сипаттай алатыны анықталған.

Мақалада [4] баланsirлік станок-качалкалардың тозу күйі зерттелген. Жұмыстан шыққан және жаңадан іске қосылып жатқан ұңғымаларды пайдалану үшін ірі іргетастардан бас тартуға және қызмет көрсетуге кететін еңбек шығынын азайтуға мүмкіндік беретін арзан штангалық сорғы жетектері қажет. Мұндай жетектер – инерциялық теңгеру жүйесімен жұмыс істейтін гидравликалық жетектер. Жол және құрылыс техникасында, сондай-ақ станок гидравликасында қолданылатын көлемдік гидравликалық жетектердің элементтік базасы, осы жетекте қолданылатын құрал-жабдықтар, әрі өнеркәсіп жұмысшыларының жалпы біліктілік деңгейі – жаңа типтегі гидравликалық жетектерді инженерлік және технологиялық тұрғыдан жоғары деңгейде жасауға мүмкіндік береді. Бұл [5] мақалада ұңғымалық штангалық сорғылар қондырғылары бар мұнай өндіру ұңғымалары қарастырылған. Ұңғымалық штангалық сорғылар қондырғыларының жетегі ретінде жоғары іске қосу моменті бар төмен жылдамдықты асинхронды электрқозғалтқыштар қолданылады. Қарсы салмақтарды реттеу арқылы ұңғымалық штангалық сорғылар қондырғыларын теңгеру жүктемені біркелкі етуге, жетектердің жұмыс режимін жақсартуға және электр энергиясын тұтынуды азайтуға мүмкіндік беретіні зерттелген.

Келесі [6] мақалада штангалық насос жетектерін дамытудың негізгі бағыттары атап көрсетілген. Атап айтқанда, олардың сенімділігін арттыру, монтаж бен техникалық қызмет көрсетуді жеңілдету, металл сыйымдылығын және меншікті энергия шығынын азайту мәселелері қарастырылған.

Қарастырылған [7] мақалада жобаланған сынақтық стендтердің конструкциялары сипатталған. Бұл стендтер ұңғымалық штангалық насостарды кешенді түрде стендтік сынақтан өткізуге мүмкіндік береді.

Мақаладағы зерттеу жұмысы [8] штангалық насосстармен жұмыс істеу кезіндегі пайдалану шығындарының ең маңызды бөлігі – жүйенің электр энергиясын тұтынуына тікелей байланысты екенін көрсетеді.

Келесі [9] мақалада балкасыз жаңа құрылымдық сұлбадағы насос қондырғысында ұңғыма жұмысы кезінде штанга аспа нүктесіне әсер ететін динамикалық күштерді анықтау мәселесі қарастырылған. Бұл күштер иіндіктің айналу бұрышына, иіндіктің ұзындығының штанга ұзындығына қатынасына, сондай-ақ салыстырмалы эксцентриситетті сипаттайтын өлшемсіз кинематикалық параметрлерге тәуелді. Зерттеу нәтижесінде штангалар колоннасындағы динамикалық жүктемелердің шамасы насос жетегінің түріне және иіндіктің айналу бағытына байланысты болатыны анықталған.

Келесі жұмыста [10] штангалық насос қондырғыларының (ШСК) модельдеу және басқару әдістері қарастырылады. Атап айтқанда, ШСК-ны модельдеу үшін бойлық тербелістерге негізделген бірөлшемді толқын теңдеуі арқылы құрылған математикалық модельдер ұсынылған. Бұл модельдер үш санатқа бөлініп талданады: модельге негізделген энергия шығыны мен энергия тиімділігін бағалау, толқын теңдеуіне негізделген жетілдірілген математикалық модель, сондай-ақ толқын теңдеуі негізінде ұсынылатын жаңа шешу әдістері.

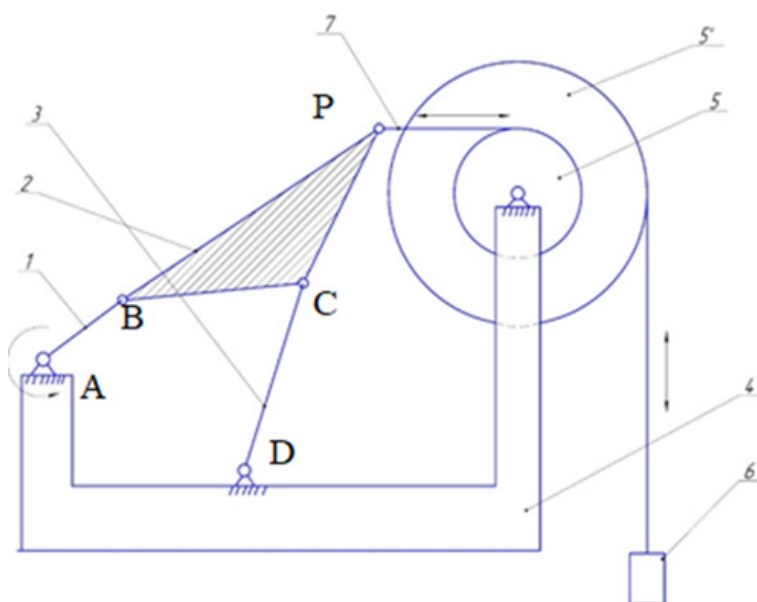
Штангалық сорғы қондырғыларының энергия тиімділігін арттыру және жұмыс режимдерін оңтайландыру мәселелері бойынша жүргізілген ғылыми мақалаларға жасалған талдауға сүйене отырып, пайдалану шығындарын азайту ұңғымада да, жер үстінде де энергия тұтынуын төмендету арқылы жүзеге асырылатыны анықталды. Сонымен қатар, қозғалтқышқа түсетін жүктеменің біркелкі еместігі қозғалтқыш пен редуктор жұмысының тұрақсыздығына, соны-

мен қатар олардың тиімділігінің күрт төмендеуіне әкеледі. Бір жұмыс циклі ішінде редуктор мен қозғалтқышқа түсетін жүктемені теңгеру, сондай-ақ теңгеру процесін тиімді жүзеге асыру үшін қажетті қозғалтқыш қуатын азайту мақсатында ваттметрограмма деректерін пайдалану қажет. Бұдан бөлек, қарсы салмақтар қолданылмаған теңгерілмеген, сондай-ақ қозғалмалы және айналмалы қарсы салмақтармен теңгерілген мұнай насос қондырғыларындағы динамикалық күштерді анықтап, салыстырмалы талдау жүргізу қажеттігі туралы қорытындыға келеміз.

Материалдар мен әдістер

Штангалы насос құрылғысының төрт звенолы жетекші механизмінің кинематикалық және кинетостатикалық талдаулары жасаймыз.

Конструкцияның өлшемдік қатарын келесі түрде аламыз: $AB = 0.28228$ мм, $BC = 0.62528$ мм, $CD = 0.59513$ мм, $XD_{new} = -0.62913$ мм, $YD_{new} = 0.31091$ мм, $CP = 0.570516$ мм, $BP = 1.059791$ мм.

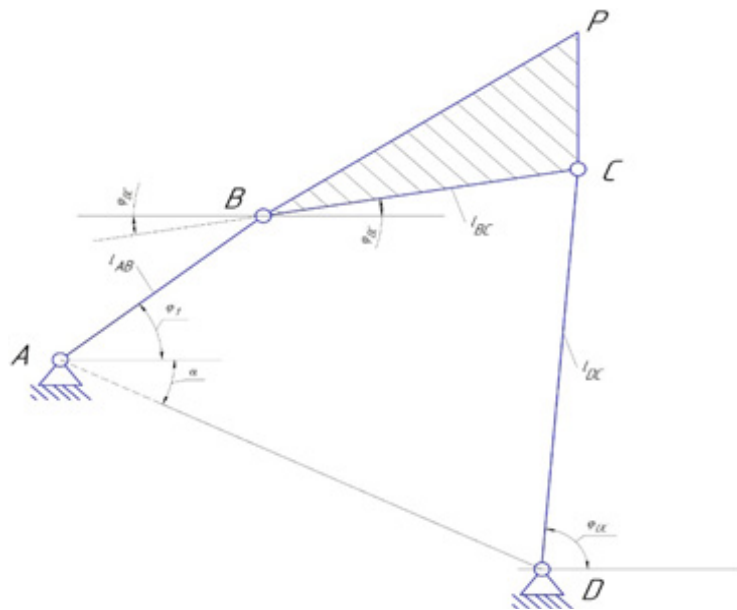


Сурет 2 – Төменгі күйдегі штангалы сорғы құрылғыларының жетекті механизмінің кинематикалық схемасы

Мұндағы ШСҚ жетегі механизмінде 1 – айналшақ (2-сурет) және 2 – бұлғақ бір жағынан кинематикалық жұп арқылы қосылған, ал екінші жағы үшбұрышты контур арқылы 3 – күйентеге жалғанған. Күйенте мен айналшақ айналмалы жұп арқылы тіреуішке бекітіледі. Ал бұлғақтың Р нүктесі түзу сызықты қозғалыс жасайды.

ШСҚ жетегі механизмі келесі тәртіппен жұмыс істейді. Айналдыру моменті редуктордан (схемада көрсетілмеген) айналшақтың осіне беріледі. 1 – айналшақтың айналуы 2 – бұлғақ арқылы икемді қосылыс 7-ге беріледі. Бұл қосылысқа штангалы колонна 6 орнатылған, ол 5 және 5' барабандары арқылы бекітіледі. Р нүктесі – икемді байланыс 7-нің ілінісу нүктесі болып табылады және ол қайтымды түзу сызықты қозғалыс орындайды.

Штангалы насос құрылғысының төрт звенолық жетекші механизмінің кинематикалық талдауын жүргізу үшін тұйықталған векторлық контурлар әдісі қолданылады.



Сурет 3 – ШСҚ жетекінің төрт буынды механизмі

ABCD векторлық контурын қарастырайық.

$$\overline{l_{AD}} + \overline{l_{DC}} + \overline{l_{BC}} = \overline{l_{AB}} \quad (1)$$

(1) Векторлық контур теңдеуін Ох және Оу координаталық осьтеріне проекцияласақ, келесі теңдеулерді аламыз:

$$(2) \quad \begin{cases} l_{AB} \cdot \cos \alpha + l_{DC} \cos \varphi_{DC} - l_{BC} \cos \varphi_{BC} = l_{AB} \cdot \cos \varphi_1 \\ -l_{AB} \cdot \sin \alpha + l_{DC} \sin \varphi_{DC} - l_{BC} \sin \varphi_{BC} = l_{AB} \cdot \sin \varphi_1 \end{cases}, \quad (2)$$

мұндағы $\alpha, \varphi_{BC}, \varphi_{DC}, \varphi_1$ және 4-буындардың осьтері мен Ох осі арасындағы бұрыштар.

Белгілеулер енгізейік:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_{DC}}{\partial \varphi_1} &= U_{DC_1} \\ \frac{\partial \varphi_{BC}}{\partial \varphi_1} &= U_{BC_1} \end{aligned} \quad (3)$$

U_{BC} және U_{DC} шамалары 2-ші және 3-ші буындардың бұрыштық жылдамдықтарының аналогы. Сондай-ақ олар беріліс қатынасы деп аталады, себебі олар 2-ші және 3-ші буындардың бұрыштық жылдамдықтарының кіріс буынның бұрыштық жылдамдығына қатынасына тең. Осыған сәйкес (1) теңдеуі келесі түрде болады:

$$\begin{cases} -U_{DC} \cdot l_{DC} \sin \varphi_{DC} + U_{BC_1} \cdot l_{BC} \sin \varphi_{BC} = -l_{AB} \cdot \sin \varphi_1 \\ U_{DC} \cdot l_{DC} \cos \varphi_{DC} - U_{BC_1} \cdot l_{BC} \cos \varphi_{BC} = -l_{AB} \cdot \cos \varphi_1 \end{cases} \quad (4)$$

(4) бірінші теңдеуге кіретін бұрыштардан ортақ φ_{DC} бұрышын шегереміз, бұл хАу координаталық осьтерін ортақ φ_{DC} бұрышына бұруға сәйкес келеді. Нәтижесінде:

$$U_{BC_1} \cdot l_{BC} \cos(\varphi_{BC} - \varphi_{DC}) = -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_{DC}) \quad (5)$$

Мұнан бұрыштық жылдамдықтың аналогы ω_{BC} үшін U_{BC} өрнегі алынады

$$U_{BC_1} = \frac{-l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_{DC})}{l_{BC} \cos(\varphi_{BC} - \varphi_{DC})} \quad (6)$$

Осыған ұқсас түрде, координат осьтерін φ_{BC} бұрышына бұру арқылы сол теңдеуді түрлендіріп, ω_{DC} бұрыштық жылдамдығының аналогы U_{DC} үшін өрнек аламыз.

$$U_{DC_1} \cdot l_{DC} \cos(\varphi_{DC} - \varphi_{BC}) = -l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_{BC}) \quad (7)$$

Осыдан

$$U_{DC_1} = \frac{l_{AB} \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_{BC})}{l_{DC} \cos(\varphi_{DC} - \varphi_{BC})} \quad (8)$$

Осы кезде бұрыштық жылдамдықтардың аналогтары арқылы

$$\omega_{BC} = \omega_1 \cdot U_{BC_1}; \omega_{DC} = \omega_1 \cdot U_{DC_1} \quad (9)$$

Осылайша, шарнирлардың абсолютті сызықтық жылдамдықтары келесі формулалармен анықталады:

$$\vec{V}_B = \omega_1 \cdot \vec{l}_{AB} \quad (10)$$

Координаталық осьтерге проекцияланған түрде:

$$\begin{cases} V_B^x = \omega_1 \cdot l_{AB} \cdot \cos \varphi_1 \\ V_B^y = \omega_1 \cdot l_{AB} \cdot \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (11)$$

Осы кезде В нүктесінің абсолютті жылдамдығының шамасы анықталады:

$$V_B = \sqrt{(V_B^x)^2 + (V_B^y)^2} \quad (12)$$

Сонымен қатар, ұқсас түрде С нүктесі және шатундық нүкте Р үшін абсолютті жылдамдықтардың шамалары анықталады:

$$\begin{cases} V_{s_3}^x = \omega_3 \cdot X_{s_3} \\ V_{s_3}^y = \omega_3 \cdot Y_{s_3} \end{cases} \quad (13)$$

$$V_C = \sqrt{(V_C^x)^2 + (V_C^y)^2} \quad (14)$$

$$\begin{cases} V_P^x = \omega_2 \cdot X_P \\ V_P^y = \omega_2 \cdot Y_P \end{cases} \quad (15)$$

$$V_P = \sqrt{(V_P^x)^2 + (V_P^y)^2} \quad (16)$$

Келесіде буындардың масса орталықтарының жылдамдықтарының проекцияларын координаталық осьтерге анықтап, олардың абсолютті жылдамдықтарын есептейміз:

$$\begin{cases} V_{s_2}^x = V_B^x + \omega_2 \cdot X_{s_2} \\ V_{s_2}^y = V_B^y + \omega_2 \cdot Y_{s_2} \end{cases} \quad (17)$$

Кіріс буынның масса орталығының абсолютті жылдамдығының мәні

$$V_{s_1} = \sqrt{(V_{s_1}^x)^2 + (V_{s_1}^y)^2} \quad (18)$$

$$\begin{cases} V_{s_2}^x = V_B^x + \omega_2 \cdot X_{s_2} \\ V_{s_2}^y = V_B^y + \omega_2 \cdot Y_{s_2} \end{cases} \quad (19)$$

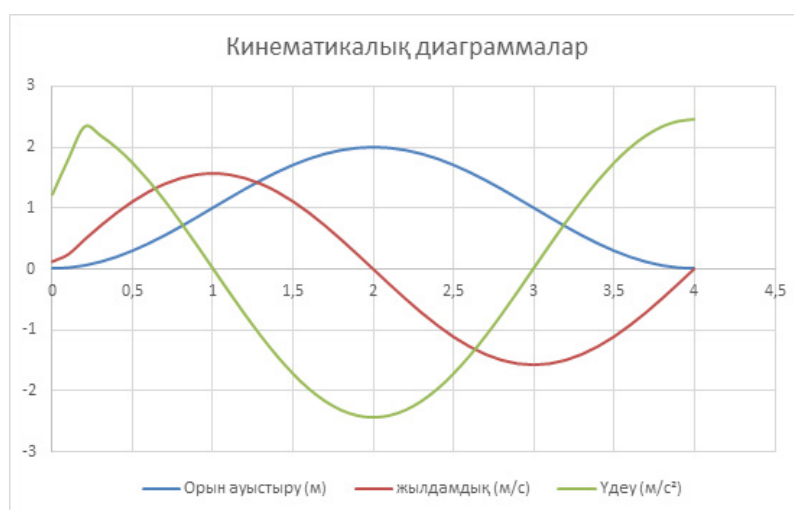
Шатунның масса орталығының абсолютті жылдамдығының мәні

$$V_{s_2} = \sqrt{(V_{s_2}^x)^2 + (V_{s_2}^y)^2} \quad (20)$$

$$\begin{cases} V_{s_3}^x = \omega_3 \cdot X_{s_3} \\ V_{s_3}^y = \omega_3 \cdot Y_{s_3} \end{cases} \quad (21)$$

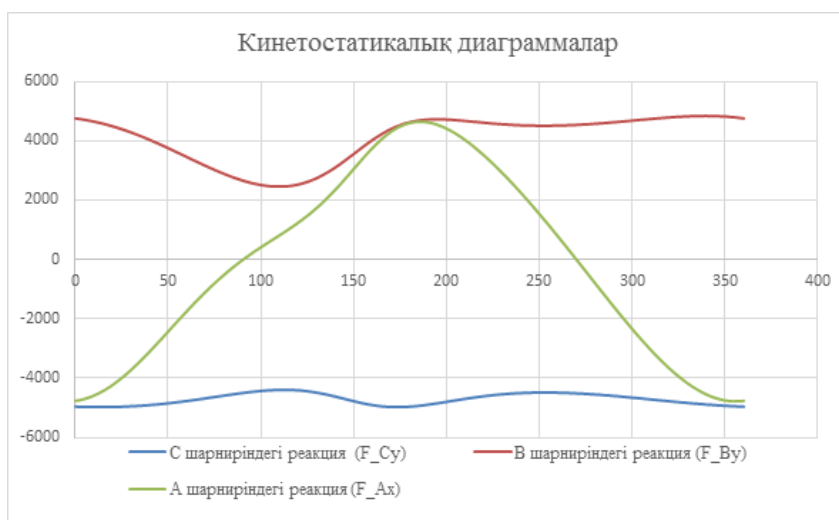
Күйентенің масса орталығының абсолютті жылдамдығының мәні

$$V_{s_3} = \sqrt{(V_{s_3}^x)^2 + (V_{s_3}^y)^2} \quad (22)$$

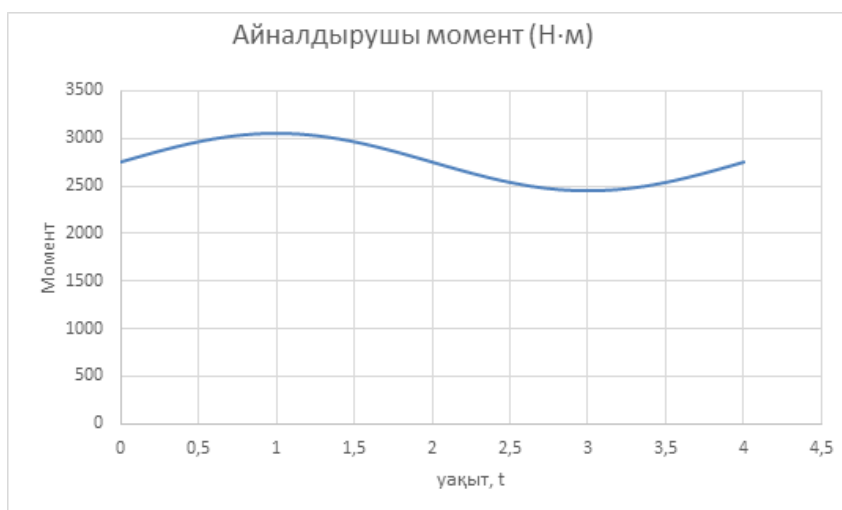


Сурет 4 – Р нүктесінің кинематикасы

Сондай-ақ кинестостатикалық теңдеулерді шешу нәтижесінде механизм шарнирлеріндегі реакцияларды анықтаймыз.



Сурет 5 – Механизм шарнирлеріндегі реакция күштері



Сурет 6 – Айналдырушы момент

Нәтижелер мен талқылау

Штангалық сорғы қондырғы жетегінің ваттметрограммасын есептеу.

Бұл бөлімде тербелмелі қондырғыға арналған ваттметрограмма есебі қарастырылып, мұнай салмағы мен динамограмма әсері ескерілген. Ұңғымадағы мұнай деңгейінің төмендеуін есепке алуға ерекше назар аударылған, себебі бұл фактор гидростатикалық қысымға және сорғыға түсетін жүктемеге тікелей әсер етеді.

Сорғыға гидростатикалық қысым сұйықтық бағанының биіктігіне тікелей байланысты:

$$P_{гидр} = \rho gh, \quad (23)$$

мұндағы, h – сұйықтық деңгейі, ρ – сұйықтық тығыздығы.

Тығыздығы неғұрлым жоғары болса, сұйықтықты берілген тереңдікке көтеру кезінде плунжерге түсетін жүктеме соғұрлым жоғары болады.

Сондай-ақ сұйықтықтың тұтқырлығы ($\mu = 0,01$ Па с) плунжер айналасындағы және сорғыдағы сұйықтықтың қозғалысына тұтқыр кедергіге әсер етеді. Тұтқыр кедергі мынадай формула бойынша есептеледі:

$$F_m = 6\pi\mu r v, \quad (24)$$

мұндағы r – сорғы/штанг радиусы, v – плунжер қозғалысының жылдамдығы.

Тұтқырлық неғұрлым жоғары болса, қарсыласу соғұрлым жоғары болады және жетекке динамикалық жүктеме соғұрлым жоғары болады. Тығыздық және тұтқырлық – сорғы мен жетекке гидростатикалық және динамикалық жүктемені бағалау үшін негізгі параметрлер. Сұйықтық деңгейі төмендеген кезде (мысалы, 1000 м-ден 900 м-ге дейін) сұйықтық бағанының салмағы азаяды, демек сорғыға түсетін жүктеме азаяды. Бұл плунжерге гидростатикалық жүктемені азайтуға әкеледі, яғни сұйықтықты көтеру үшін талап етілетін күш пен қуат төмендейді.

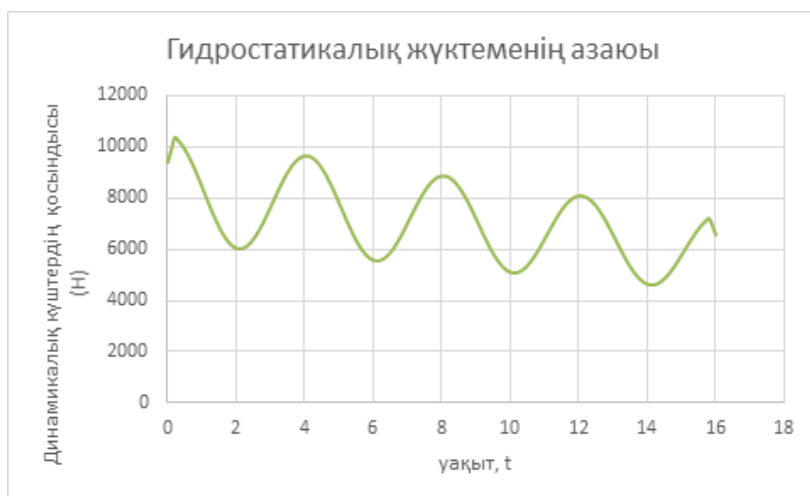
Ваттметрограммада бұл қуат шыңының амплитудасының азаюы ретінде көрінеді, әсіресе сорғы сұйықтықты көтеретін циклдың фазаларында.

Сондай-ақ мұнайдың динамограммасы да өз ықпалына ие (сұйықтықтың динамикалық кедергісі). Сорғыда сұйықтықтың қозғалысы кезінде тұтқырлығына, тығыздығына, ағын жылдамдығына және сорғының сипаттамасына байланысты тұтқыр кедергі және инерциялық әсерлер (сұйықтықтың үдеуі және баяулауы) пайда болады. Бұл әсерлер статикалық гидростатикалық қысымнан ерекшеленетін күштің тербелісін көрсететін динамограмма деп аталатын жүктеменің динамикалық құрамдас бөлігін қалыптастырады. Динамограмманы есепке алу сорғы мен тербелістің нақты жұмысын нақты модельдеуге мүмкіндік береді. Ваттметрограмма формасына әсер ететін қосымша тербелістер мен ең жоғары жүктемелер пайда болады. Мысалы, плунжер жылдамдығының күрт өзгеруі кезінде динамикалық кедергі артады, бұл жедел жүктемені арттырады.

Демек, сұйықтық деңгейінің төмендеуі жалпы жүктемені азайтады және ваттметрограмма амплитудасын азайтады. Мұнай динамограммасы қуат профилін күрделендіре отырып, жүктемеге динамикалық тербелістерді қосады. Екі фактор бірге есептерді неғұрлым шынайы етеді, бұл қарсы салмақты, қозғалтқыш қуатын дұрыс таңдау және реттеу және тербелме станогының жұмысын оңтайландыру үшін маңызды.



Сурет 7 – Мұнай деңгейінің түсуіне байланысты массаның азаюы



Сурет 8 – Гидростатикалық жүктеменің азаюы

Кинематика мен кинетостатиканы есептеудің математикалық моделін пайдалана отырып, штангалық сорғы құрылғысын есептеу және ватметрограмма құру кодын Python бағдарламалық ортасында аламыз.

Сондай-ақ нақты қондырғы үшін қолданылған электромотор мен редуктордың сипаттамаларын ескереміз.

Асинхронды электрқозғалтқыш 4BP100L4 – жарылысқа төзімді үшфазалы асинхронды электрқозғалтқыш, қуаты 4 кВт, айналу жиілігі 1410 айн/мин, қысқа тұйықталған ротор. ГОСТ стандарты бойынша габарит пен қуат байланыстырылған. 380В кернеулі үшфазалы айнымалы ток желісіне қосуға арналған. Негізгі сипаттамалары:

- ◆ Қуаты: 4 кВт
- ◆ Айналу жиілігі: 1500 айн/мин (нақтысы — 1410 айн/мин)
- ◆ Кернеу: 380 В

Техникалық деректер:

- ◆ Айналу жиілігі: 1000 айн/мин
- ◆ Қуаты: 4 кВт
- ◆ Үлгісі: 4BP
- ◆ Кернеу: 380 В
- ◆ Валының диаметрі: 28 мм
- ◆ ГОСТ Р 51689-2000 стандартына сәйкес

Электрлік сипаттамалары:

- ◆ Номиналды қуаты: 4.0 кВт
- ◆ Валының нақты айналу жиілігі: 1410 айн/мин
- ◆ ПӘК: 85%
- ◆ Номиналды ток: 8.8 А (380 В)
- ◆ Іске қосу тогы: 52.8 А
- ◆ Номиналды айналдыру моменті: 23.03 Н·м
- ◆ Іске қосу моменті: 52.9 Н·м
- ◆ Максималды момент: 66.78 Н·м
- ◆ Инерция моменті: 0.101 кг·м²

Редуктор (Тісті беріліс) Ц2У-160 және 1Ц2У-160 – екі сатылы цилиндрлік горизонталь редуктор, төмен айналатын біліктің осьаралық аралығы – 160 мм.

Ерекшеліктері:

- ◆ Беріліс қатынасы: 8–40
- ◆ Шығыс моменті: 1000 Н·м

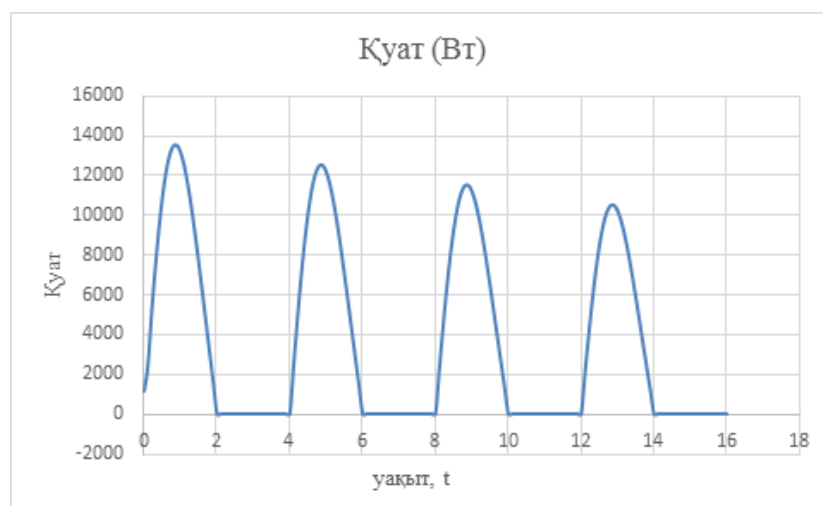
- ♦ Шығыс білікке түсетін радиалды жүктеме: 8000 Н
- ♦ КПД: 0.97
- ♦ Май көлемі: 4.5 л

Штангалық сорғы құрылғысының сипаттамалары (ШСҚ):

- ♦ Жүк көтергіштігі: 850 кг
- ♦ Жұмыс жүрісі: 2 м

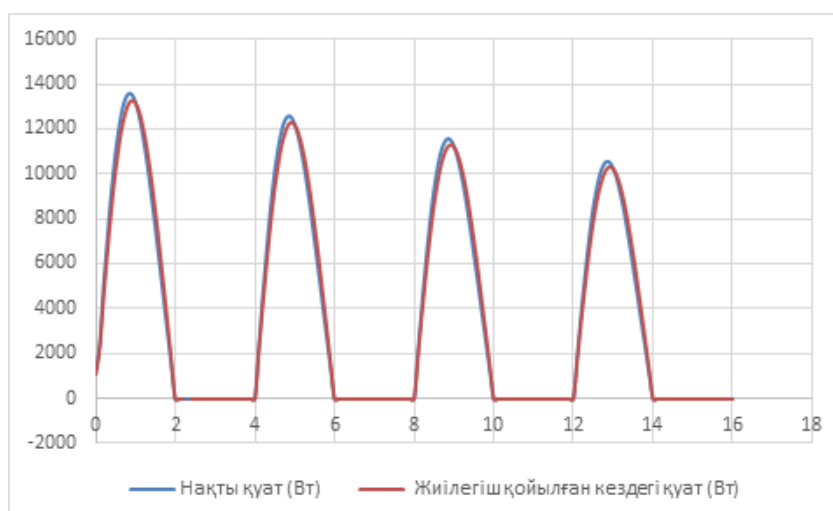
Сонда келесі ваттметрограмманы аламыз

Сұйықтық деңгейінің төмендеуі сорғыға гидростатикалық жүктеменің азаюына әкеледі, бұл қуатты төмендетеді. Тұтқыр кедергіні және сұйықтық динамикасын есептеу жүктемені есептеудің дәлдігін арттырады.



Сурет 9 – Түрлендіруші механизмнің 4 цикл қозғалысындағы ваттметрограмма

Сондай-ақ штангалы насос құрылғысының төртзвенолы жетекші механизмінің теңгерілуін оңталау үшін жиілегіш – электр қозғалтқышының жылдамдығы мен айналуды моментін басқаратын, оған берілетін ток жиілігін өзгертетін электрондық құрылғы қолданамыз. Сонда ваттметрограмма салыстырмалы түрде келесідей өзгереді:



Сурет 10 – Ток жиілігін өзгертетін электрондық құрылғы қолданғаннан кейінгі ваттметрограмма

Жиілегіш айнымалы тоқты 50 Гц (айнымалы ток) желіден аладыда, оны тұрақты токқа (DC) түрлендіреді. Сосын жиілігі иен кернеуін өзгертіп қайта айнымалы токқа түрлендіреді. Бұл біліктің айналу жиілігі (айналым), біліктегі моментті, үдеткіш және тежеуді «икемді басқаруға» мүмкіндік береді.

Қорытынды

Таңдалған тетіктерді одан әрі жетілдіру және салыстырмалы зерттеу жүргізу үшін машиналар механикасының қазіргі заманғы әдістеріне негізделген көппараметрлі оңтайландыру қажет. Осы мақсатта кинематика мен кинетостатиканы зерттеуге арналған қажетті математикалық модельдер жасалып, Python бағдарламалық ортасында есептеу бағдарламалары әзірленді.

Сұйықтық деңгейі мен динамограммадағы өзгерістерді есепке алу – қуат пен жүктеменің нақты сипаттамаларын алуға мүмкіндік береді.

- ♦ Тұрақты масса кезіндегі энергия шығыны: 66400 Дж (0,0184 кВтсағ).
- ♦ Мұнай деңгейінің түсуін ескерген кездегі энергия шығыны: 59244 Дж (0,0165 кВтсағ).
- ♦ Энергия үнемі: 10,78%.

Пайдаланудың нақты жағдайларында ШСҚ жетегі механизмінің параметрлерін оңтайландыру үшін осындай модельді пайдалану ұсынылады.

ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Маляр А., Цесьлик С. Расчет процессов в электроприводе штангового насосного агрегата с компенсацией реактивной мощности // *Energies*. – 2023. <https://doi.org/10.3390/en16237782>.
- 2 Уразаков К.Р., Молчанова В.А., Тугунов П.М. Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравнивания // *Journal of Mining Institute*. – 2020. – <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.6>.
- 3 Зюзев А.М., Текле С.И. Динамические симуляторы в задачах диагностики штанговых глубинно-насосных установок // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskie-simulyatory-v-zadachah-diagnostiki-shtangovyh-glubinno-nasosnyh-ustanovok>.
- 4 Молчанов А.Г., Певнев В.Г., Тарасов К.В. Гидравлический привод штангового скважинного насоса с инерционным уравниванием // *NEFTEGAS.info*. – 2023. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gidravlicheskiy-privod-shtangovogo-skvazhinno-nasosa-s-inertsionnym-uravnoveshivaniem>.
- 5 Яшин А.Н., Хакимьянов М.И. Уравниваемость установок скважинных штанговых насосов на основе анализа ваттметрограмм // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uravnoveshennost-ustanovok-skvazhinnyh-shtangovyh-nasosov-na-osnove-analiza-vattmetrogramm>.
- 6 Кошкин А.А. Обзор приводов штангового скважинного насоса // *Пермский государственный технический университет*. – 2022. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-privodov-shtangovogo-skvazhinno-nasosa>.
- 7 Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Долов Т.Р., Шайхулов Р.М., Орлова Е.А. Результаты стендовых исследований работы скважинного штангового насоса в осложненных условиях эксплуатации // *Научно-технический журнал*. – 2022. [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2022-5\(131\)-49-56](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2022-5(131)-49-56).
- 8 Takács G. Критический анализ условий питания в системах штанговых насосов // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110061>.
- 9 Ahmedov B., Hajiyev A. Оценка динамических сил в новой конструкции безбалансирных штанговых насосных установок // *Nafta-Gaz*. – 2020. <https://doi.org/10.18668/NG.2020.05.03>.
- 10 Гао Чжи-Вэй, Цзя Шифэн. Моделирование и управление для насосных установок: обзор // *Processes*. – 2024. – <https://doi.org/10.3390/pr12071468>.
- 11 Мардашпин И.И., Вафин И.З. Станок-качалка : пат. RU 184533 U1 Российская Федерация. – № 184533 ; опубл. 2018.

- 12 Деникин Э.И. Станок-качалка для добычи нефти : пат. RU 216643 U1 Российская Федерация. – № 216643 ; опубл. 2023.
- 13 Деникин Э.И. Станок-качалка для добычи нефти : пат. RU 212382 U1 Российская Федерация. – № 212382 ; опубл. 2022.
- 14 Яруллин А.Г., Каримов Р.Р., Мутагиров Р.Ш., Савельев Е.Н., Висковатых Е.Н., Яковлев Р.Р. Станок-качалка модернизированный : пат. RU 2747068 C1 Российская Федерация. – № 2747068 ; опубл. 2021.
- 15 Ахтямов Э.М., Осное В.Б., Асылгараева А.Ш. Натяжитель ремней автоматический для станков-качалок : пат. RU 2721066 C1 Российская Федерация. – № 2721066 ; опубл. 2020.

REFERENCES

- 1 Malyar A., Ceslik S. Raschet protsessov v elektroprivode shtangovogo nasosnogo agregata s kompensatsiyey reaktivnoy moshchnosti. *Energies* (2023). <https://doi.org/10.3390/en16237782>. [in Russian].
- 2 Urazakov K.R., Molchanova V.A., Tugunov P.M. Metod rascheta dinamicheskikh nagruzok i energopotrebleniya shtangovoy ustanovki s sistemoy avtomaticheskogo uravnoveshivaniya. *Journal of Mining Institute* (2020). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.6>. [in Russian].
- 3 Zyuzhev A.M., Tekle S.I. Dinamicheskiye simulyatory v zadachakh diagnostiki shtangovykh glubinnonasosnykh ustanovok. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* (2022). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskie-simulyatory-v-zadachah-diagnostiki-shtangovykh-glubinnonasosnykh-ustanovok>. [in Russian].
- 4 Molchanov A.G., Pevnev V.G., Tarasov K.V. Gidravlicheskiy privod shtangovogo skvazhinogo nasosa s inertsionnym uravnoveshivaniem. *NEFTEGAS.info* (2023). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gidravlicheskiy-privod-shtangovogo-skvazhinogo-nasosa-s-inertsionnym-uravnoveshivaniem>. [in Russian].
- 5 Yashin A.N., Khakimyanov M.I. Uravnoveshennost' ustanovok skvazhinnykh shtangovykh nasosov na osnove analiza vattmetrogramm. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* (2021). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uravnoveshennost-ustanovok-skvazhinnykh-shtangovykh-nasosov-na-osnove-analiza-vattmetrogramm>. [in Russian].
- 6 Koshkin A.A. Obzor privodov shtangovogo skvazhinogo nasosa. *Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet* (2022). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-privodov-shtangovogo-skvazhinogo-nasosa>. [in Russian].
- 7 Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Dolov T.R., Shaykhulov R.M., Orlova E.A. Rezul'taty stendovykh issledovaniy raboty skvazhinogo shtangovogo nasosa v oslozhnennykh usloviyakh ekspluatatsii. *Nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal* (2022). [https://doi.org/10.33285/1999-6934-2022-5\(131\)-49-56](https://doi.org/10.33285/1999-6934-2022-5(131)-49-56). [in Russian].
- 8 Takacs G. Kriticheskiy analiz usloviy pitaniya v sistemakh shtangovykh nasosov. *Journal of Petroleum Science and Engineering* (2022). <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110061>. [in Russian].
- 9 Ahmedov B., Hajiyeu A. Otsenka dinamicheskikh sil v novoy konstruktsii bezbalansirnykh shtangovykh nasosnykh ustanovok. *Nafta-Gaz* (2020). <https://doi.org/10.18668/NG.2020.05.03>. [in Russian].
- 10 Gao Zhi-Wei, Jia Shifeng. Modelirovaniye i upravleniye dlya nasosnykh ustanovok: obzor. *Processes* (2024). <https://doi.org/10.3390/pr12071468>. [in Russian].
- 11 Mardashpin I.I., Vafin I.Z. Stanok-kachalka : pat. RU 184533 U1 Rossiyskaya Federatsiya. No. 184533; opubl. 2018. [in Russian].
- 12 Denikin E.I. Stanok-kachalka dlya dobychi nefiti: pat. RU 216643 U1 Rossiyskaya Federatsiya. No. 216643; opubl. 2023. [in Russian].
- 13 Denikin E.I. Stanok-kachalka dlya dobychi nefiti: pat. RU 212382 U1 Rossiyskaya Federatsiya. No. 212382; opubl. 2022. [in Russian].
- 14 Yarullin A.G., Karimov R.R., Mutagirov R.Sh., Savel'ev E.N., Viskovatyh E.N., Yakovlev R.R. Stanok-kachalka modernizirovanny: pat. RU 2747068 C1 Rossiyskaya Federatsiya. No. 2747068; opubl. 2021. [in Russian].
- 15 Akhtyamov E.M., Osnos V.B., Asylgaraeva A.Sh. Natyazhitel' remney avtomaticheskiiy dlya stankov-kachalok: pat. RU 2721066 C1 Rossiyskaya Federatsiya. No. 2721066; opubl. 2020. [in Russian].

^{1,2*} **Imanbayeva N.S.,**

Cand.Tech.Sc., ORCID ID: 0000-0001-6889-3421,

*e-mail: imanbaevan@mail.ru

²**Tynyshtikov A.A.,**

Master's student, ORCID ID: 0009-0008-5341-043X,

e-mail: aidost307@gmail.com

²**Mussayev M.M.,**

Master's student, ORCID ID: 0009-0002-6917-4618,

e-mail: mussayevmery@gmail.com

³**Tattimbetova S.Zh.,**

Teacher, ORCID ID: 0009-0005-2580-7569,

e-mail: saltanattattimbetova1975@gmail.com

⁴**Algozhayeva R.S.,**

Senior lecturer, ORCID ID: 0000-0003-1575-5425,

e-mail: raihan_algozhaeva@mail.ru

¹D.A. Zholdasbekov Institute of mechanics and mechanical science,
Almaty, Kazakhstan,

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

³Secondary School No. 196, Almaty, Kazakhstan.

⁴Almaty University of Power Engineering
and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev,
Almaty, Kazakhstan.

EFFICIENCY OF CALCULATION OF THE WATTMETROGRAM OF THE ROD PUMP UNIT DRIVE FOR OPTIMIZING BALANCING MODES

Abstract

The problem of optimizing oil production has always been one of the most pressing. The article is focused on the problem of improving the energy efficiency and optimizing the operating modes of this unit for oil production using rod pumping units (SHS). The article pays special attention to accounting for a decrease in the level of oil in the well, which affects the hydrostatic pressure and the load on the pump. The results of kinematic and kinetostatic analyzes of the transforming mechanism of the rod pump unit Drive are obtained. Based on the same results, the wattmetrogram was calculated. With its help, it allows not only to control energy consumption, but also to fine-tune the balance mechanisms and drive systems to increase the overall efficiency and identify its weaknesses. The decrease in the oil level reduces the overall load and, accordingly, we see that the amplitude of the wattmetrogram decreases. The oil dynamogram adds dynamic vibrations to the load, complicating the power profile. Together, the two factors make the reports more realistic, which is important for the correct selection and adjustment of counterweights, engine power, and optimization of the operation of the MSS. The results in the article are obtained taking into account the characteristics of the Electromotive and reducer used in the straight-line guide converter mechanism of a Class II quadruple drive of a specific SHS unbalanced drive.

Keywords: rod pump unit (SHS), transforming mechanism, kinematics, kinetostatics, rotating torque, power, wattmetrogram.

^{1,2*}**Иманбаева Н.С.,**

к.т.н., ORCID ID: 0000-0001-6889-3421,

*e-mail: imanbaevan@mail.ru

²**Тыныштиков А.А.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0008-5341-043X,

e-mail: aidost307@gmail.com

²**Мусаев М.М.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0002-6917-4618,

e-mail: mussayevmerey@gmail.com

³**Таттимбетова С.Ж.,**

учитель, ORCID ID: 0009-0005-2580-7569,

e-mail: saltanattattimbetova1975@gmail.com

⁴**Алғожаева Р.С.,**

старший преподаватель, ORCID ID: 0000-0003-1575-5425,

e-mail: raihan_algozhaeva@mail.ru

¹Институт механики и машиностроения им. У.А. Джолдасбекова,
г. Алматы, Казахстан

²Сатпаев университет, г. Алматы, Казахстан

³196-я общеобразовательная школа, г. Алматы, Казахстан

⁴Алматинский университет энергетики и связи им. Гумарбека Даукеева,
г. Алматы, Казахстан

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСЧЕТА ВАТТМЕТРОГРАММЫ ПРИВОДА УСТАНОВКИ ШТАНГОВОГО НАСОСА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ БАЛАНСИРОВКИ

Аннотация

Проблема оптимизации добычи нефти всегда была одной из актуальных. Статья посвящена проблеме повышения энергоэффективности и оптимизации режимов работы данной установки для добычи нефти с помощью стержневых насосных установок (ПКС). Особое внимание в статье уделяется учету снижения уровня нефти в скважине, что влияет на гидростатическое давление и нагрузку на насос. Получены результаты кинематического и кинетостатического анализов преобразовательного механизма привода штанговой насосной установки. На основании этих результатов рассчитана ваттметрограмма. С его помощью можно не только контролировать потребление энергии, но и точно регулировать балансировочные механизмы и системы привода для повышения общей эффективности, а также выявлять его слабые стороны. Снижение уровня масла снижает общую нагрузку, и, соответственно, мы видим уменьшение амплитуды ваттметрограммы. Нефтяная динамограмма добавляет динамические колебания к нагрузке, усложняя профиль мощности. Вместе эти два фактора делают расчеты более реалистичными, что важно для правильного выбора и регулировки противовеса, мощности двигателя и оптимизации работы ПМС. Результаты в статье получены с учетом характеристик электромотора и редуктора, примененных в четырехзвенном прямолинейно-направляющем преобразовательном механизме II класса неуравновешенного привода УДС.

Ключевые слова: штанговая насосная установка (ППС), преобразовательный механизм, кинематика, кинетостатика, крутящий момент, мощность, ваттметрограмма.

Мақаланың редакцияға түскен күні: 01.07.2025

UDC 55.3179
IRSTI 38.33.25

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-340-346>

^{1*}**Jarassova T.S.,**

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2900-9872

*e-mail: t.jarassova@kmge.kz

²**Altunsoy M.**

Dr.Tech.Sc., ORCID ID: 0000-0002-3140-6682

e-mail: altunsoy@akdeniz.edu.tr

¹Atyrau Branch LLP “KMG Engineering”, Atyrau, Kazakhstan

²Akdeniz University, Antalya, Türkiye

PETROLEUM BIOMARKERS AS INDICATORS OF OIL ORIGIN AND MATURITY IN THE SOUTH-EASTERN PRECASPIAN BASIN

Abstract

This study investigates the origin of oil from the south-eastern Precaspian Basin through biomarker analysis of five crude oil samples using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Biomarkers serve as molecular fingerprints to elucidate hydrocarbon origin, source rock characteristics, and thermal history. The analyzed samples revealed: a marine depositional environment (C_{26}/C_{25} terpane ratios = 0.59–0.79), carbonate-dominated source rocks (C_{29}/C_{30} hopane ratios = 4.78–5.55), sourcing from Paleozoic (Permo-Carboniferous) strata (C_{28}/C_{29} sterane ratios = 0.44–0.57), and peak oil window – late maturation according to Ts/T , $C_{29}T_s/C_{29}T_m$, C_{29} sterane isomerization ratios. These findings demonstrate the basin's complex hydrocarbon generation history, with biomarker distributions indicating: marine organic matter input under anoxic conditions, carbonate-evaporitic source facies and thermal equilibrium consistent with primary oil generation. The results provide valuable insights for exploration strategies in similar frontier basins, with implications for reducing exploration risk and optimizing resource development. Future studies should combine these geochemical data with structural and stratigraphic analyses to refine migration models.

Keywords: Precaspian Basin, biomarker analysis, organic geochemistry, sterane, terpane, GC-MS, source rock, depositional environment

Introduction

One of the key applications of organic geochemistry is the detailed study of the molecular composition of oil and gas. The south-eastern Precaspian Basin (Figure 1) represents a critical hydrocarbon province where understanding petroleum systems is essential for exploration and production strategies [1]. This study employs advanced organic geochemical techniques to characterize five crude oil samples from the region, focusing on biomarker analysis through gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Biomarkers serve as molecular fingerprints that provide invaluable insights into hydrocarbon origin, source rock characteristics, and thermal history. Over 600 biomarkers have been identified in oils, and they are widely used to address various geochemical challenges, including the exploration and assessment of oil fields. Most common of biomarkers presented in Figure 2 (a). By examining terpane and sterane distributions, key aspects of the basin's petroleum system, including depositional environments (marine vs. lacustrine), source rock lithology (shale vs. carbonate), geological age (Paleozoic to Mesozoic), and thermal maturity were elucidated [2].

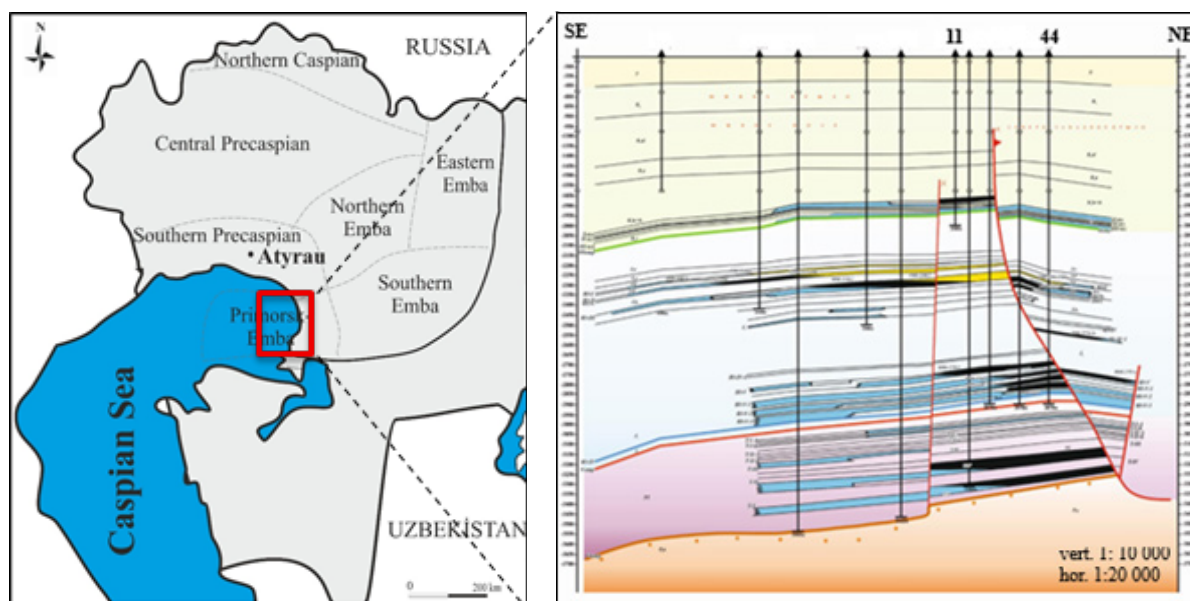


Figure 1 – Study area

Materials and methods

Five crude oil samples from the south-eastern Precaspian Basin were analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) (Figure 2 (b)) to assess their biomarker composition. The oil density in analyzed samples ranges from 865 to 895 kg/m³. The oils contain 0.31–1.47% sulfur, 0.97–2.9% paraffin, 1.38–3.95% resins, and 1.7–1.96% asphaltenes. First, the oil samples were separated into saturated and aromatic fractions using solvents. Saturated hydrocarbons were extracted using n-hexane, while aromatic hydrocarbons were eluted with dichloromethane (CH₂Cl₂) as the solvent. The analytical procedure involved vaporizing the samples in a gas chromatograph equipped with a capillary column, where helium carrier gas facilitated component separation. The eluted compounds were then ionized in the mass spectrometer via electron impact, with subsequent mass-to-charge ratio separation enabling molecular identification. The resulting chromatographic data provided diagnostic insights into hydrocarbon origin, thermal maturity, and depositional history [2, 3].

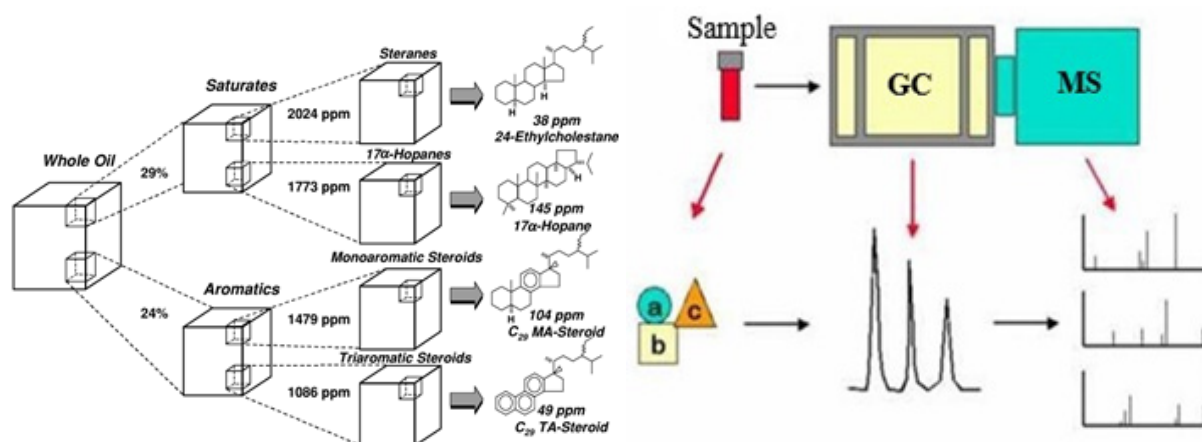


Figure 2 – (a) Composition of oil (Peters and Moldowan, 1993); (b) A simplified diagram of a GC-MS

Results and discussion

The key biomarker ratios obtained through gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) analysis of crude oil samples from the study area presented on Table 1.

Table 1 – GC-MS Results

Parameters	Well #				
	48	11	44	17	20
Horizon	J3	K1	J2	J2	J2
SAT/ARO ratio	0.54	0.44	1.43	1.02	1.78
C_{26}/C_{25} TT		0.59		0.79	0.75
T_s/T_m		0.46		0.92	0.95
$C_{29}T_s/C_{29}T_m$		0.14		0.38	0.36
C_{29}/C_{30}		5.40		4.78	5.55
C27,%	36	41	35	38	38
C28,%	21	19	24	19	19
C29,%	43	40	41	43	43
$C_{29}20S/(20S+20R)$	0.54	0.34	0.55	0.57	0.58
$C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$	0.57	0.48	0.71	0.61	0.61
C_{28}/C_{29}	0.49	0.46	0.57	0.45	0.44

Biomarkers are organic molecules preserved in oil since the formation of the original organic matter. They provide critical information about the origin of hydrocarbons, the conditions under which they formed, the lithology of the source rock, and the thermal maturity of the organic material. Below, we explore how biomarkers are used to interpret the sedimentation environment, type and age of the source rock, and thermal maturity [4–6].

Sedimentation Environment

Terpanes and steranes were prioritized for environmental assessment. Terpanes comprise both tri- and pentacyclic structures, with pentacyclic terpanes (hopanes) demonstrating higher abundance in marine-derived oils relative to their tricyclic counterparts. The C_{26}/C_{25} tricyclic terpene ratio serves as a diagnostic tool for discriminating between lacustrine and marine depositional settings, where elevated ratios (>1) typically signify lacustrine origins [4, 5, 7]. In the analyzed samples, C_{26}/C_{25} ratios ranged from 0.59 to 0.79, consistent with a marine depositional environment [8]. Steranes Triangle diagram of C 27%, C 28% and C 29% steranes concerning the selected samples, showing genetically relationships of the samples that deposited under marine environment (Figure 3) [5].

Type of Source Rock

Biomarker composition provides critical insights into source rock lithology. Specifically, the C_{29}/C_{30} hopane ratio serves as a key diagnostic parameter: elevated ratios (4.78–5.55) in the studied samples indicate a carbonate-dominated source rock, while higher values would typically suggest carbonate-rich depositional environments [4, 5, 9]. Notably, oils originating from organic-rich evaporitic carbonate sequences characteristically exhibit increased C_{29} norhopane concentrations relative to C_{30} hopane, offering a distinct fingerprint for such source facies (Figure 4).

Age of Source Rock

The geological age of source rocks can be determined through C_{28}/C_{29} sterane ratios, which exhibit a progressive increase from older to younger stratigraphic units. This trend reflects the evolutionary expansion of phytoplankton communities through geological time [5, 10]. In the

analyzed samples, C_{28}/C_{29} sterane ratios of 0.44–0.57 suggest hydrocarbon generation from source rocks spanning the Paleozoic (Cretaceous-Permian).

Thermal Maturity

Thermal maturity, a critical factor in oil evaluation, can be assessed using specific biomarker ratios. The T_s/T_m ratio is a reliable indicator of both maturity and the depositional environment. T_s is more thermally stable than T_m , making the T_s/T_m ratio a useful parameter [5, 9, 11, 12]. In the studied samples, $T_s/T_m < 1$ (0.46–0.92) together with $C_{29}T_s/C_{29}T_m$ values confirm thermal maturation from peak oil window to late (Figure 5).

Two other ratios, $C_{29} 20S/(20S+20R)$ and $C_{29} \beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ sterane, are effective for determining the thermal maturity of source rocks [10]. The $C_{29} 20S/(20S+20R)$ ratio increases from 0 to 0.55 as maturity progresses. A ratio below 0.50 indicates immature source rocks, while a ratio above 0.54 suggests mature source rocks [2, 5, 13]. Observed values of 0.34–0.58 $C_{29} (20S/(20S+20R))$ and 0.48–0.71 $C_{29} (\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta))$ consistently indicate source rocks within the principal oil generation zone (Figure 6).

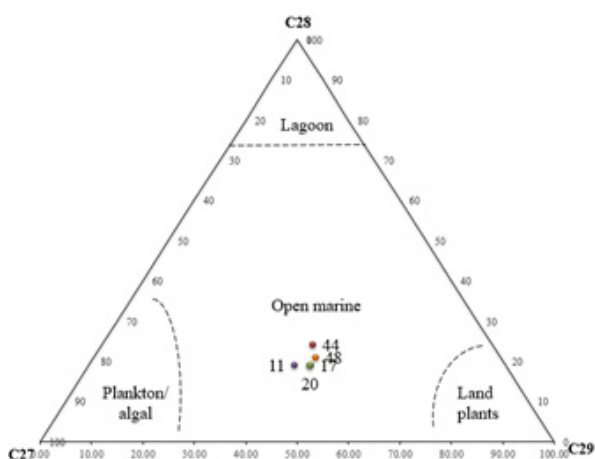


Figure 3 – Steranes tiagle diagram

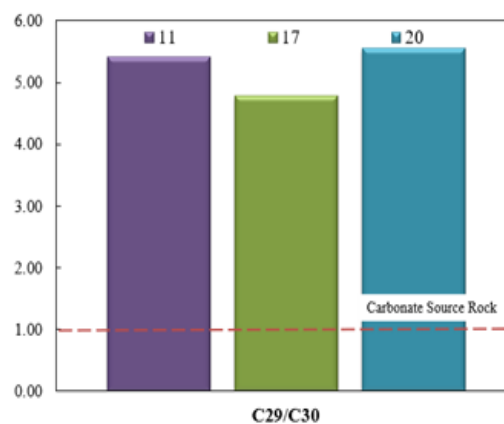


Figure 4 – Type of source rock

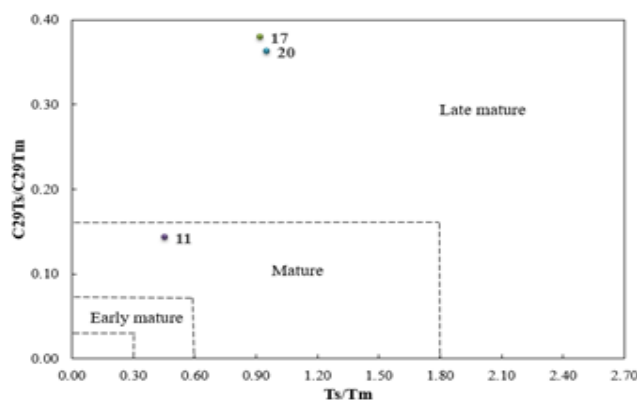


Figure 5 – T_s/T_m vs $C_{29}T_s/C_{29}T_m$

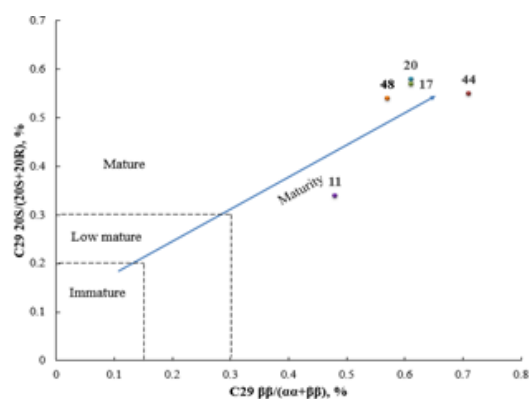


Figure 6 – Sterane isomerization

Conclusion

Organic geochemistry plays a vital role in understanding the formation, composition, and transformation of organic matter in the Earth's geospheres. Biomarkers, which are organic molecules preserved in oil, serve as powerful tools for this purpose. This comprehensive biomarker study of crude oils from the south-eastern Precaspian Basin has provided significant insights into the region's petroleum system. Through advanced GC-MS analysis of terpanes and steranes, we have established:

- ♦ Carbonate-dominated source rocks were identified as the primary hydrocarbon generators, indicated by characteristic C_{29}/C_{30} hopane ratios (4.78–5.55) and elevated C_{29} norhopane concentrations.

- ♦ Sourcing from Paleozoic (particularly Permo-Carboniferous) strata was confirmed through C_{28}/C_{29} sterane ratios (0.44–0.57), reflecting the basin's complex depositional history.

- ♦ Thermal maturity parameters T_s/T_m , $C_{29}T_s/C_{29}T_m$ and C_{29} sterane isomerization ratios consistently placed the samples within the peak oil generation window and late maturity.

The methodology and findings presented here can be applied to other frontier basins to reduce exploration risk and optimize resource development. Future work should integrate these geochemical data with regional seismic and well-log interpretations to further constrain hydrocarbon migration pathways and accumulation patterns.

REFERENCES

- 1 Jarassova, T., Altunsoy, M. Organic Geochemical Characteristics of Core Samples from Central Primorsk-Emba Province, Precaspian Basin, Kazakhstan. SPE Virtual Annual Caspian Technical Conference (5–7 October, 2021).
- 2 Peters, K.E., Moldowan, J.M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum и Ancient Sediments (Prentice Hall, New Jersey, 1993).
- 3 Seitkhaziyev, Y.Sh., Jarassova, T.S. Application of Oil Fingerprinting and Biomarker Analysis to Study FluidConnectivity and Reservoir Isolation and Genetic Typing of Oil Obtained from the Eastern Caspian Basin (Kazakhstan). SPE Caspian Technical Conference and Exhibition (Atyrau, 2024).
- 4 Moldowan, J.M., Sundararaman, P. and Schoell, M. Sensitivity of biomarker properties to depositional environment и/or source input in the Lower Toarcian of S.W. Germany. Organic Geochemistry, 10, 915–926 (1986).
- 5 Peters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan, J.M. The Biomarker Guide. II. Biomarkers и Isotopes in Petroleum Systems и Earth History, 2nd ed. (Cambridge University Press, 2005).
- 6 Peters, K.E., Cassa, M.R. The Petroleum System-from Source to Trap. AAPG Memoir, 60, 93–120 (1994).
- 7 Seitkhaziyev, Y.Sh., Sarsenbekov, N.D., Rakhymberdi, R., Kairbekov, S.B. Geochemical studies – A pathway to understanding oil field characteristics. Oil and Gas, 3 (111), 21–33 (2019).
- 8 Jarassova, T., Altunsoy, M. Distribution of terpanes in crude oils: south Precaspian Basin, Kazakhstan. Proceedings of the conference ACROFI-X (Almaty, 2024).
- 9 Seitkhaziyev Y.Sh., Uteyev R.N., Sarsenbekov N.D., Tassemenov Y.R. Integrating biomarker analysis with carbon stable isotope signatures for genetic classification and tracing possible migration pathways of hydrocarbon of Pre-Caspian Basin. SPE Annual Caspian Technical Conference (2020).
- 10 Grantham, P.J., Wakefield, L.L. Variations in the sterane carbon number distributions of marine source rock derived crude oils through geological time. Organic Geochemistry, 12, 61–73 (1988).
- 11 Mckirdy, D.M., Aldrige, A.K., Ypma, P.J.M. A geochemical comparison of some crude oils from Pre-Ordovician carbonate rocks. Advances in Organic Geochemistry, 99–107 (1981).
- 12 Seifert, W. K., Moldowan, J. M. Use of biological markers in petroleum exploration. In Methods in Geochemistry и Geophysics (Johns, R. B., Ed. Elsevier: Amsterdam, 1986), pp. 261–290.
- 13 Seifert, W.K., Moldowan, J.M. Applications of steranes, terpanes и monoaromatics to the maturation, migration и source of crude oils. Geochim. Cosmochim. Acta, 42 (1), 77–95 (1978).

^{1*}Джарасова Т.С.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2900-9872,

*e-mail: t.jarassova@kmge.kz

²Алтунсой М.

Т.Ф.Д., ORCID ID: 0000-0002-3140-6682,

e-mail: altunsoy@akdeniz.edu.tr

¹АФ «КМГ Инжиниринг» ЖШС, Атырау қ., Қазақстан

²Акдениз университеті, Анталья қ., Түркия

КАСПИЙ МАҢЫ ОЙПАТЫНЫҢ ОҢТҮСТІК-ШЫҒЫС БӨЛІГІНДЕГІ МҰНАЙДЫҢ ШЫҒУ ТЕГІ МЕН ЖЕТІЛГЕНДІГІНІҢ КӨРСЕТКІШІ РЕТІНДЕГІ МҰНАЙ БИОМАРКЕРЛЕРІ

Аңдатпа

Бұл зерттеуде газ хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС) әдісін қолдану арқылы Оңтүстік-Шығыс Каспий маңы ойпатының мұнай шығу тегін бес мұнай үлгісіндегі биомаркерлерді талдау негізінде зерттеу жүргізілді. Биомаркерлер көмірсутектердің шығу тегін, аналық жыныстардың сипаттамаларын және олардың термиялық тарихын анықтауға мүмкіндік беретін молекулалық көрсеткіштер ретінде қызмет етеді. Зерттелген үлгілер мынадай нәтижелер көрсетті: теңіздік шөгінді орта (C_{26}/C_{25} терпан қатынасы = 0.59–0.79), карбонатты аналық жыныстардың басымдылығы (C_{29}/C_{30} гопан қатынасы = 4.78–5.55), Палеозой (Карбон–Пермь) жыныстарынан алынған мұнай (C_{28}/C_{29} стеран қатынасы = 0.44–0.57). Ts/Tm , $C_{29}Ts/C_{29}Tm$ және C_{29} стеран изомеризациясы сияқты қатынастар мұнайдың қалыптасу аймағы мен оның жоғары жетілу деңгейін көрсетеді. Алынған нәтижелер ойпаттағы көмірсутектердің түзілу тарихының күрделілігін айғақтайды. Биомаркерлердің таралуы аноксиялық жағдайда теңіздік органикалық заттардың қосылғанын, көмірқышқыл-эвапориттік аналық жыныстар фацияларының бар екенін және негізгі мұнай түзілу кезеңіндегі термиялық тепе-теңдік жағдайын айғақтайды. Бұл нәтижелер ұқсас шекаралық ойпаттарда барлау стратегияларын әзірлеу үшін құнды ақпарат ұсынады, тәуекелдерді азайтуға және ресурстарды тиімді игеруге мүмкіндік береді. Болашақ зерттеулерде осы геохимиялық деректерді құрылымдық және стратиграфиялық талдаулармен біріктіру арқылы мұнай миграциясы модельдерін нақтылау ұсынылады.

Тірек сөздер: Каспий маңы ойпаты, биомаркерлер талдауы, органикалық геохимия, стерандар, терпандар, ГХ-МС, аналық жыныс, шөгінді орта

^{1*}Джарасова Т.С.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-2900-9872

*e-mail: t.jarassova@kmge.kz

²Алтунсой М.

Д.Т.Н., ORCID ID: 0000-0002-3140-6682

e-mail: altunsoy@akdeniz.edu.tr

¹АФ ТОО «КМГ Инжиниринг», г. Атырау, Қазақстан

²Университет Акдениз, г. Анталья, Түркия

НЕФТЯНЫЕ БИОМАРКЕРЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ И СТЕПЕНИ ЗРЕЛОСТИ НЕФТИ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ

Аннотация

В данном исследовании изучается происхождение нефти юго-восточной части Прикаспийской впадины с помощью анализа биомаркеров пяти проб сырой нефти методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии (ГХ-МС). Биомаркеры выступают в роли молекулярных отпечатков, позволяющих определить происхождение углеводородов, характеристики материнских пород и термическую историю. Анализ проб выявил: морские условия осадконакопления (соотношение C_{26}/C_{25} терпанов = 0.59–0.79), преобладание

карбонатных материнских пород (соотношение C_{29}/C_{30} гопанов = 4.78-5.55), смешанное происхождение из отложений палеозоя (Карбон-Пермь) (соотношение C_{28}/C_{29} стеранов = 0.44-0.57) и по соотношениям Ts/Tm , $C_{29}Ts/C_{29}Tm$ и изомеризации C_{29} стеранов пиковую и позднюю зону нефтеобразования. Полученные данные демонстрируют сложную историю генерации углеводородов в бассейне, при этом распределение биомаркеров указывает на поступление морского органического вещества в аноксидных условиях, карбонатно-эвапоритовые фации материнских пород и термическое равновесие, соответствующее основной фазе нефтеобразования. Результаты представляют ценные данные для разработки стратегий разведки в аналогичных бассейнах, позволяя снижать риски и оптимизировать освоение ресурсов. Дальнейшие исследования должны объединить эти геохимические данные со структурным и стратиграфическим анализами для уточнения моделей миграции.

Ключевые слова: Прикаспийская впадина, анализ биомаркеров, органическая геохимия, стераны, терпаны, ГХ-МС, материнская порода, обстановка осадконакопления.

Article submission date: 21.07.2025

УДК 553.4
МРНТИ 31.15.21

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-347-355>

¹*Назирханов Э.Н.,
магистр, геолог, ORCID ID: 0009-0008-2768-6061,
*e-mail: eldornazirkhanov@mail.ru

¹ТОО «KazMinerals Bozshakol», г. Экибастуз, Казахстан

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА И СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ БОЗШАКОЛЬ

Аннотация

В данной работе проведено всестороннее исследование содержания рудных компонентов в горных породах и их взаимосвязи с минералогическим составом. Целью исследования являлось выявление закономерностей распределения рудных элементов, в частности меди, в зависимости от состава первичных и вторичных минералов. Работа основывается на комплексном анализе, включающем как петрографические, так и минералогические методы изучения. В рамках исследования выполнено детальное изучение образцов пород, отобранных из керна буровых скважин. Основное внимание уделено микроскопическому анализу шлифов, который позволил определить текстурно-структурные особенности пород и провести количественную оценку содержания основных и вторичных минералов. С целью повышения точности были использованы методы геохимического анализа, позволившие уточнить содержание рудных компонентов и установить процентное соотношение различных минералов в породах. Результаты показали, что содержание меди может существенно варьироваться в зависимости от степени и типа вторичных изменений, а также от присутствия определенных минералов, таких как халькопирит, вторичный кварц, хлорит и серицит. Для выявления и количественной оценки взаимосвязей между содержанием меди и минералогическим составом использован коэффициент корреляции Пирсона. Это позволило установить статистически значимые зависимости между определенными минералами и концентрацией меди. В частности, выявлены положительные корреляции между содержанием меди и специфическими минералами и отрицательные связи с минералами, формирующимися в процессе интенсивного изменения пород. Полученные результаты имеют практическое значение для задач геологоразведки. Выявленные корреляционные зависимости могут быть использованы при описании керна и построении прогностических моделей рудоносности, что существенно повышает эффективность разведочных работ. Методика, примененная в исследовании, может быть адаптирована и для других месторождений с аналогичными условиями минералообразования.

Ключевые слова: петрографический анализ, коэффициент корреляции Пирсона, шлиф, керна, рудоносность.

Введение

Бозшакольское медно-порфировое месторождение представляет собой один из наиболее значимых и масштабных рудных объектов Казахстана, относящийся к классу порфировых медных месторождений. Оно характеризуется высокой степенью металлоносности, сложным строением и разнообразным минералогическим составом, обусловленным многостадийными геологическими процессами. Минералогический состав пород, слагающих месторождение, включает как первичные, так и вторичные минералы. Среди наиболее распространенных выделяются кварц, плагиоклаз, биотит, хлорит, халькопирит, серицит, карбонаты и эпидот [1].

Настоящая работа посвящена исследованию взаимосвязи между минералогическим составом горных пород и содержанием меди на Бозшакольском меднопорфировом месторождении. Целью исследования является выявление закономерностей распределения меди в зависимости от состава первичных и вторичных минералов. В рамках поставленной задачи проведен

комплексный анализ керновых образцов с использованием петрографических, минералогических и геохимических методов, а также статистической обработки данных для количественной оценки влияния отдельных минералов на рудоносность.

Актуальность темы определяется потребностью в повышении эффективности геолого-разведочных работ при разработке медно-порфировых месторождений. Установление устойчивых корреляционных связей между минеральным составом пород и содержанием меди позволяет не только точнее прогнозировать рудоносные зоны, но и минимизировать затраты на разведку. Это особенно важно в условиях сложного геологического строения, характерного для месторождения Бозшаколь. Исследование соответствует приоритетным направлениям в области геологических наук и недропользования, таким как развитие методов прогноза и оценки минеральных ресурсов, совершенствование аналитических подходов в минералогии, а также внедрение статистических методов в интерпретацию геохимических данных. Работа также затрагивает вопросы рационального использования недр и повышения информативности геолого-разведочных данных.

Научная новизна исследования заключается в применении количественного корреляционного анализа с использованием коэффициента Пирсона для оценки влияния конкретных минералов, таких как кварц, халькопирит, эпидот, хлорит и карбонаты, на содержание меди в породах. Установлены статистически значимые зависимости, ранее недостаточно подробно освещенные для данного региона.

Оригинальность подхода заключается в интеграции микроскопического анализа шлифов, геохимического тестирования и математической обработки данных для комплексной оценки факторов, влияющих на распределение меди. Такой подход позволяет повысить точность интерпретации данных, а также адаптировать предложенную методику к другим месторождениям со схожими условиями минералообразования.

Важнейшей особенностью Бозшакольского месторождения является активное проявление вторичных изменений пород, которые происходили в условиях гидротермальной активности [2]. К числу таких процессов относятся альбитизация – замещение плагиоклаза на альбит, хлоритизация – замещение темноцветных минералов на хлорит, карбонатизация – отложение карбонатов по трещинам и пустотам и серицитизация – образование мелкочешуйчатого серицита в результате разложения полевых шпатов. Эти преобразования существенно влияют на перераспределение рудных компонентов, в частности меди, поскольку вторичные минералы могут быть как индикаторами рудных зон, так и барьерами для рудной минерализации. Бозшакольское месторождение представляет собой типичный пример постколлизийной порфировой минерализации, развивавшейся в условиях затухания магматической активности [3]. В таких условиях магматические расплавы, насыщенные летучими компонентами, поднимаясь по трещинам и зонам разломов, инициировали формирование гидротермальных систем, насыщенных сульфидами меди. Эти процессы привели к отложению рудных минералов в зонах наибольшей проницаемости, где и формировались экономически значимые скопления медной руды [4]. Минералогическое и геодинамическое разнообразие месторождения Бозшаколь делает его ценным объектом для изучения процессов порфировой минерализации, взаимосвязи между вторичными изменениями и содержанием меди, а также для построения прогностических моделей при геологоразведке аналогичных рудных объектов.

Материалы и методы

Проведено исследование шести образцов керна, отобранных из различных литологических зон месторождения, а также их соответствующих шлифов. В шлифах детально описаны структура и текстура пород, а также проведена количественная оценка минерального состава с определением процентного соотношения отдельных минералов.

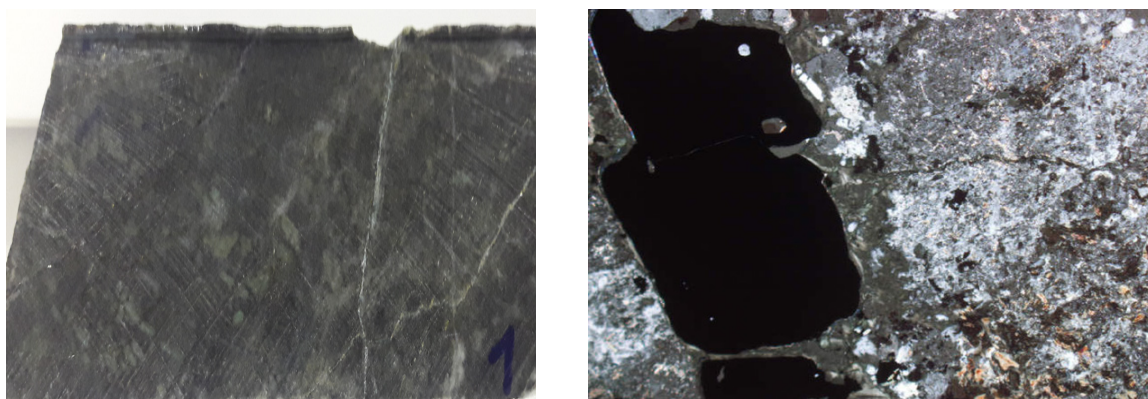


Рисунок 1 – Образец №1: диоритовый порфирит и его шлиф

Образец №1: диоритовый порфирит, порода с порфировидной структурой. Вкрапленники представлены широкопластинчатыми и удлиненно-призматическими кристаллами плагиоклаза, испещренными включениями чешуек серицита, хлорита, редко эпидота. Основная масса довольно хорошо раскристаллизована, с реликтовой призматически-зернистой или гипидиоморфно-зернистой структурой. Состоит из призматических кристаллов интенсивно разложенного плагиоклаза, многочисленных чешуек эпигенетического биотита. По прожилкам развивается агрегат кварца, иногда совместно с рудным минералом и с небольшим количеством хлорита и карбоната. Порода претерпела значительные вторичные изменения, включающие серицитизацию плагиоклаза, хлоритизацию биотита, а также эпидотизацию и карбонатизацию в прожилках. Эти процессы могли происходить под воздействием гидротермальных флюидов.

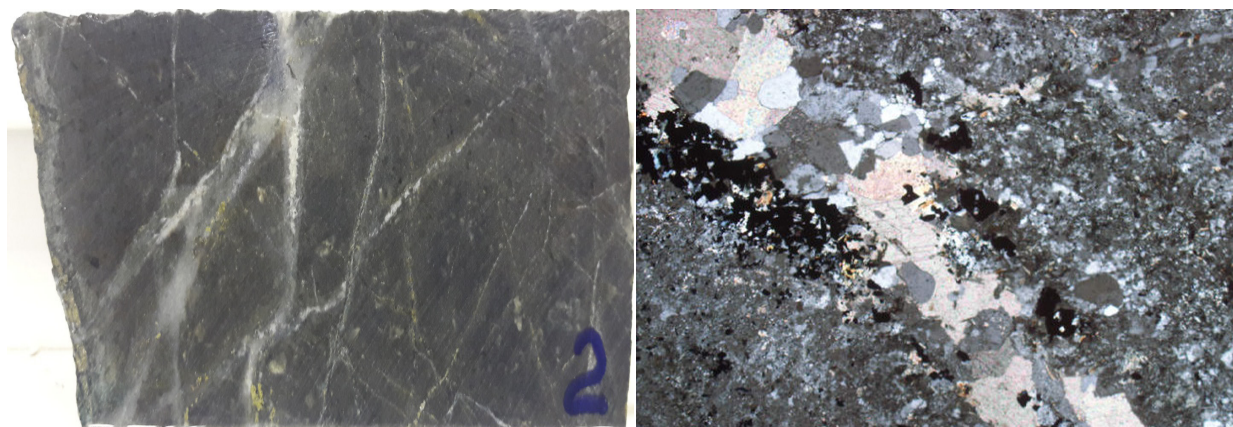


Рисунок 2 – Образец №2: пропилизитированный андезит и его шлиф

Образец №2: пропилизитированный андезит, текстура массивная. Структура порфировидная. Вкрапленники составляют около (5–8)% от общего объема породы, неравномерно распределены в ее массе, представлены в основном плагиоклазом, образующим удлиненно-призматические и таблитчатые кристаллы размером до 3 мм по удлинению, интенсивно альбитизированные и замещенные тонким гидросерицитовым агрегатом. Порода секут многочисленные разно ориентированные прожилки, выполненные минералами кварцем, карбонатом, хлоритом, редко с эпидотом [5]. Формирование карбонатных прожилков, что может указывать на позднюю стадию гидротермальной активности. Образование эпидота в трещинах и на контактах минералов, что также свидетельствует о метасоматической переработке породы.

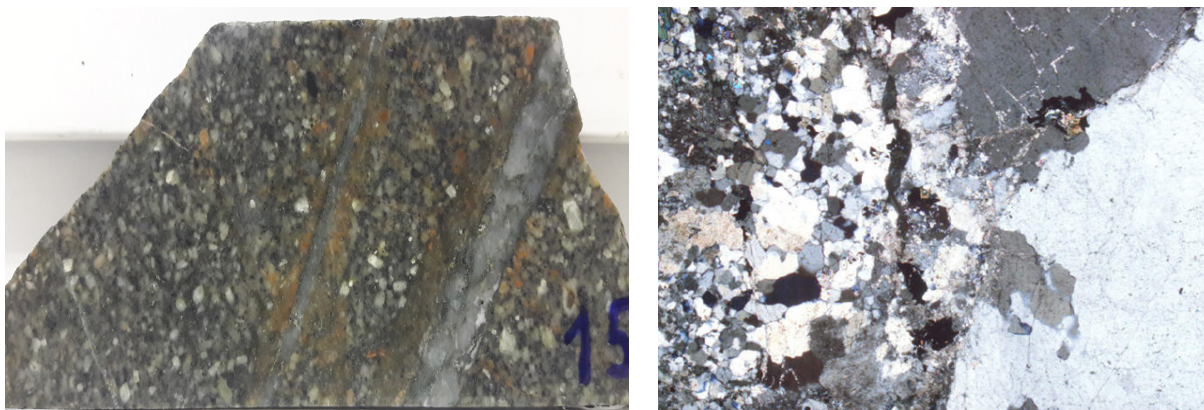


Рисунок 3 – Образец №3: гранодиорит (тоналит) и его шлиф

Образец №3: гранодиорит (тоналит), порода трещиноватая, большая часть шлифа занята мощным прожилком, выполненным кварцем, с небольшим количеством эпидота и его образованием в прожилках, сопровождает пропилитизацию. Основная масса мелкозернистая кварц-полевошпатового состава, неравномерно окварцована – проявляется в виде мощного прожилка кварца. Полевые шпаты разложены и альбитизированы, темноцветный минерал замещен хлоритом, таким образом, происходит процесс альбитизации. В значительных количествах содержится вкрапленность.

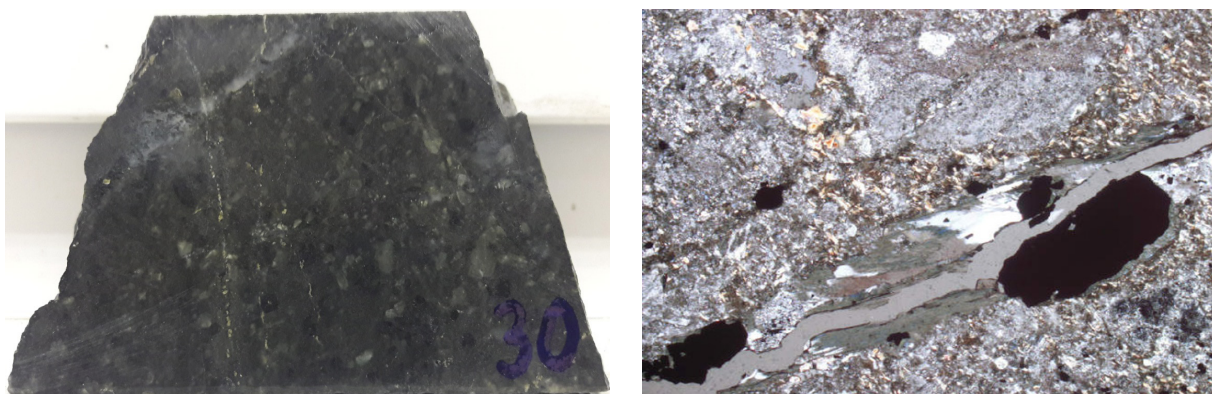


Рисунок 4 – Образец №4: андезитовый (диоритовый) порфирит и его шлиф

Образец №4: андезитовый (диоритовый) порфирит субвулканического или даечного облика, интенсивно амфиболизирован. Вкрапленники составляют около 30–35% от общего объема породы. Представлены таблитчатыми кристаллами серицитизированного и альбитизированного плагиоклаза и реже реликтами темноцветного минерала, псевдоморфно замещенного волокнистой бледно-зеленой уралитовой роговой обманкой. Размеры вкрапленников составляют (2–4) мм. Основная масса неплохо раскристаллизована, состоит из хаотично расположенных мелких призмочек и лейстовидных кристаллов альбитизированного плагиоклаза, большого количества иголок бледно-зеленой вторичной роговой обманки, чешуек бурого биотита, иногда скапливающихся в агрегатах и прожилках [6]. По многочисленным широким прожилкам развиваются минералы, такие как хлорит, кварц.

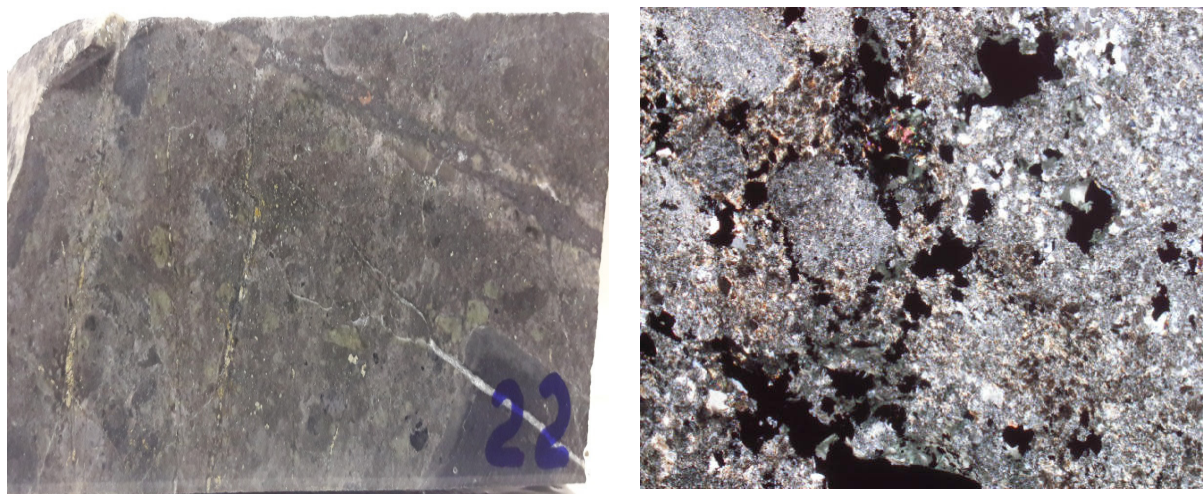


Рисунок 5 – Образец №5: хлорит-кварц-полевошпатовый метасоматит и его шлиф

Образец №5: хлорит-кварц-полевошпатовый метасоматит, текстура породы брекчиевид-но-такситовая. Она состоит из фрагментов с разнородной структурой и текстурой. В некото-рых наблюдается реликтовая пузыристая текстура и реликтовая микролитовая основная масса или массивная текстура и реликтовая порфировая структура. В других участках порода пол-нокристаллическая, вероятно диоритового состава, никаких реликтов исходных структур не сохранилось, и порода сложена неравномернoзернистым агрегатом полевого шпата, кварца, многочисленными листочками хлорита и биотита. По многочисленным разно ориентирован-ным прожилкам развивается рудный минерал, кварц, реже карбонат. Развитие карбонатных прожилков может быть связано с гидротермальной активностью. Присутствие эпидота указы-вает на метасоматическую переработку породы.

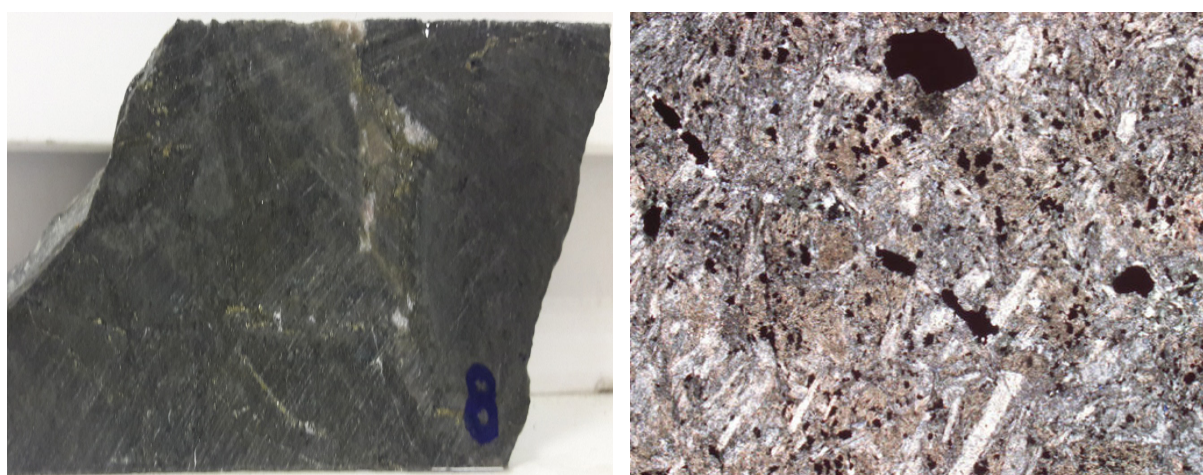


Рисунок 6 – Образец №6: андезит и его шлиф

Образец №6: андезит, интенсивно измененный. Структура линофировая, обусловленная субпараллельной ориентировкой удлиненных компонентов породы, и реликтовая сериально-порфировая, обусловленная постепенными взаимопереходами по величине между вкраплен-никами и индивидами основной массы. Состоит порода из удлиненных призм, неравномерно

карбонатизированного плагиоклаза размером от 0,05 мм до 0,5 мм по удлинению, псевдоморфоз волокнистого бесцветного амфибола и карбоната, развитых по темноцветному минералу, чешуек хлорита, многочисленной рудной вкрапленности [7]. По немногочисленным микро-трещинам развивается кварц, хлорит и карбонат.

Результаты и обсуждение

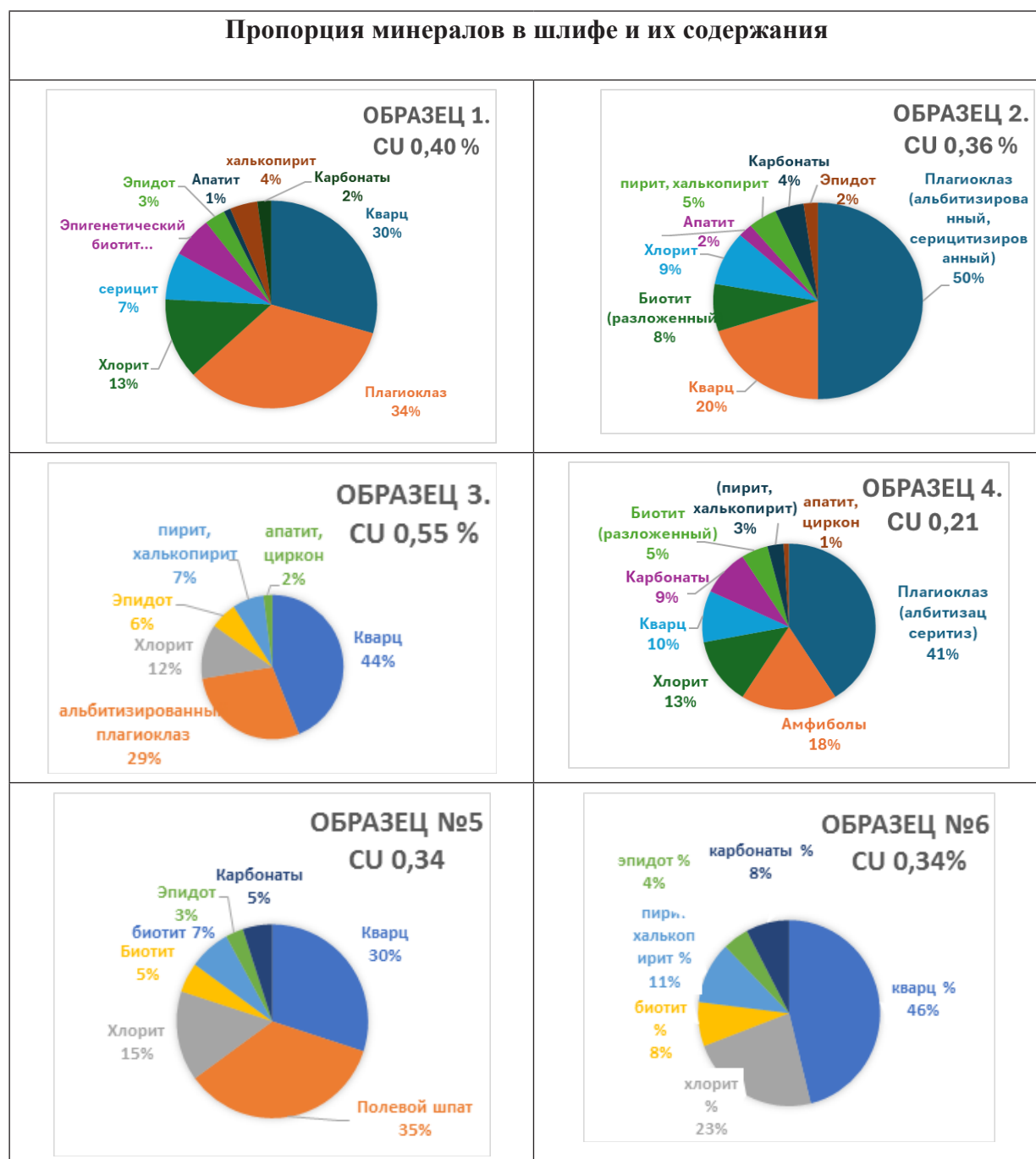


Рисунок 7 – Пропорция минералов в шлифе и их содержания

Для оценки влияния наиболее распространенных минералов на содержание рудных компонентов применяется коэффициент корреляции Пирсона (1). На основании данных, представленных в таблице 1, выполняется расчет степени влияния каждого минерала на содержание меди, что позволяет выявить закономерности распределения рудных элементов в породе.

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

где,

x_i, y_i – значения двух переменных;

$\bar{x}, \bar{y}$ – средние значения этих переменных;

r – коэффициент корреляции Пирсона;

Интерпретация коэффициента r :

$r = 1$ полная положительная линейная зависимость;

$r = -1$ полная отрицательная линейная зависимость;

$r = 0$ отсутствие линейной зависимости.

Таблица 1 – Процентные показатели часто встречающихся минералов и их содержания

Cu%	0,40%	0,36%	0,55%	0,21%	0,34%	0,34%	Коэффициент корреляции
кварц %	30	20	44	10	30	46	0,702
плагиоклаз %	34	50	29	41	0	0	-0,026
хлорит %	13	9	12	13	15	23	-0,174
биотит%	6	8	0	5	5	8	-0,606
(пирит) халькопирит %	4	5	7	3	0	10	0,342
эпидот %	3	2	6	0	3	4	0,907
карбонаты %	2	4	0	9	5	8	-0,906

Заключение

Как видим в таблице 1, есть корреляция меди с кварцем, эпидотом и халькопиритом. Кварц влияет на распределение меди в меднопорфировых месторождениях только тогда, когда он образуется в результате заполнения трещин гидротермальными растворами, сопровождающими сульфидную минерализацию. В таких случаях кварц может служить индикатором рудоносных процессов [8]. Однако не весь кварц связан с накоплением меди – например, кварц пропилютовой альтерации или поздний кварц, сформировавшийся после основного этапа минерализации, не всегда указывает на высокое содержание медных руд. Здесь важно учитывать вторичные изменения. Эпидот сам по себе не является рудным минералом меди, часто образуется при метасоматических и гидротермальных процессах, особенно в зонах скарнов, где также могут присутствовать сульфиды меди.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Даулеев С.Ж., Водолецкий Э.С., Ужкенов Б.С. и др. Глубинное строение и минеральные ресурсы Казахстана: в 3 т. – Алматы, 2002. – Т. 1. – 248 с.
- 2 Геология СССР, Центральный Казахстан. – М: Недра, 1972. – Т. XX, кн. 2. – 380 с.
- 3 Атлас литолого-палеогеографических, структурных, палеоспластических и геоэкологических карт Центральной Евразии / Под ред. Федоренко О.А., Милетенко Н.В. – Алматы: ЦГОВС РК, 2002.

- 4 Коробкин В.В. Буслов М.М. Тектоника и геодинамика западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (палеозойды Казахстана) // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 12. – С. 2032–2055.
- 5 Сидоренко А.В. Оптическое распознавание рудных минералов в отраженном свете. – М: Недра, 1975. – 264 с.
- 6 Атлас рудных минералов в отраженном свете / Под ред. А. Я. Кедрова. – М: Недра, 1990. – 200 с.
- 7 Сафонов Ю.Г., Григорьев В.Н., Смирнов В.Н. Металлогения и геодинамика Центрального Казахстана: новые данные и интерпретации // Геология и полезные ископаемые Центральной Азии. – 2021. – № 2. – С. 45–67.
- 8 Nghipulile T., Moongo T.E., Dzinomwa G., Maweja K., Mapani B., Kurasha J., Amwaama M. Effect of mineralogy on grindability – A case study of copper ores // Журнал Южноафриканского института горного дела и металлургии. – 2023. – Вып. 123. – №3. – С. 133–140.

REFERENCES

- 1 Dauleev, S.Zh., Vodoleckiy, E.S., Uzhkenov, B.S. Glubinnoe stroenie i mineral'nye resursy Kazakhstana: v 3 t. [Deep structure and mineral resources of Kazakhstan: in 3 vols.] (Almaty, 2002), vol. 1, 248 p. [in Russian].
- 2 Geologiya SSSR. Tsentral'nyi Kazakhstan [Geology of the USSR. Central Kazakhstan] (Moscow: Nedra, 1972), vol. 20, Book 2, 380 p. [in Russian].
- 3 Fedorenko, O.A. Miletenko, N.V. (Eds.) Atlas litologo-paleogeograficheskikh, strukturnykh, paleoplasticheskikh i geoekologicheskikh kart Tsentral'noi Evrazii [Atlas of lithological-paleogeographic, structural, paleoplastic and geo-ecological maps of Central Eurasia] (Almaty: TsGOVS RK, 2002). [in Russian].
- 4 Korobkin, V.V. Tectonics and geodynamics of the western part of the Central Asian fold belt (Paleozooids of Kazakhstan), Geologiya i Geofizika, 52(12), 2032–2055 (2011). [in Russian].
- 5 Sidorenko, A.V. Opticheskoe raspoznavanie rudnykh mineralov v otrazhennom svete [Optical recognition of ore minerals in reflected light] (Moscow: Nedra, 1975), 264 p. [in Russian].
- 6 Kedrov, A.Ya. (Ed.) Atlas rudnykh mineralov v otrazhennom svete [Atlas of ore minerals in reflected light] (Moscow: Nedra, 1990), 200 p. [in Russian].
- 7 Safonov, Yu.G., Grigoryev, V.N., Smirnov, V.N. Metallogeny and geodynamics of Central Kazakhstan: new data and interpretations, Geologiya i poleznye iskopaemye Tsentral'noi Azii, 2, 45–67 (2021). [in Russian].
- 8 Nghipulile, T., Moongo, T.E., Dzinomwa, G., Maweja, K., Mapani, B., Kurasha, J., Amwaama, M. Effect of mineralogy on grindability – A case study of copper ores. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 123(3), 133–140 (2023).

¹*Назирханов Э.Н.,

магистр, геолог, ORCID ID: 0009-0008-2768-6061,

*e-mail: eldornazirkhanov@mail.ru

¹«KazMinerals Bozshakol» ЖШС, Екібастұз қ., Қазақстан

БОЗШАКӨЛ КЕН ОРНЫНДАҒЫ МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ ҚҰРАМ МЕН МЫС МӨЛШЕРІНІҢ ӨЗАРА БАЙЛАНЫСЫН КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Аңдатпа

Бұл жұмыста тау жыныстарындағы рудалық компоненттердің мөлшері мен олардың минералогиялық құрамымен өзара байланысы жан-жақты зерттелді. Зерттеудің мақсаты – бастапқы және екінші минералдардың құрамына байланысты, әсіресе мыс элементінің таралу заңдылықтарын анықтау. Жұмыс петрографиялық және минералогиялық зерттеу әдістерін қамтитын кешенді талдауға негізделген. Зерттеу аясында бұрғылау ұңғымаларынан алынған тау жынысы үлгілері егжей-тегжейлі зерттелді. Негізгі назар шифтерді микроскопиялық талдауға аударылды, бұл тау жыныстарының құрылымдық-текстуралық ерек-

шеліктерін анықтап, негізгі және екінші минералдардың құрамын сандық бағалауға мүмкіндік берді. Дәлдікті арттыру мақсатында геохимиялық талдау әдістері қолданылды, нәтижесінде рудалық компоненттердің мөлшері нақтыланып, жыныстардағы әртүрлі минералдардың пайыздық үлесі анықталды. Нәтижелер мыс құрамының екінші өзгерістердің дәрежесі мен түріне, сондай-ақ халькопирит, екінші кварц, хлорит және серицит сияқты минералдардың болуына байланысты айтарлықтай өзгеретінін көрсетті. Мыс құрамының минералогиялық құраммен өзара байланысын анықтау және сандық бағалау үшін Пирсонның корреляция коэффициенті қолданылды. Бұл кейбір минералдар мен мыс концентрациясы арасындағы статистикалық маңызды тәуелділіктерді анықтауға мүмкіндік берді. Атап айтқанда, мыс құрамымен оң корреляциялар және жыныстардың қарқынды өзгерісі кезінде түзілетін минералдармен теріс байланыстар байқалды. Алынған нәтижелер геологиялық барлау жұмыстары үшін практикалық тұрғыдан маңызды. Айқындалған корреляциялық байланыстар керн сипаттамаларын талдау мен рудалылықты болжау модельдерін құруда қолдануға болады. Бұл барлау жұмыстарының тиімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеу барысында пайдаланылған әдістеме ұқсас минералдану жағдайлары бар басқа кен орындарында да бейімделіп қолданылуы мүмкін.

Тірек сөздер: петрографиялық талдау, Пирсон корреляция коэффициенті, шлиф, керн, кенділік.

¹***Nazirkhanov E.N.**

Master, Geologist, ORCID ID: 0009-0008-2768-6061,

*e-mail: eldornazirkhanov@mail.ru

¹LLP “KazMinerals Bozshakol”, Ekibastuz, Kazakhstan

CORRELATION ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN MINERALOGICAL COMPOSITION AND COPPER CONTENT AT THE BOZSHAKOL DEPOSIT

Abstract

This survey presents a comprehensive investigation of the ore component content in rocks and its relationship with the mineralogical composition. The aim of the research was to identify patterns in the distribution of ore elements, particularly copper, depending on the composition of primary and secondary minerals. The work is based on an integrated analysis involving both petrographic and mineralogical research methods. As part of the study, a detailed examination of rock samples taken from borehole core was carried out. Particular attention was given to the microscopic analysis of thin sections, which made it possible to determine the textural and structural features of the rocks and perform a quantitative assessment of the content of primary and secondary minerals. To improve accuracy, geochemical analysis methods were used to refine the content of ore components and determine the percentage of various minerals in the rocks. The results showed that copper content can vary significantly depending on the degree and type of secondary alteration, as well as the presence of specific minerals such as chalcopyrite, secondary quartz, chlorite, and sericite. To identify and quantitatively assess the relationships between copper content and mineralogical composition, Pearson's correlation coefficient was applied. This made it possible to establish statistically significant correlations between certain minerals and copper concentration. Positive correlations between copper content and specific minerals were identified, as well as negative correlations with minerals formed during intense alteration processes. The obtained results have practical significance for geological exploration. The revealed correlation relationships can be used during core description and in the development of predictive models of ore-bearing potential, which significantly increases the efficiency of exploration work. The methodology applied in this research can also be adapted for other deposits with similar mineralization conditions.

Keywords: petrographic analysis, Pearson correlation coefficient, thin section, core, ore potential.

Дата поступления статьи в редакцию: 11.05.2025

UDC 553.4(574)
IRSTI 26.23.13

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-356-369>

^{1*}**Tulepbayev K.,**

Master, ORCID ID: 0009-0006-4384-4483,

*e-mail: k_tulepbayev@kbtu.kz

¹**Tulemissova Zh.,**

PhD, Associate Professor, School of Geology, ORCID ID: 0000-0003-1803-4535,

e-mail: z.tulemissova@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

HYDROTHERMAL ALTERATION AND MINERALOGICAL ZONATION AT THE BOZSHAKOL PORPHYRY COPPER DEPOSIT: INTEGRATION OF SPECTRAL, MAGNETIC, AND 3D MODELING DATA

Abstract

This study investigates the mineralogical and spatial characteristics of hydrothermal alteration at the Bozshakol porphyry copper deposit within the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) in Kazakhstan. Geological and geophysical exploration conducted from 2018 to 2024 provided an extensive dataset comprising approximately 24,000 meters of drill core samples collected at two-meter intervals. Analytical methods included short-wave infrared (SWIR) spectroscopy using Arcspectro FT-NIR Rocket (900–2600 nm) and TerraSpec4 spectrometer (350–2500 nm), complemented by magnetic susceptibility measurements utilizing a KT-10 kappameter. Spectral data interpretation employed The Spectral Geologist (TSG) software, integrating automated mineral identification (TSA algorithm) and manual validation (Aux Match). This integrated approach precisely mapped hydrothermal alteration zones, delineating potassic, phyllic, and propylitic facies, each defined by distinct mineral assemblages and magnetic signatures. Potassic alteration, located centrally, features secondary biotite and K-feldspar. This transitions outward into a phyllic halo characterized by pervasive sericitization and reduced magnetite content. The peripheral propylitic zone displays abundant chlorite, epidote, carbonate minerals, and elevated magnetic susceptibility due to magnetite preservation. A key outcome was identifying zones rich in chlorite and epidote, known to adversely affect flotation recovery rates, thus impacting ore-processing efficiency. Leapfrog Geo software facilitated 3D modeling, enhancing visualization and structural interpretation of alteration domains. This comprehensive characterization significantly improves geological understanding and supports optimized exploration and processing strategies, demonstrating best practices in applying modern spectroscopic and geophysical methods to porphyry copper deposits.

Keywords: Bozshakol deposit, porphyry copper systems, hydrothermal alteration, mineral zonation, potassic alteration, phyllic alteration, propylitic alteration, infrared spectroscopy.

Introduction

Porphyry copper deposits represent one of the most economically significant types of ore deposits globally due to their extensive scale, high metal grades, and valuable by-products such as molybdenum, gold, and silver. These deposits are critical resources underpinning modern technological societies, playing a central role in supplying metals essential for infrastructure development, electronics, renewable energy systems, and various industrial applications. The economic viability and longevity of mining operations in these deposits rely significantly on understanding their geological and mineralogical characteristics, especially the hydrothermal alteration zonation.

Hydrothermal alteration in porphyry copper deposits typically manifests as distinct concentric zones surrounding magmatic intrusions [1]. The primary alteration types include potassic, propylitic, phyllic, and argillic, each characterized by unique mineralogical assemblages and distinct metal associations [2]. Potassic zones, typically located near the intrusion cores, commonly exhibit higher concentrations of copper and molybdenum, making them prime exploration and mining targets.

Conversely, propylitic alteration typically marks the peripheral margins of the mineralizing system, usually containing lower metal grades. Intermediate phyllic zones, dominated by sericite, often indicate transitional hydrothermal conditions and are crucial in exploring deeper, economically promising mineralization. Recognizing and accurately mapping these alteration zones is not only vital for exploration and resource estimation but also crucial for optimizing metallurgical processes. Certain minerals, notably chlorite, epidote, and various clay minerals, can adversely affect ore processing methods, particularly flotation efficiency, underscoring the economic importance of precise alteration characterization.

Globally, major porphyry copper systems such as Bingham Canyon (USA), Chuquibambilla (Chile), and Oyu Tolgoi (Mongolia) have been extensively studied, providing robust models of alteration zonation and fluid evolution [2]. Despite significant advancements in understanding these systems, regional variations due to geological, structural, and tectonic differences remain poorly defined in many other deposits.

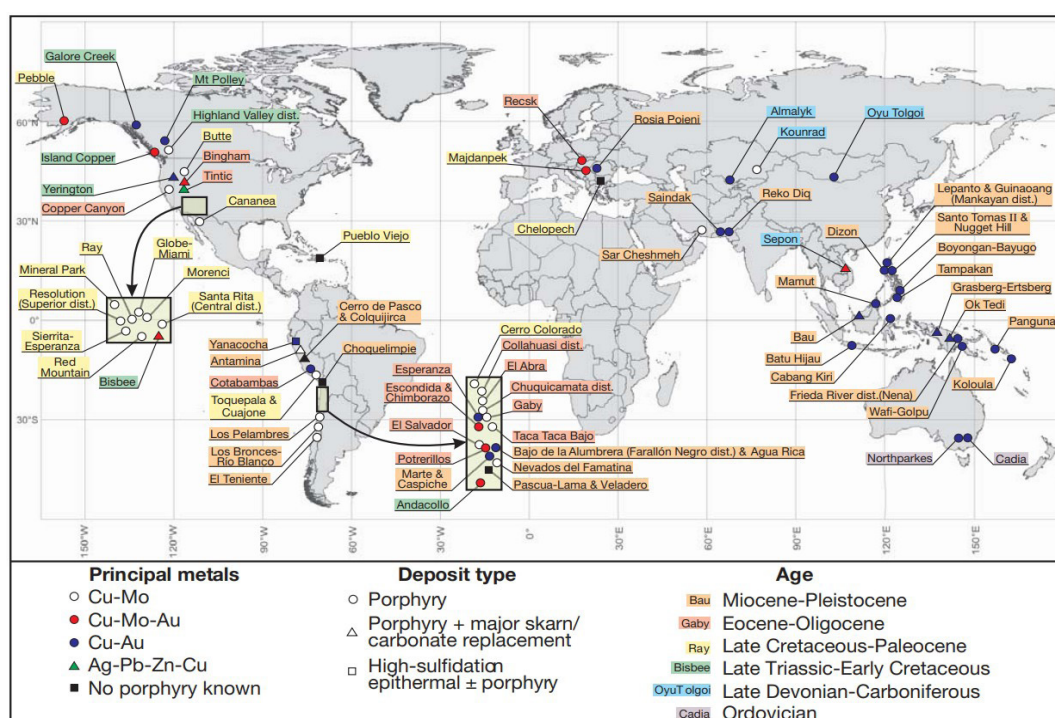


Figure 1 – Global map of the location, age, deposit type and principal metals of major porphyry copper deposits (Sillitoe, 2010)

Kazakhstan hosts several world-class porphyry copper deposits, including Bozshakol, Kounrad, and Aktogay, with Bozshakol standing out due to its large scale and strategic importance. Located within the Kipchak Paleozoic island arc volcanic belt, part of the expansive Central Asian Orogenic Belt (CAOB), Bozshakol provides a unique geological setting to study porphyry copper mineralization formed under Paleozoic subduction-related tectonics [3]. Previous geological studies conducted at Bozshakol laid foundational understanding of its geological structure and broad alteration patterns. However, these earlier works predominantly employed traditional geological methods, providing limited spatial resolution and often insufficient mineralogical detail for modern exploration and processing requirements.

Recent developments in analytical methodologies have significantly improved the capacity to accurately identify and map hydrothermal alteration minerals. Infrared spectroscopy, in particular, has emerged as a highly effective technique for rapid and precise mineral identification in geological materials. When combined with magnetic susceptibility measurements and advanced three-

dimensional modeling techniques, these methods offer unparalleled accuracy and spatial resolution in defining alteration zones and their economic implications.

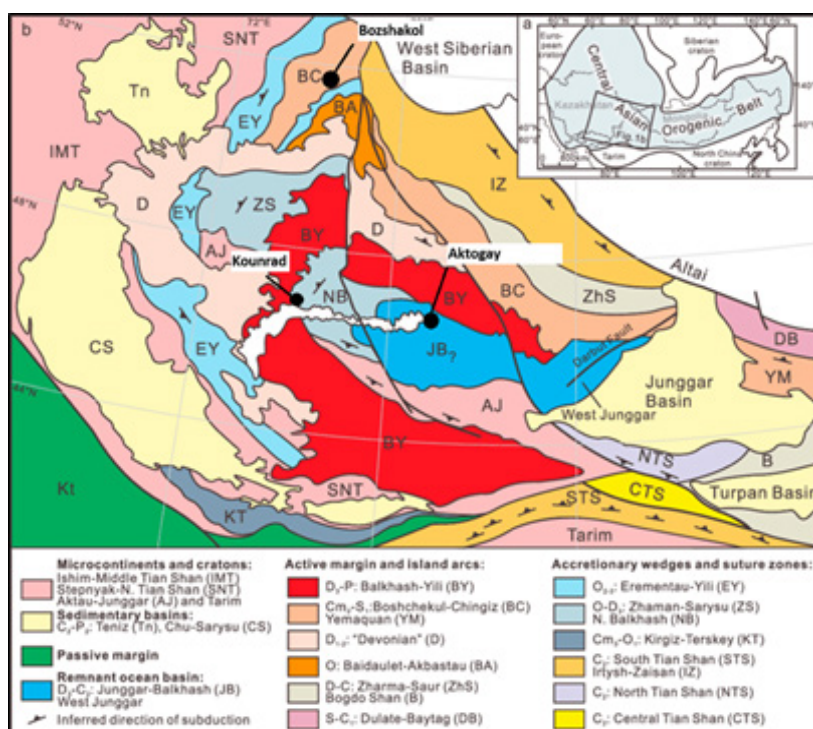


Figure 2 – Simplified regional geological map clearly illustrating the Central Asian Orogenic Belt (CAOB)

Given this technological advancement and the geological potential of Bozshakol, the current study aims to address existing knowledge gaps by deploying state-of-the-art spectroscopic techniques and integrating multiple analytical datasets into detailed three-dimensional geological models. Specifically, this research seeks to: (1) delineate the mineralogical types and spatial zonation of hydrothermal-metasomatic alterations at the Bozshakol deposit, (2) identify and characterize alteration minerals that negatively affect copper recovery efficiency, and (3) establish robust criteria for improved exploration targeting and ore-processing strategies.

Ultimately, the outcomes of this research are expected to significantly enhance geological understanding, improve resource management efficiency, and provide a valuable methodological framework applicable to similar porphyry systems worldwide.

Materials and methods

The present study is based on an extensive collection of drill core samples retrieved from exploration boreholes across the Bozshakol deposit between 2018 and 2024. The total volume of analyzed core reaches approximately 24,000 meters, with systematic sampling conducted every 2 meters. This regular interval was chosen to ensure comprehensive spatial coverage across all lithological domains and alteration zones. Each sample, typically between 2 and 5 cm in length, was prepared by careful washing with distilled water, drying under controlled laboratory conditions, labeling, and individual packaging to prevent contamination. Drill holes were selected based on their spatial coverage across the main ore body and peripheral zones, ensuring representation of all known alteration types.

Infrared spectroscopy (IR spectroscopy) is a powerful analytical technique extensively utilized in geology for identifying and characterizing minerals based on their molecular structures. The

method involves directing infrared radiation onto a geological sample and measuring the absorption of energy at SWIR wavelengths, which correspond to vibrations of chemical bonds within minerals. Each mineral has distinct absorption patterns or “fingerprints” arising from vibrations of molecular bonds, such as stretching or bending of hydroxyl groups, carbonate groups, silicates, and other functional groups. These characteristic absorption bands allow geologists to rapidly and accurately identify mineral phases, even in complex mixtures [4].

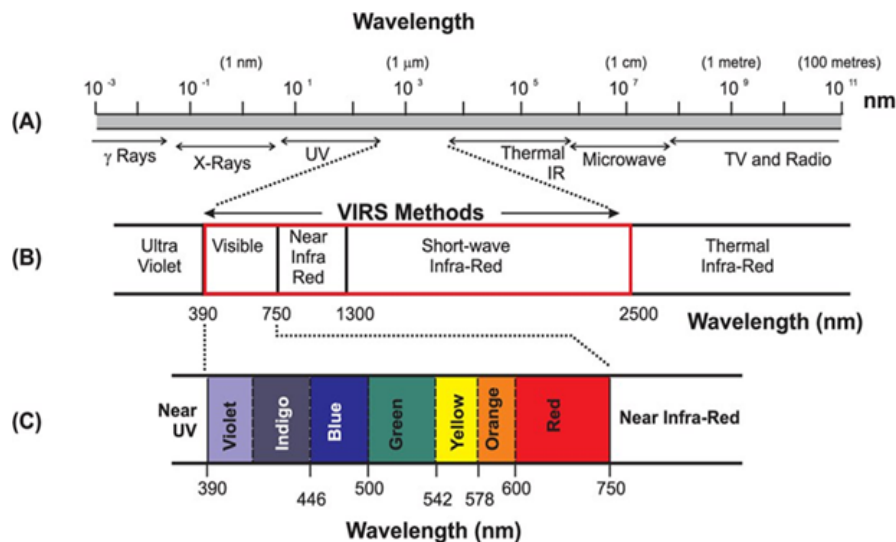


Figure 3 – Distribution of electromagnetic waves along wavelengths

Modern Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy enhances precision by simultaneously acquiring absorption data across a broad spectral range, enabling detailed analysis of subtle mineralogical variations. Geological samples, including drill core, rock chips, or powders, are commonly analyzed via techniques like transmission, diffuse reflectance, or attenuated total reflectance (ATR).

Type	Silicate structure	Mineral group	Example	VNIR response	SWIR response	LWIR response
Silicates	Inosilicates	Amphibole	Actinolite	Non-diagnostic	Good	Moderate
		Pyroxene	Diopside	Good	Moderate	Good
	Cyclosilicates	Tourmaline	Elbaite	Non-diagnostic	Good	Moderate
	Nesosilicates	Garnet	Grossular	Moderate	Non-diagnostic	Good
		Olivine	Forsterite	Good	Non-diagnostic	Good
	Sorosilicates	Epidote	Epidote	Non-diagnostic	Good	Moderate
	Phyllosilicates	Mica	Muscovite	Non-diagnostic	Good	Moderate
		Chlorite	Clinocllore	Non-diagnostic	Good	Moderate
		Clay minerals	Illite	Non-diagnostic	Good	Moderate
			Kaolinite	Non-diagnostic	Good	Moderate
	Tectosilicates	Feldspar	Orthoclase	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Good
			Albite	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Good
		Silica	Quartz	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Good
Non-silicates	Carbonates	Calcite	Calcite	Non-diagnostic	Moderate	Good
		Dolomite	Dolomite	Non-diagnostic	Moderate	Good
	Hydroxides	Gibbsite	Gibbsite	Non-diagnostic	Good	Moderate
		Alunite	Alunite	Moderate	Good	Moderate
	Sulphates	Gypsum	Gypsum	Non-diagnostic	Good	Good
		Borates	Borax	Non-diagnostic	Moderate	TBD
	Halides	Chlorides	Halite	Non-diagnostic	TBD	TBD
	Phosphates	Apatite	Apatite	Moderate	Non-diagnostic	Good
	Hydrocarbons		Bitumen	TDB	Moderate	TBD
	Oxides	Hematite	Hematite	Good	Non-diagnostic	Non-diagnostic
		Spinel	Chromite	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Non-diagnostic
	Sulphides		Pyrite	Non-diagnostic	Non-diagnostic	Non-diagnostic

Figure 4 – Qualitative accuracy of spectral analyses in VNIR, SWIR, and LWIR ranges

IR spectroscopy is particularly effective for studying clay minerals, chlorite, epidote, carbonates, sulfates, and other alteration minerals commonly associated with hydrothermal systems. By identifying these minerals, geologists can reconstruct hydrothermal alteration patterns, interpret geological history, assess economic mineralization potential, and determine ore-processing characteristics, notably flotation performance. Thus, infrared spectroscopy plays a critical role in mineral exploration, deposit modeling, and geometallurgical assessments in geological research.

Two infrared spectrometers were used over the multi-year program [9]. From 2018 to 2020, analyses were performed with a Fourier-transform spectrometer Arcspectro FT-NIR Rocket equipped with an ArcSphere-50-Hal integrating sphere. This configuration allowed SWIR spectra to be collected across the 900–2600 nm range. The Arcspectro system was calibrated using a suite of mineral standards before each analytical session to ensure spectral accuracy.

A quality assurance and quality control (QA/QC) protocol was implemented during sample collection and preparation. Duplicate measurements, white reference was regularly used to assess consistency. Data verification included statistical validation of mineralogical trends and cross-comparison between spectroscopic outputs and geological logs.

Beginning in 2021, a TerraSpec4 portable spectrometer with improved detection capacity (350–2500 nm range) was employed for all new core analyses. Calibration of the TerraSpec4 was conducted daily using a white reference panel (Spectralon) and dark current correction. The enhanced spectral resolution and stability of the TerraSpec4 allowed for the identification of subtle mineralogical features, including variations within white mica and chlorite groups.

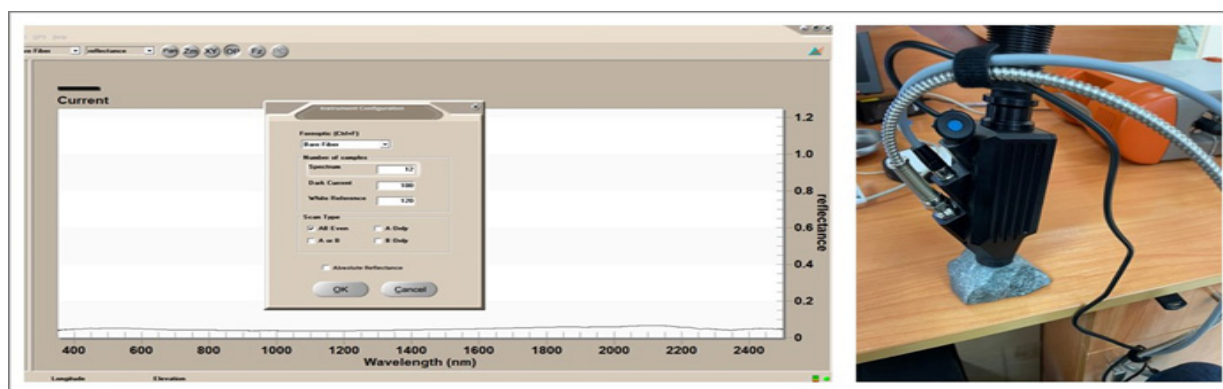


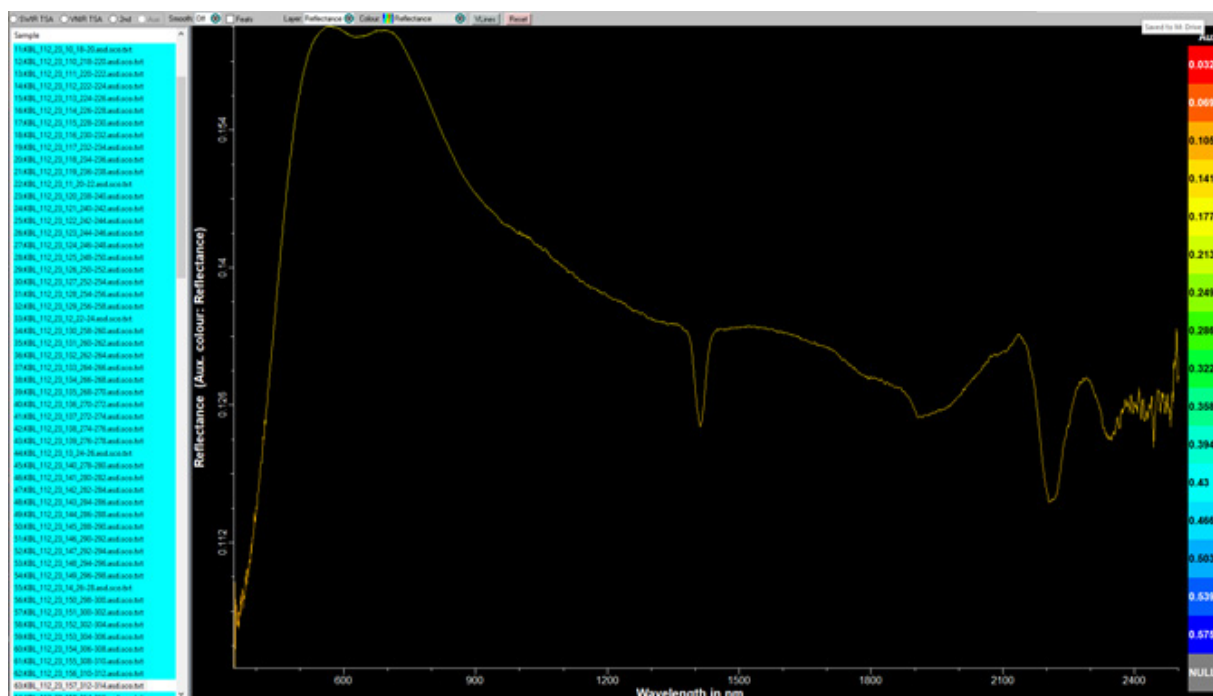
Figure 5 – Sample preparation and spectral analysis using TerraSpec4 instrument

Spectral data were interpreted using The Spectral Geologist 8 (TSG) software, which integrates two primary analytical tools: The Spectral Assistant (TSA) for automated mineral recognition based on established libraries, and Aux Match, a comparative tool allowing alignment of unknown spectra with known reference patterns. The TSA algorithm uses continuum removal, derivative analysis, and a similarity index to match unknowns to diagnostic minerals. Aux Match functions as a visual overlay tool to refine identifications when multiple species are spectrally similar. Outputs included mineral group classification, confidence levels, and spatial variation trends.

The Spectral Geologist (TSG) software version 8 is a powerful tool for interpreting spectral data obtained with a spectrometer.

The interpretation of spectra using TSG-8 is carried out in the following sequence:

- ♦ Data loading: First, spectral data is loaded into TSG-8. This can be data obtained directly from the instrument or imported from other sources.
- ♦ Preprocessing: The software performs data preprocessing, including background correction and noise removal, to improve the quality of spectral signals.
- ♦ Mineral identification: TSG-8 uses a library of reference spectra to match measured spectra with known minerals. The software determines the presence and concentration of minerals in the sample.



(b) Quantitative summary of the constructed mineral database of borehole

Host_ID	From	To	Sample_ID	Min1_tSAS	Wt1_tSAS	Min2_tSAS	Wt2_tSAS	Min3_tSAS	Wt3_tSAS	w200	d200	Kaolinite_Cry stability	Sericite_Cry stability	w250	d250	w350	d350	d1900	smooth	
KBL_010_21	22	24	12	Chlorite-Fe	0.574 Montmorillonite	0.446						0.0036		0.136	2238.28	0.0127	2353.68		0.026	0.4
KBL_010_21	24	26	13	Kaolinite-WX	0.556 Montmorillonite	0.424				2007.49		0.018	1.968	0.708	0.00328	2380.48	0.00452	0.0255	0.4	
KBL_010_21	26	28	14	Kaolinite-FX	0.547 Chlorite-Fe	0.453				2007.41		0.0286	2.462	1.072	2245.49	0.00879	2347.62	0.00287	0.0267	0.4
KBL_010_21	28	30	15	Montmorillonite	0.4 Epidote	0.559 Kaolinite-WX				0.24	2007.83	0.0201		0.832	2252.36	0.0187	2336.64	0.0161	0.0247	0.4
KBL_010_21	30	32	16	Chlorite-FeMg	0.542 Phengiticillite	0.458						0.0158		1.064	2246.3	0.014	2343.41	0.00525	0.0149	0.4
KBL_010_21	32	34	17	Chlorite-FeMg	0.711 Montmorillonite	0.289									2293.47	0.00506	2338.03	0.00274	0.00543	0.2
KBL_010_21	34	36	18	Kaolinite-WX	0.404 Montmorillonite	0.306 Chlorite-FeMg	0.29	2207.86	0.0273			2.41	1.221	2248.12	0.00791	2352.8	0.00395	0.0224	0.3	
KBL_010_21	36	38	19	Montmorillonite	0.372 Chlorite-FeMg	0.354 Kaolinite-WX	0.274	2208.22	0.0146			1.401	2249.11	0.00807	2355.52	0.00303	0.0193	0.0233	0.3	
KBL_010_21	38	40	20	Chlorite-Fe	0.531 Montmorillonite	0.469					2208.41	0.0112		0.477	2246.9	0.0109	2349.71	0.0235	0.4	
KBL_010_21	40	42	21	Montmorillonite	0.464 Chlorite-Fe	0.32 Kaolinite-FX	0.216	2205.98	0.028			0.911	2242.28	0.011	2352.86	0.00367	0.0308	0.4		
KBL_010_21	42	44	22	Chlorite-Fe	0.398 Siderite	0.37 Muscovite	0.232	2209.07	0.0048					0.842	2252.35	0.00438	2333.9	0.00313	0.0057	0.4
KBL_010_21	44	46	23	Chlorite-FeMg	0.504 Montmorillonite	0.496					2214.19	0.00229		0.299	2249.65	0.00255	2343.13	0.00218	0.00776	0.4
KBL_010_21	46	48	24	Muscovite	0.618 Magnesite	0.382					2207.08	0.00651		0.184	2249.37	0.00381	2344.12	0.00243	0.0353	0.4
KBL_010_21	48	50	25	Chlorite-FeMg	0.5 Muscovite	0.5					2205.63	0.0339		2.56		0.00636	2344.11	0.00498	0.0133	0.4
KBL_010_21	50	52	26	Muscovite	1						2206.76				2233.39		2344.49	0.00206	0.0107	0.4
KBL_010_21	52	54	27	Chlorite-FeMg	0.796 Kaolinite-FX	0.204					2208.37	0.0166		0.962	2250.48	0.0257	2340.63	0.00723	0.0172	0.4
KBL_010_21	54	56	28	Montmorillonite	0.571 Chlorite-Fe	0.429					2209.21	0.0126		0.37	2232.34	0.0172	2356.31	0.00315	0.0241	0.5
KBL_010_21	56	58	29	Aspectral	1						2214.06				2253.35				0.00224	0.4
KBL_010_21	58	60	30	Chlorite-FeMg	1						2224.86				2249.55	0.00188	2227.75		0.026	0.4
KBL_010_21	60	62	31	Montmorillonite	0.616 Chlorite-FeMg	0.384					2210.63	0.00952		0.268	2243.75	0.0181	2340.17	0.00362	0.0356	0.6
KBL_010_21	62	64	32	Phengite	0.403 Chlorite-FeMg	0.385 Magnesite	0.212	2221.16	0.00319			0.47	2250.98	0.00413	2343.44		0.0056		0.4	
KBL_010_21	64	66	33	Muscoviticillite	0.505 Chlorite-FeMg	0.495					2210.26	0.00278		0.539	2230.7		2340.74	0.00516		0.4
KBL_010_21	66	68	34	Montmorillonite	1						2221.83				2335.84			0.00468		0.4
KBL_010_21	68	70	35	Chlorite-FeMg	0.616 Muscovite	0.384					2216.84				2252.69	0.00283	2332.67		0.00368	0.4
KBL_010_21	70	72	36	Chlorite-FeMg	0.784 Phengiticillite	0.216					2221.23	0.00308		0.388	2252.8	0.00736	2343.02	0.00325	0.00793	0.4
KBL_010_21	72	74	37	Siderite	0.56 Montmorillonite	0.44					2215.91				2230.63		2325.41			0.4
KBL_010_21	74	76	38	Muscoviticillite	0.574 Chlorite-FeMg	0.426					2210.96	0.0146		0.832	0.00721	2340.67	0.00414	0.0175		0.4
KBL_010_21	76	78	39	Chlorite-Mg	0.553 Montmorillonite	0.447					2209.87	0.00293	3.326	0.661	2249.26		2332.94		0.00444	0.4
KBL_010_21	78	80	40	Montmorillonite	0.431 Chlorite-FeMg	0.325 Calcite	0.243	2209.39	2.423					2247.79	0.00332	2336.12	0.00505	0.0137	0.4	
KBL_010_21	80	82	41	Chlorite-FeMg	0.713 Muscoviticillite	0.287					2223.28	0.00196			2251.05	0.00273	2341.13	0.00279		0.4
KBL_010_21	82	84	42	Montmorillonite	0.636 Chlorite-FeMg	0.364					2208.59	0.00269		0.146			2342.95	0.00244	0.0193	0.6
KBL_010_21	84	86	43	Chlorite-FeMg	0.564 Montmorillonite	0.426					2221.31				2248.95	0.00541	2338.19	0.00307	0.00311	0.4
KBL_010_21	86	88	44	Aspectral	1						2215.23				2239.6				0.00194	0.4
KBL_010_21	88	90	45	Muscovite	0.706 Chlorite-Mg	0.296					2205.86	0.00475			2233.37		2340.7			0.4
KBL_010_21	90	92	46	Phengiticillite	0.55 Chlorite-FeMg	0.45					2213.07	0.00587		2.396	0.00455	2340.84	0.0037	0.00229		0.4
KBL_010_21	92	94	47	Phengiticillite	0.513 Chlorite-Mg	0.483					2213.47	0.00587		1.515			2326.82	0.0104	0.00387	0.4
KBL_010_21	94	96	48	Chlorite-FeMg	0.571 Calcite	0.221 Montmorillonite	0.208	2221.65	0.00204				0.296	2250.76	0.0107	2333.12	0.00538	0.00688	0.2	
KBL_010_21	96	98	49	Chlorite-FeMg	1						2220.93	0.00377			2252.93		2324.99	0.00596	0.00349	0.4

Figure 7 – Preparation of a spectral database for 3D modeling

Spectral data were exported in .csv format and aligned with corresponding sample depths, lithological units, and logging metadata. These results were used to generate vertical mineralogical profiles and cross-sectional interpretation panels. Where possible, spectral interpretations were validated by petrographic observations.



Figure 8 – Handheld KT-10 kappameter

In parallel, magnetic susceptibility was measured using a handheld KT-10 kappameter with a 10 kHz coil frequency and 2.5 cm penetration depth, with interpretation guided by established magnetic properties of hydrothermal mineral assemblages [7]. Each 2-meter interval was measured three times on fresh, unfractured core surfaces, and values were averaged to minimize variability. Calibration was conducted using a zero-reference block and high-susceptibility magnetite standard. Reproducibility tests indicated an average relative standard deviation below 3%.

Susceptibility data were analyzed in conjunction with lithology and alteration intensity to delineate magnetite-bearing propylitic zones and distinguish weakly magnetic phyllic zones. Threshold values for susceptibility were established based on population statistics and confirmed through spatial comparison with mineralogical observations.

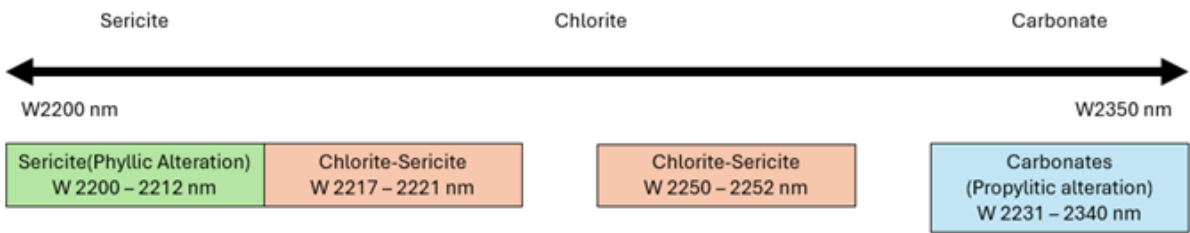


Figure 9 – Numerical Models derived from identified earlier alteration zones

Spectral signatures used in the data analysis:

- ♦ Muscovite: The distinctive spectral characteristics of muscovite (sericite) are found in the wavelength range from 2200 to 2210 nm, designated w2200.
- ♦ Phengite: Sericite alteration associated with phengite is identified by the spectral wavelength of 2210 nm.
- ♦ Chlorite: Information about the magnesium or iron content of chlorite is revealed by absorption signatures in the range between 2240 and 2268 nm.
- ♦ Carbonates and mafic minerals: The spectral signature at 2350 nm is characteristic of carbonate minerals and indicates the presence of absorption due to vibrational movements of CO₃ molecules. This indicator is often well expressed and easily detected in spectral measurements.

Numerous numerical models were built in Leapfrog software (“reference” models) in the indicated ranges of values.

For the previously identified types of hydrothermal-metasomatic alterations, the following numerical models were selected:

- ♦ Sericitic (Phyllic) – Digital model w2200 range 2200–2212 nm.
- ♦ Chlorite-sericite – Digital model w2200 range 2217–2221 nm and model w2250 range 2250–2252 nm.
- ♦ Propylitic (Chlorite-epidote-albite-carbonate) – Digital model w2200 range 2212–2214 nm and model w2350 range 2331–2340 nm

The “baseline” numerical models provided a basic understanding of the distribution of alteration zones at Bozshakol, allowing for a more in-depth interpretation of the data.

Results and discussion

Detailed spectral analysis, integrated with magnetic susceptibility measurements and geological logging, provided comprehensive insights into the hydrothermal alteration zoning at the Bozshakol deposit. Three distinct alteration zones—potassic, phyllic, and propylitic—were identified, each demonstrating unique mineralogical characteristics corresponding to classical copper porphyry alteration zoning [1].

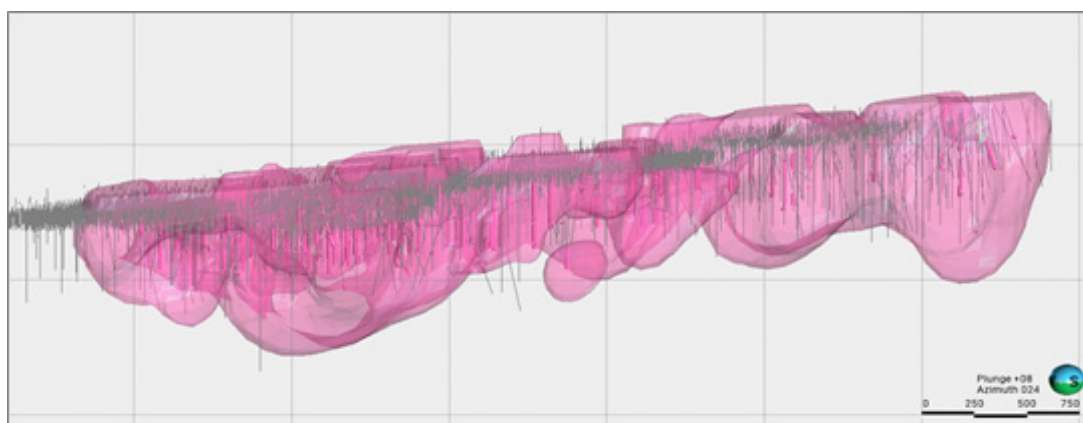


Figure 10 – Distribution of the potassic alteration zone, with labeled spectral features

The potassic alteration zone was primarily observed in central and deeper regions of the deposit [8]. This zone exhibited a pronounced dominance of secondary biotite and K-feldspar, confirmed through consistent infrared spectral signatures, including diagnostic absorption peaks around 2350 nm (Mg-OH bonds) for biotite and around 2200 nm (Al-OH bonds) for K-feldspar. Potassic alteration zones consistently yielded moderate magnetic susceptibility values (approximately $3\text{--}6 \times 10^{-3}$ SI units), correlating with variable magnetite content resulting from hydrothermal processes. The presence of secondary biotite and K-feldspar in this zone indicates the highest-temperature alteration conditions associated with mineralizing fluids at Bozshakol.

Surrounding the potassic core, the phyllic alteration zone was characterized by widespread sericitization, predominantly expressed as fine-grained sericite (muscovite). Spectral features diagnostic of sericite were frequently noted around 2200 nm, with variations towards shorter wavelengths (approximately 2195 nm) reflecting Al-rich muscovite compositions. Magnetic susceptibility in the phyllic alteration zone was notably low, typically below 2×10^{-3} SI units, indicative of significant destruction or alteration of magnetite due to intense hydrolytic processes. The well-

defined spatial extent and mineralogical consistency of the phyllic alteration zone suggest extensive fluid-rock interaction under moderately acidic and cooler hydrothermal conditions compared to the central potassic zone.

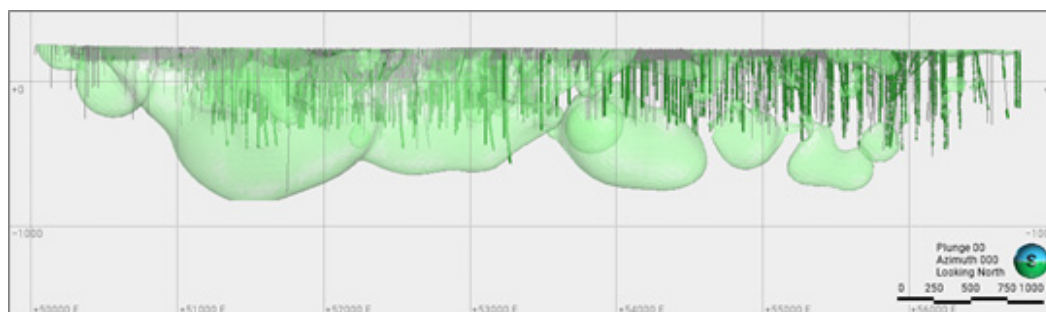


Figure 11 – Numerical model w2200 range 2200-2212nm (sericite)

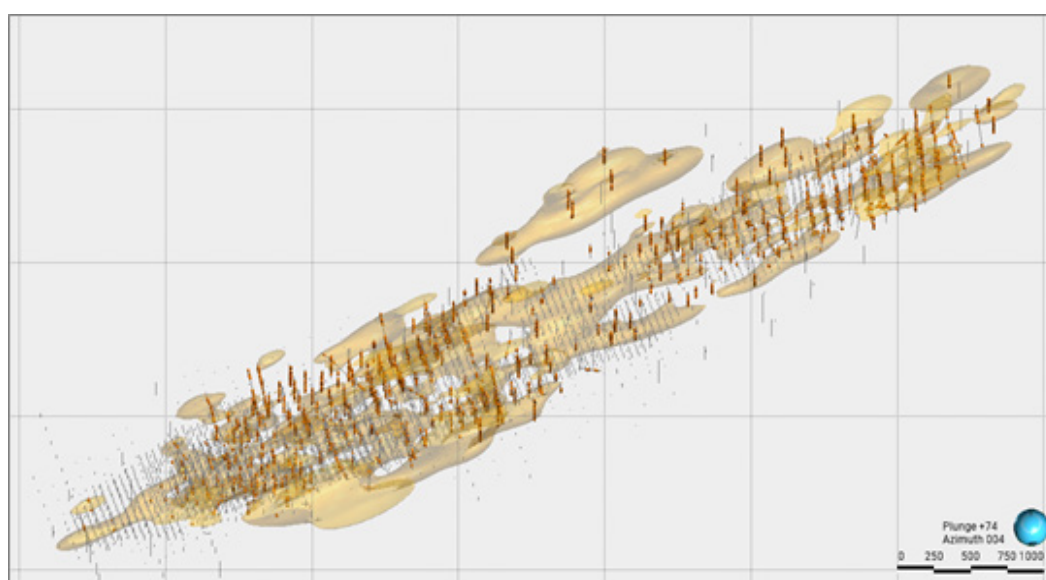


Figure 12 – Numerical model w2250 range 2250-2252nm (chlorite-sericite)

Peripheral to the potassic and phyllic zones, the propylitic alteration exhibited extensive development of chlorite and epidote minerals. Chlorite was frequently identified through characteristic Fe,Mg-OH absorption signatures near 2250 nm and 2340 nm, while epidote showed notable Fe-OH absorption around 1550 nm. High magnetic susceptibility values, frequently exceeding 10×10^{-3} SI units, characterized the propylitic zone due to significant magnetite enrichment, often associated with chlorite. This outermost alteration halo defines the most distal alteration products resulting from relatively low-temperature, neutral to slightly alkaline hydrothermal fluids.

Three-dimensional geological modeling was carried out using Leapfrog Geo 2023.2 software. Logged alteration intervals were manually selected and categorized into alteration types (potassic, phyllic, propylitic) based on spectral data, magnetic response, and visual logging. These intervals were input into the geological model as categorical data using Leapfrog's "interval selection" tool.

Interpolation of alteration zones was conducted using Leapfrog's "Vein Interpolation" and "Lithology Model" modules, applying a boundary-based implicit modeling approach. Interpolations were guided by structural trends and stratigraphic surfaces. Model validation was performed using cross-sections and plan views compared against raw log data, along with volume analysis and overlapping zonal statistics.

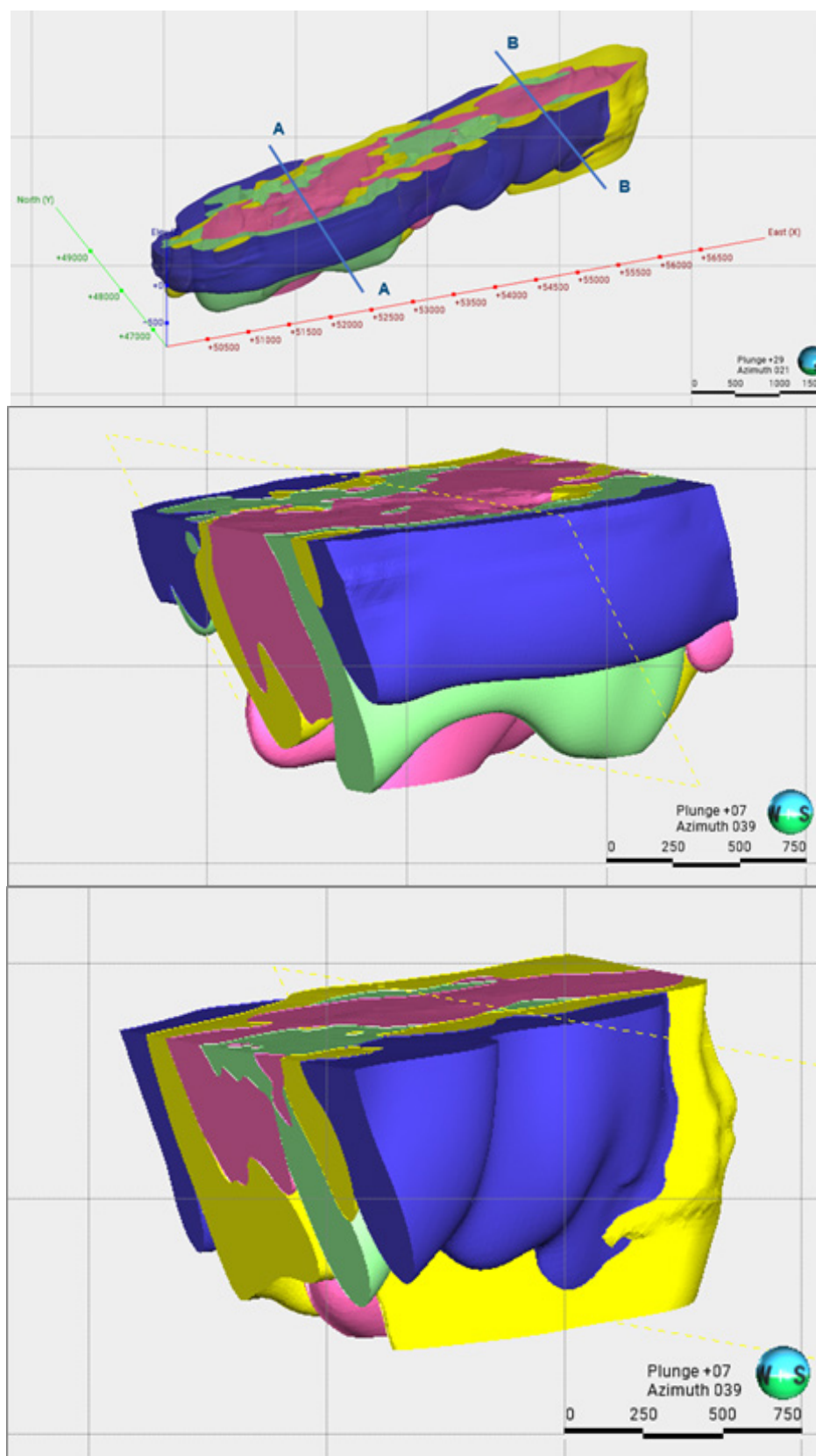


Figure 13 – 3D visualization of alteration zones modeled in Leapfrog Geo 2023.2.
(a) Alteration Model; (b) Section A-A; (c) Section B-B

Together, this multi-technique approach enabled a high-resolution reconstruction of alteration mineralogy and zonation, integrating visual geological observations with advanced analytical datasets. It provided a detailed understanding of the spatial relationships among alteration facies essential for exploration vectoring and process optimization.

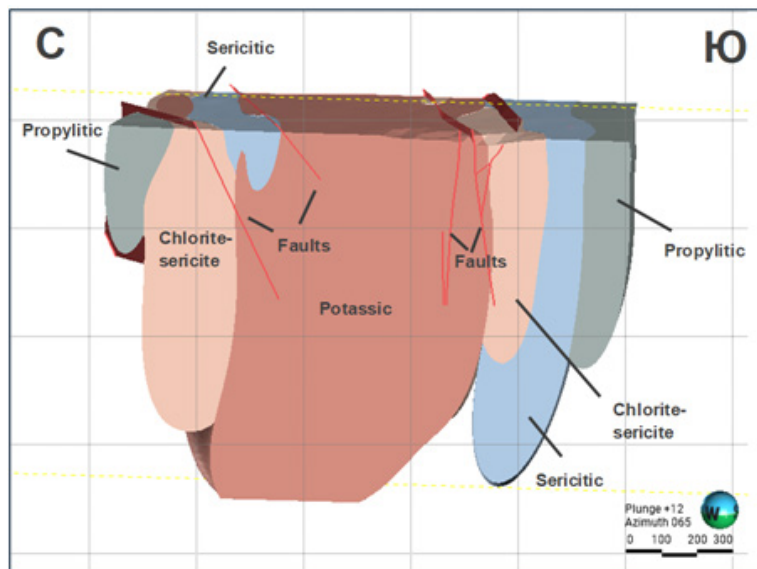


Figure 14 – Extent and characteristics of the alteration zones, clearly labeling areas of chlorite, sericite and epidote enrichment

The identification and spatial characterization of minerals such as chlorite and epidote within the propylitic zone carry significant implications for mineral processing operations. Chlorite, with its platy morphology, often negatively impacts flotation processes by covering sulfide minerals, thus hindering effective reagent adsorption and necessitating increased reagent dosages. Epidote similarly complicates ore processing by increasing pulp viscosity and impeding efficient mineral separation. The clear spatial definition of these minerals enables proactive metallurgical adjustments, optimizing reagent selection, dosing strategies, and pre-treatment processes.

Additional aspects that can be investigated further include the potential influence of host-rock lithology on alteration intensity and mineral distribution, which was suggested by variations observed across different lithological units. Detailed petrographic analyses and mineralogical studies could provide insights into the interactions between hydrothermal fluids and host-rock compositions, potentially refining the interpretation of alteration processes at Bozshakol.

This study also highlighted key analytical limitations. Spectral overlaps, especially between chlorite and epidote, occasionally posed identification challenges despite advanced software solutions provided by TSG's Spectral Assistant (TSA) and Aux Match tools. Future exploration and drilling efforts should emphasize improved interpretation methodologies and additional validation techniques such as X-ray diffraction (XRD) to further mitigate these uncertainties [5].

Future research directions suggested by this study include targeted exploration and drilling efforts, particularly within structurally complex and underrepresented regions. Complementary methods such as detailed geochemical assays, fluid inclusion studies, and stable isotope analyses would provide valuable insights into the temporal evolution of alteration processes, further enhancing the geological model.

In conclusion, the integrated methodological approach applied to the Bozshakol deposit significantly advanced the understanding of its hydrothermal alteration framework. Clearly defined zonation patterns and identified processing implications represent invaluable contributions to both exploration and operational strategies. Furthermore, the methodological insights and outcomes from

this research offer a valuable blueprint for exploring and modeling other complex porphyry copper systems worldwide.

Conclusions

This detailed investigation at the Bozshakol deposit successfully characterized the spatial and mineralogical patterns of hydrothermal alteration through integrated infrared spectral analysis, magnetic susceptibility measurements, and comprehensive geological logging. The research effectively delineated three distinct alteration zones – potassic, phyllic, and propylitic—each marked by unique mineralogical signatures.

The potassic alteration zone was clearly defined by diagnostic minerals such as secondary biotite and K-feldspar, indicating high-temperature hydrothermal processes central to ore formation. This zone's moderate magnetic susceptibility further suggested the complex interplay of magnetite deposition and alteration.

The phyllic alteration zone was characterized by widespread sericite alteration and distinctly low magnetic susceptibility, indicating extensive magnetite destruction due to intense hydrolytic alteration. Clearly defined spectral signatures confirmed the prevalence of Al-rich muscovite compositions, highlighting significant fluid-rock interactions in this intermediate-temperature zone.

Peripheral propylitic alteration, characterized by abundant chlorite and epidote, showed high magnetic susceptibility due to magnetite enrichment. The identification and precise mapping of these minerals hold critical implications for ore processing, especially flotation, where chlorite and epidote notably complicate metallurgical recovery [6].

The practical implications of these findings are substantial, offering clear guidelines for optimized exploration targeting and ore-processing adjustments. Knowledge of specific mineral distributions, particularly of problematic minerals such as chlorite and epidote, enables preemptive metallurgical planning, allowing modifications to reagent usage and treatment strategies to enhance processing efficiency.

This research also identified several analytical limitations and uncertainties, notably spectral overlaps between similar alteration minerals and lack of standardized interpretation of magnetic susceptibility data. Addressing these limitations through development of interpretation methods of magnetic susceptibility and integrating complementary analytical approaches such as X-ray diffraction (XRD) will significantly enhance future studies.

Further research directions recommended by this study include targeted drilling in structurally complex and underrepresented areas, Long-wave infrared (LWIR) spectroscopy, detailed geochemical assays, fluid inclusion analyses, and stable isotope studies. These methodologies promise to deliver deeper insights into alteration processes and the temporal evolution of the hydrothermal system.

Overall, this integrative approach has substantially advanced the geological understanding of the Bozshakol deposit, providing valuable insights directly applicable to exploration and operational strategies. The results of this study serve as a robust methodological framework beneficial for similar porphyry copper deposit investigations worldwide.

REFERENCES

- 1 Lowell, J.D., & Guilbert, J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4), 373–408 (1970).
- 2 Sillitoe, R.H. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41 (2010).
- 3 Yakubchuk, A. Architecture and mineralization of the Central Asian Orogenic Belt and adjacent continental margins. *Tectonophysics*, 351(1-2), 3–31 (2002).
- 4 Clark, R.N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In A.N. Rencz (Ed.), *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*, vol. 3, pp. 3–58 (1999).

5 Bish, D.L., & Post, J.E. Modern Powder Diffraction. Reviews in Mineralogy, 20, Mineralogical Society of America (1989).

6 Wills, B.A., & Finch, J. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (8th ed.) (Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2015).

7 Hunt, C.P., Moskowitz, B.M., & Banerjee, S.K. Magnetic Properties of Rocks and Minerals. In: Ahrens, T.J. (Ed.), Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants. AGU Reference Shelf (American Geophysical Union, 1995), vol. 3, pp. 189–204

8 Bekkarnayev, K.S., & Balakov, M.F. Structural-Geological and Alteration Model of the Bozshakol Deposit. Internal Technical Report (2023).

9 Professional Geo Solutions LLC. Report on R&D Activities at the Bozshakol Deposit, Kazakhstan. Internal Technical Report (2024).

^{1*}Тулепбаев Қ.,

магистр, 0009-0006-4384-4483,

*e-mail: k_tulepbayev@kbtu.kz

¹Тулемисова Ж.,

PhD, ORCID: 0000-0003-1803-4535,

e-mail: z.tulemissova@kbtu.kz

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

БОЗШАКӨЛ МЫС-ПОРФИРЛІ КЕН ОРНЫНДАҒЫ ГИДРОТЕРМИЯЛЫҚ ӨЗГЕРІС ЖӘНЕ МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ АУДАНДАСТЫРУ: СПЕКТРЛІК, МАГНИТТІК ЖӘНЕ 3D МОДЕЛЬДЕУ ДЕРЕКТЕРІН БІРІКТІРУ

Аңдатпа

Бұл зерттеу Қазақстандағы Орталық Азия орогендік белдеуіндегі (ЦАОБ) Бозшакөл порфирлі мыс кен орнындағы гидротермиялық өзгерістердің минералогиялық және кеңістіктік сипаттамаларын қарастырады. 2018 жылдан 2024 жылға дейін жүргізілген геологиялық және геофизикалық барлау жұмыстары шамамен 24 000 метр бұрғылау деректерінен тұратын, екі метрлік аралықпен алынған сынамалар негізінде ауқымды деректер жиынтығын ұсынды. Аналитикалық әдістерге қысқа толқынды инфрақызыл (SWIR) спектроскопиясы қолданылды, атап айтқанда Arcspectro FT-NIR Rocket (900–2600 нм) және TerraSpec4 спектрометрі (350–2500 нм). Бұл әдістер КТ-10 капаметрі арқылы алынған магниттік сезімталдық өлшемдерімен толықтырылды. Спектрлік деректерді интерпретациялау үшін минералдарды автоматтандырылған сәйкестендіру (TSA алгоритмі) және қолмен тексеру (Aux Match) әдістері біріктірілген Spectral Geologist (TSG) бағдарламалық құралы қолданылды. Интеграцияланған тәсіл гидротермиялық өзгеру аймақтарын нақты картаға түсіруге мүмкіндік беріп, калий, филлдік және пропилиттік фацияларды анықтады. Бұл фациялар әрқайсысы ерекше минералдық жинақтармен және магниттік сипаттамалармен ерекшеленеді. Орталық бөлікте орналасқан калийлі альтерация екіншілік биотит пен калийлі дала шпаттарының болуымен сипатталады. Бұл аймақ кең таралған серициттену мен магнетит құрамының төмендеуімен сипатталатын филлдік ореолға ауысады. Шеткі пропилиттік аймақта хлорит, эпидот және карбонат минералдары мол, және магнетиттің сақталуына байланысты жоғары магниттік сезімталдық байқалады. Зерттеудің негізгі нәтижесі – хлорит пен эпидотқа бай аймақтарды анықтау болды. Бұл аймақтар флотация процесіндегі қалпына келу көрсеткіштерін төмендетіп, кенді өңдеу тиімділігіне теріс әсер етеді. Leapfrog Geo бағдарламалық жасақтамасы 3D модельдеуді жеңілдетіп, өзгеру домендерінің құрылымдық интерпретациясы мен визуализациясын жетілдірді. Бұл кешенді сипаттама геологиялық түсінікті едәуір арттырып, порфирлі мыс кен орындарын барлау мен игеруде заманауи спектроскопиялық және геофизикалық әдістерді қолданудың озық тәжірибесін көрсетеді. Сонымен қатар, барлау және өңдеу стратегияларын оңтайландыруға септігін тигізеді.

Тірек сөздер: Бозшакөл кен орны, мыс порфирді жүйелері, гидротермиялық альтерация, минералды аудандастыру, калийлік альтерация, филлиттік альтерация, пропилиттік альтерация, инфрақызыл спектроскопия.

^{1*}Тулепбаев К.,
магистр, ORCID: 0009-0006-4384-4483,
*e-mail: k_tulepbayev@kbtu.kz
¹Тулемисова Ж.,
PhD, ORCID: 0000-0003-1803-4535,
e-mail: z.tulemissova@kbtu.kz

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ НА БОЗШАКОЛЬСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ РУД: ИНТЕГРАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ, МАГНИТНЫХ ДАННЫХ И ДАННЫХ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация

В этом исследовании изучаются минералогические и пространственные характеристики гидротермальных изменений на месторождении медно-порфировых руд Бозшаколь в Центрально-Азиатском орогенном поясе (ЦАОП) в Казахстане. Геологическая и геофизическая разведка, проведенная с 2018 по 2024 гг., предоставила обширный набор данных, включающий около 24 000 м образцов кернов, собранных с интервалом в два метра. Аналитические методы включали коротковолновую инфракрасную (SWIR) спектроскопию с использованием Arcspectro FT-NIR Rocket (900–2600 нм) и спектрометра TerraSpec4 (350–2500 нм), дополненную измерениями магнитной восприимчивости с использованием каппаметра КТ-10. Для интерпретации спектральных данных использовалось программное обеспечение The Spectral Geologist (TSG), объединяющее автоматизированную идентификацию минералов (алгоритм TSA) и ручную проверку (Aux Match). Этот комплексный подход точно картировал зоны гидротермальных изменений, очерчивая калиевые, филлитовые и пропилитовые фации, каждая из которых определяется отдельными минеральными ассоциациями и магнитными сигнатурами. Калиевые изменения, расположенные в центре, характеризуются вторичным биотитом и калиевым полевым шпатом. Они переходят наружу в филлитовый ореол, характеризующийся всепроникающей серицитизацией и пониженным содержанием магнетита. Периферийная пропилитовая зона демонстрирует обильные хлоритовые, эпидотовые, карбонатные минералы и повышенную магнитную восприимчивость из-за сохранности магнетита. Ключевым результатом стало выявление зон, богатых хлоритом и эпидотом, которые, как известно, отрицательно влияют на показатели извлечения флотации, тем самым влияя на эффективность переработки руды. Программное обеспечение Leapfrog Geo облегчило 3D-моделирование, улучшив визуализацию и структурную интерпретацию доменов изменений. Эта комплексная характеристика значительно улучшает геологическое понимание и поддерживает оптимизированные стратегии разведки и переработки, демонстрируя передовой опыт применения современных спектроскопических и геофизических методов к порфировым медным месторождениям.

Ключевые слова: месторождение Бозшаколь, медно-порфировые системы, гидротермальные изменения, минеральная зональность, калиевые изменения, филлитовые изменения, пропилитовые изменения, инфракрасная спектроскопия.

Article submission date: 20.05.2025

УДК 622.24
МРНТИ 39.59.15

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-370-380>

^{1*}**Ерболат Н.К.,**

магистр, ORCID ID: 0009 0001 1235 3888,

*e-mail: n_yerbolat@kbtu.kz

¹**Тулемисова Ж.С.,**

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0003-1803-4535,

e-mail: z.tulemisova@kbtu.kz

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛЛЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аннотация

В статье приведены результаты комплексного анализа геолого-геофизических данных месторождения, расположенного в южной части Прикаспийского осадочного бассейна, характеризующегося сложным разломно-блоковым строением, активными процессами галогенеза и высокой литолого-стратиграфической изменчивостью. В исследовании использованы материалы бурения, включая данные кернового анализа, спектрального гамма-каротажа, нейтронно-акустических исследований, результаты петрофизической интерпретации, а также уточненная переинтерпретация 3D-сейсмических данных. Интеграция разнородной информации обеспечила построение детализированной трехмерной геологической модели продуктивных горизонтов (нижнеальбский, аптский и неокомские пласты), включающей структурное, литологическое и петрофизическое моделирование. В рамках работы выделено пять структурных сегментов, уточнена система тектонических нарушений, определено пространственное распределение фаций и зон коллекторов с промышленным потенциалом. Фильтрационно-емкостные характеристики пластов варьируют: эффективная пористость – 13–19%, водонасыщенность – 24–36%. Применение индикаторного моделирования и гауссовой симуляции позволило повысить точность воспроизведения геологической концепции и согласованность модели с фактическими данными. Полученные результаты обеспечивают более точную оценку конфигурации залежей, распределения запасов углеводородов и параметров коллекторов, что позволяет снизить геологические риски и неопределенности. Разработанная модель является основой для проведения гидродинамического моделирования, проектирования эффективной системы разработки и оптимизации эксплуатации месторождения.

Ключевые слова: геолого-геофизические данные, геологическая модель, продуктивные пласты, фильтрационно-емкостные свойства, тектонические нарушения, структурное моделирование, литологическое моделирование.

Введение

Современная нефтегазовая отрасль сталкивается с необходимостью эффективного освоения, особенно в условиях геологического строения и высокой степени неопределенности при оценке коллекторов. В этих условиях возрастает роль комплексных методов анализа геолого-геофизических данных, направленных на формирование достоверных геологических моделей продуктивных пластов.

Наиболее полное и обоснованное представление о структуре, распространении и свойствах коллекторов возможно при интеграции данных различных дисциплин: сейсморазведки, геофизических исследований скважин, керна, результатов бурения и лабораторных петрофизических анализов. Такой подход позволяет не только уточнить геологическое строение месторождения, но и существенно повысить точность прогноза фильтрационно-емкостных

свойств пластов, что критически важно для выбора технологии разработки и обоснования эксплуатационных параметров.

Целью настоящего исследования является построение геологической модели коллекторов на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных с последующей оценкой фильтрационно-емкостных свойств продуктивных пластов на примере месторождения X.

Автор подчеркивает, что недостаточная изученность геолого-геофизических данных на раннем этапе открытия месторождения значительно влияет на успешность его разработки. Например, некачественная интерпретация сейсмических данных или их отсутствие затрудняют изучение структуры месторождения, а ошибки в интерпретации увеличивают геологические риски при разработке южной части Прикаспийского осадочного бассейна, одного из наиболее крупных и в то же время сложных в структурном отношении регионов. Месторождения этого района характеризуются высокой степенью галогенеза, наличием тектонически изолированных блоков, а также сочетанием нефтяных и газоконденсатных залежей, что требует использования современных методов. Принятый в работе подход основывается на интеграции данных сейсморазведки, ГИС, результатов бурения и петрофизической интерпретации, что обеспечивает более точное построение структурных и литолого-фациальных моделей, выделение коллекторов и оценку их характеристик. Такой подход способствует снижению неопределенности при геологическом моделировании и является основой для принятия обоснованных проектных решений на этапах доразведки и разработки месторождения.

Материалы и методы

Объектом исследования является месторождение X, расположенное в южной части Прикаспийского осадочного бассейна. Геологическое строение участка отличается высокой тектонической сложностью, выраженной в наличии разновозрастных дислокаций, глубинных разломов и блоковой структуры. Дополнительными факторами, усложняющими геологическую интерпретацию, являются значительная мощность соленосной толщи, активные процессы галогенеза и высокая изменчивость литолого-стратиграфических комплексов. На площади месторождения выявлены как нефтяные, так и газоконденсатные залежи, локализованные преимущественно в меловых и пермотриасовых отложениях.

Для анализа геологического строения и построения модели коллекторов применялся комплексный подход. В работе использованы данные бурения, геофизических исследований и каротажа, полученные на месторождении X.

Основу исследования составили данные спектрального гамма-каротажа (СГК), нейтронно-акустических методов и количественной петрофизической интерпретации, что позволило уточнить границы продуктивных пластов и оценить фильтрационно-емкостные характеристики коллекторов. Анализ структурного строения разреза проводился с учетом литолого-стратиграфических особенностей, включая вариабельность тектонических блоков и влияние галогенеза. Комплексный анализ данных позволил выявить особенности распределения коллекторских интервалов в меловых и пермотриасовых отложениях, где интерпретация осложнена наложением аномалий, вызванных глинистостью и естественной радиоактивностью пород [1].

Для построения геологической модели использовались специализированные программные комплексы, обеспечивающие интеграцию разнотипных данных и визуализацию пространственного распределения коллекторов с учетом выявленных параметров. Полученные результаты заложены в основу дальнейшего моделирования разработки месторождения и оптимизации технологии добычи углеводородов.

При изучении геолого-геофизических данных месторождения X ключевым моментом является комплексный подход, позволяющий максимально полно и точно определить фильтрационно-емкостные свойства коллекторов. Особое внимание уделялось качеству и полноте геофизических данных, а также корректной интерпретации результатов с учетом технологических особенностей добычи и бурения.

Особое внимание следует уделить буровым растворам. Для бурения скважин на месторождении использовались полимерные растворы, что обеспечивает высокую стабильность ствола скважины и снижает риск размыва пород.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) промысловых жидкостей при пластовой температуре варьировалось от 0,6 до 3 Ом·м. В новых скважинах применялся более современный полимерный буровой раствор с удельным весом 1,22–1,24 г/см³, сниженным удельным электрическим сопротивлением (0,37–0,57 Ом·м при 20 °С) и вязкостью 42–55 с. Долота для бурения в новых скважинах имели диаметры до 311 мм, что способствовало увеличению проходки и улучшению качества ствола. Эти данные имеют большое значение для оценки электрофизических свойств коллекторов и правильной калибровки каротажных кривых.

Для исследования геологических разрезов использовался стандартный комплекс промыслово-геофизических исследований (ГИС), включающий аналоговые методы: стандартный каротаж, боковой каротаж, кавернометрию, радиоактивный каротаж, инклинометрию, замер температуры, акустическую цементометрию и термометрию.

Построение точной геостатистической модели невозможно без качественных данных промыслово-геофизических исследований, которые играют ключевую роль уже на этапе их получения. Начиная с записи кривых и заканчивая интерпретацией, необходимо тщательно проверять качество выполненных работ, чтобы в дальнейшем избежать ошибок в построении модели [2].

Качество материалов гамма-каротажа обычно высокое, с четко выраженной дифференциацией по литологии. Максимальные значения естественной радиоактивности (ГК) соответствуют глинистым пластам, а минимальные – плотным породам. Однако в некоторых скважинах (например, X-20 и X-30) отмечались аномалии и отсутствие дифференциации, что требует дополнительного внимания при интерпретации.

Нейтронный каротаж хорошо отражает литологическую характеристику разреза, выявляя зоны с повышенной плотностью и газонасыщением, как это наблюдалось в скважине X-30. Влияние газового фактора проявляется в виде повышенных показаний на плотных пластах, что необходимо учитывать при оценке пористости и насыщенности.

Гамма-гамма-каротаж показал удовлетворительное качество в большинстве скважин, отражая изменение плотности пород. Значения плотности для коллекторов варьируются от 2,1 до 2,4 г/см³, что существенно ниже показателей плотных пород (от 2,7 г/см³ и выше).

Акустический каротаж применялся для определения коэффициента пористости и выделения плотных пропластков. Из-за рыхлости пород и особенностей бурения в некоторых случаях отмечались срывы на диаграммах, что учитывалось при интерпретации.

Потенциалы собственной поляризации (ПС) зарегистрированы слабо дифференцированными кривыми, что связано с близостью минерализации промысловой жидкости и пластовой воды. Поэтому этот метод использовался на качественном уровне для общей характеристики разреза, но не применялся для количественной оценки глинистости.

Электрокаротажные методы (МКЗ, ИК, БК) в целом дали хорошие материалы, хотя в отдельных скважинах (например, X-1 и X-30) кривые были слабо информативны. Нормализация кривых по опорным горизонтам обеспечивала корректность интерпретации и позволяла надежно выделять продуктивные пласты.

Песчаники, выявленные в продуктивных горизонтах K1a1 и K1a, представлены коричневыми полимиктовыми песчаниками с выраженной слоистостью и различной степенью сцементированности. Текстуры пород, включая биотурбацию и взламывание осадка, отражают сложные палеоэкологические условия образования коллектора. Минералогический состав и плотность зерен варьируются в зависимости от содержания карбонатных и пиритовых включений. Отложения неокотских горизонтов представлены конгломератами и мелкозернистыми песчаниками с выраженной слоистостью, обогащенным глинистым материалом. Литологические особенности и вариации плотности зерен подтверждаются каротажными данными.

Выделение коллекторов проводилось на основе качественных признаков, таких как снижение гамма-активности, увеличение интервального времени, наличие глинистой корки и электрических аномалий. Количественная оценка коэффициента глинистости и эффективных толщин была выполнена с использованием спектрального гамма-каротажа, что позволило исключить влияние радиоактивных элементов и более точно идентифицировать продуктивные пласты [3–4].

Особенно важным был метод спектрального гамма-каротажа, позволяющий корректно выделять коллекторы в условиях аномальных показаний стандартного гамма-каротажа. Это было критично для продуктивных меловых горизонтов, где присутствие радиоактивных элементов могло исказить оценку глинистости и пористости (рисунок 1).

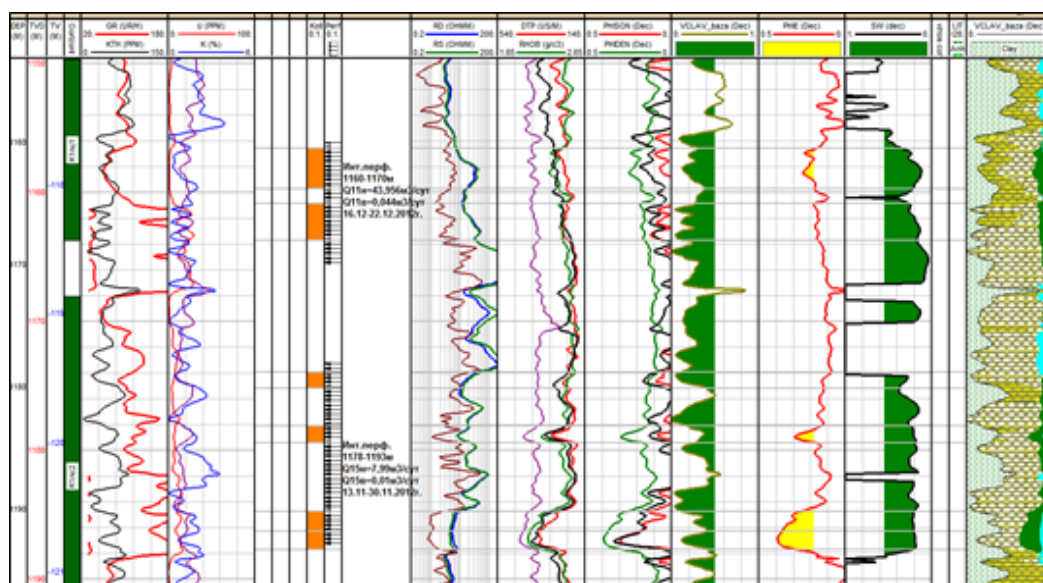


Рисунок 1 – Пример выделения высокоактивных участков скв. X-20 (области, оконтуренные черным овалом), не связанных с глинистостью

В рамках проведенного исследования была разработана трехмерная цифровая геологическая модель продуктивных горизонтов месторождения X, охватывающая нижнеальбский, аптский и два неомских пласта, представляющих промышленный интерес с точки зрения нефтегазоносности. Особенностью геологического строения изучаемого участка является локализация залежей в зоне тектонической активизации между двумя предполагаемыми разломами, в области развитого сброса F. На всех структурных построениях сброс прослеживается как единое нарушение, оказывающее значительное влияние на формирование ловушек.

Основными целями моделирования являлись получение геологически обоснованного распределения пород и коллекторских свойств в пространстве, а также выполнение подсчета геологических запасов углеводородов. Построение модели включало два ключевых этапа: формирование структурного каркаса залежей и пространственное моделирование литологических и петрофизических параметров.

Для построения модели использовался комплекс разнородной геолого-геофизической информации, включая:

- ♦ скважинные данные – координаты устьев, глубины забоев, инклинометрические данные (MD, Inclination, Deviation), геологические отбивки, положения флюидальных контактов;
- ♦ результаты ГИС – импортированы промыслово-геофизические кривые РНПЕ (эффективная пористость), SW (водонасыщенность), VCLAV (глинистость);
- ♦ сейсмическая интерпретация – переинтерпретированные данные 3D-сейсморазведки в виде стиков и полигонов разломов, а также структурные карты по кровле нижнеальбского, аптского и неомского горизонтов.

Эти данные позволили провести высокдетализированную интерпретацию разломно-блокового строения, уточнить геологические границы пластов и сформировать базу для создания надежной геостатистической модели.

Моделирование системы тектонических нарушений. Создание модели разломов проводилось с использованием полигональных представлений разломов, полученных в результате переинтерпретации сеймики. Информация дополнялась данными бурения и интерпретацией ГИС. В процессе объединения и корректировки разломов была сформирована модель, сегментирующая продуктивную зону на пять блоков. По данной сетке был сформирован структурный каркас с размером ячеек 25×25 м, охватывающий горизонты K1al-2, K1a, K1nc1 и K1nc2 (рисунки 2, 3).

На основе утвержденной стратиграфической корреляции и сейсмических трендов были построены структурные поверхности по кровле пластов. Для построения карт использовался алгоритм конвергентной интерполяции с размером сетки 50×50 м, при этом учитывались геологические отбивки, данные корреляции, модель разломов и карты общих толщин межпластовых интервалов 9 (рисунки 4–5).

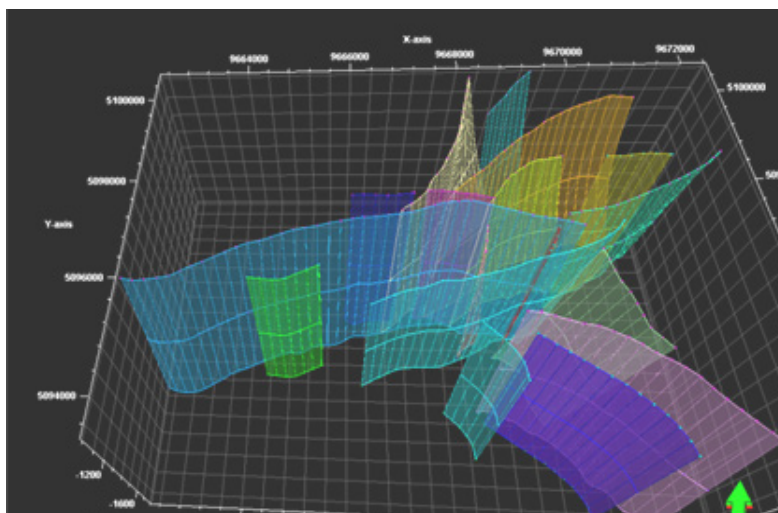


Рисунок 2 – Смоделированная система нарушений

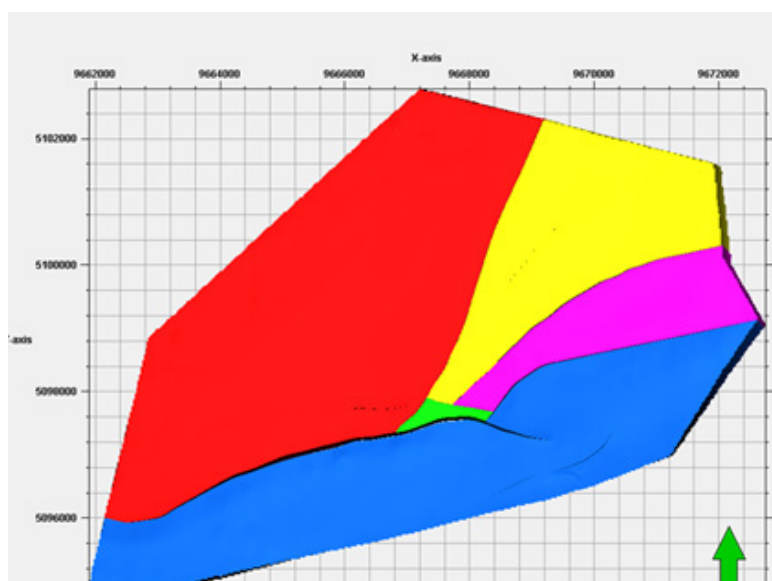


Рисунок 3 – Блочность модели

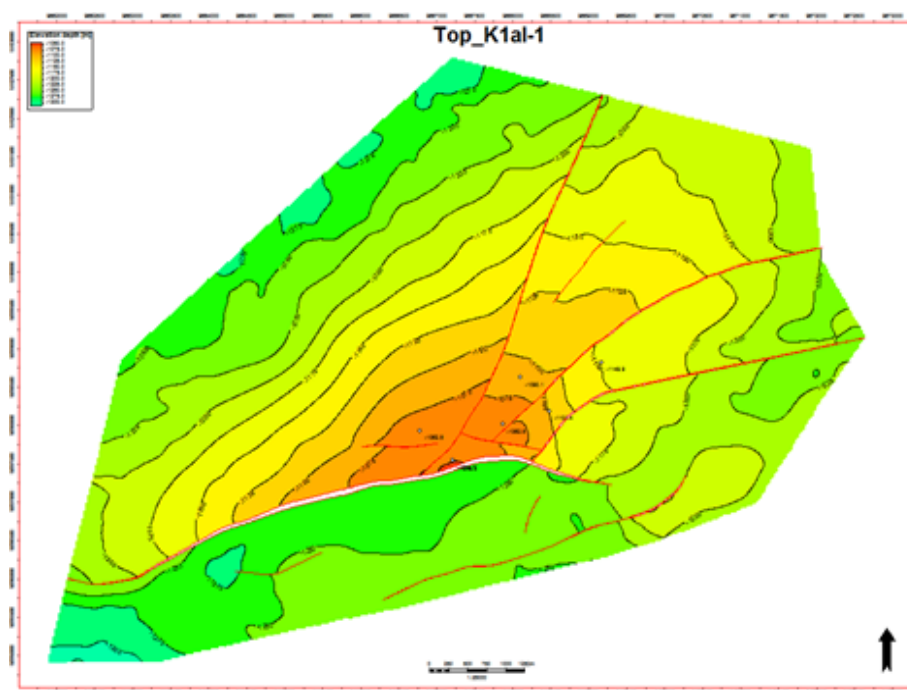


Рисунок 4 – Структурная карта по кровле пласта K1al-1

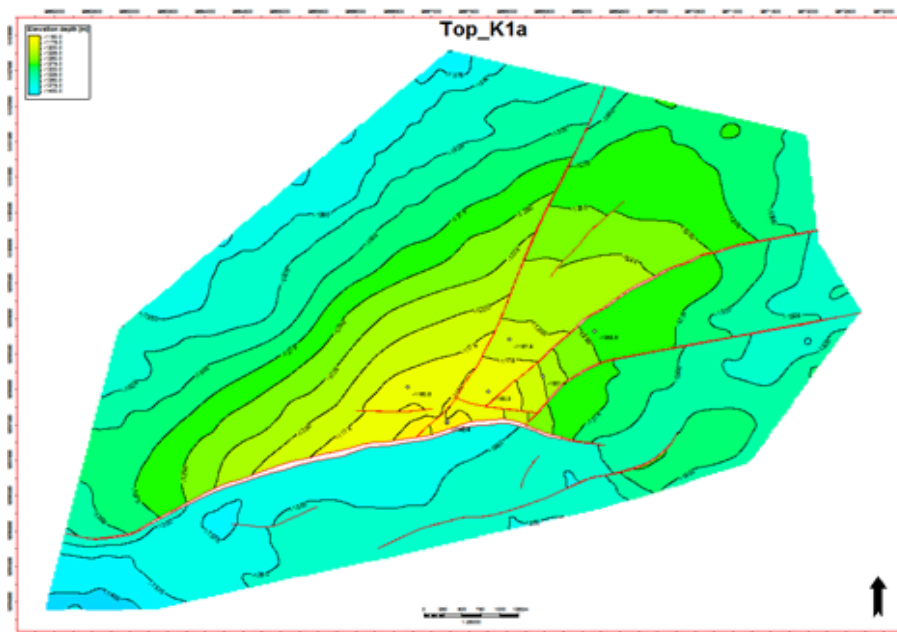


Рисунок 5 – Структурная карта по кровле пласта K1a

Методика и результаты детальной корреляции продуктивных пластов. Осадочный комплекс исследуемой территории подразделяется на надсолевую и подсолевую части, границей между которыми служат мощные соленосные отложения кунгурского яруса нижнепермского возраста. В подсолевом комплексе развиты толщи карбонатных пород девонской и каменноугольной систем, а также терригенные отложения нижней перми. Надсолевый комплекс представлен чередующимися отложениями обломочного состава, охватывающими временной диапазон от верхней перми до неогена включительно.

Меловая система в разрезе делится на два структурных подразделения. Нижний отдел сложен преимущественно аргиллитами с включениями песчаников, отложившихся в условиях прибрежно-дельтовой среды. Верхняя часть характеризуется преобладанием известняков, сформированных в условиях мелководного эпиконтинентального моря. Выше залегающие палеогеновые и четвертичные отложения представлены песчано-алевритистыми комплексами, генетически связанными с речными и дельтовыми фациями (рисунок 6).

Проведенный анализ фациальной изменчивости, стратиграфических границ и литологического состава позволил детально скоррелировать продуктивные пласты между скважинами, что послужило основой для построения геологически достоверной трехмерной модели залежи.

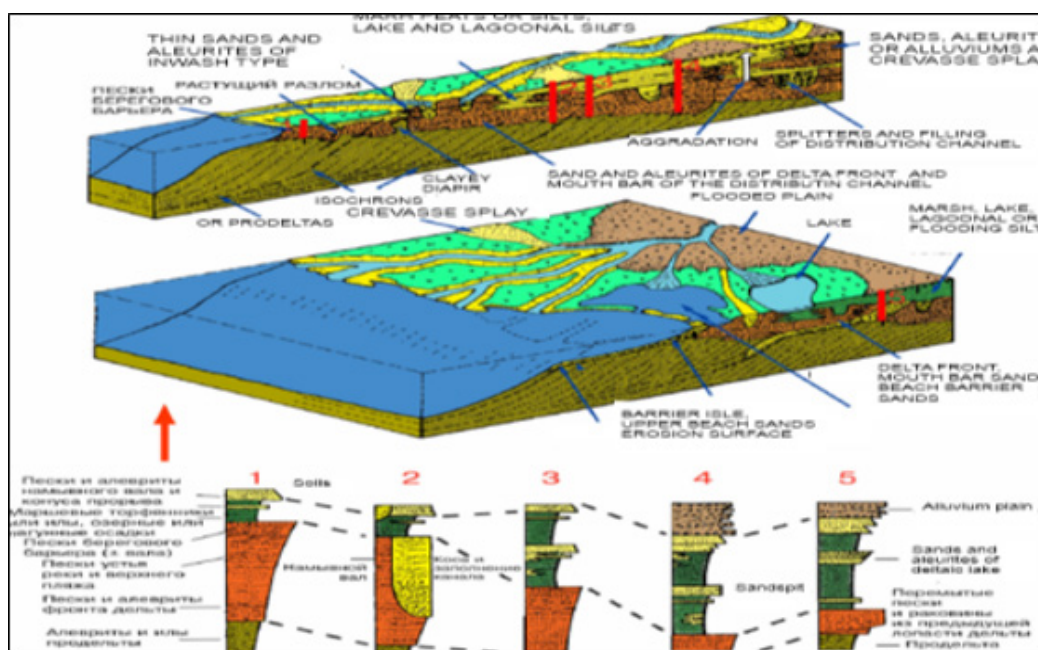


Рисунок 6 – Остановка осадконакопления

Перенос скважинных данных в геологическую сетку. Для моделирования свойств пород использовались кривые Ntg (доля коллектора), PHIE (эффективная пористость), SW (водонасыщенность). Осреднение непрерывных кривых проводилось методом арифметического среднего по заданным интервалам, обеспечивая сглаженное представление параметров в модели [5].

Литологическое и петрофизическое моделирование

Распространение фаций выполнялось методом последовательного индикаторного моделирования (SIS). Предварительно данные были нормализованы, устранены тренды по глубине, построены экспериментальные вариограммы. Для каждой зоны использовалась изотропная вариограмма с параметрами 750×500 м и азимутом 12° , соответствующим преобладающему направлению осадконакопления. На базе полученного распределения фаций моделировались пористость, проницаемость и нефтенасыщенность. Расчеты производились только для коллектора, код которого равен 1 (рисунки 7–8) [6–7].

Моделирование пористости проходило с использованием метода гауссовой симуляции GRFS (Gaussian Random Function Simulation). Распространение свойств пористости по коду коллектора 0 устанавливалось равным 0 (рисунок 9) [8].

В результате построения модели удалось добиться высокой степени согласованности с геологической концепцией строения месторождения. Полученная модель легла в основу оценки

запасов, проектирования разработки и проведения сценарного анализа. Модель также представляет собой надежную платформу для последующей гидродинамической симуляции и оптимизации разработки.

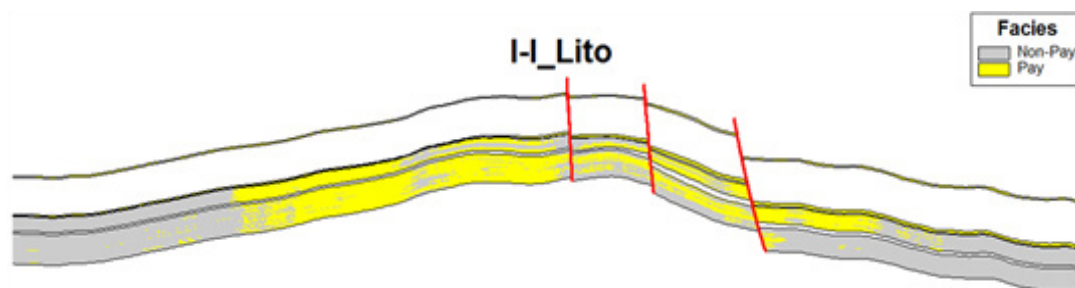


Рисунок 7 – Куб литологии, профиль по линии I-I'

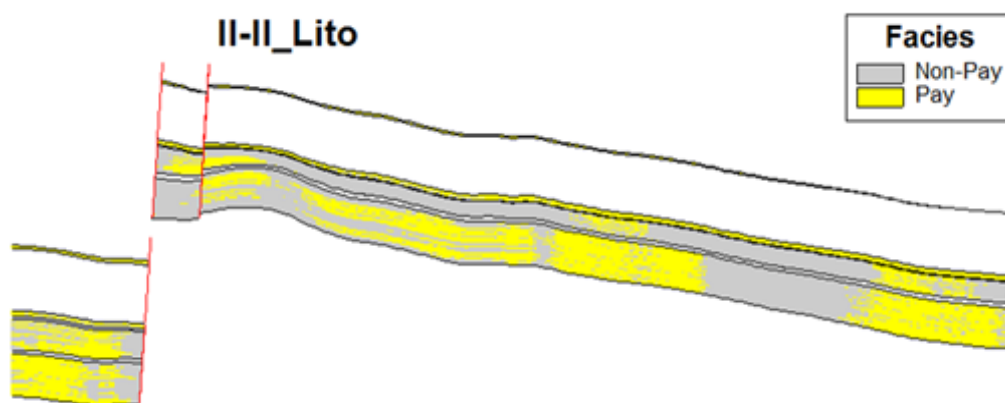


Рисунок 8 – Куб литологии, профиль по линии II-II'

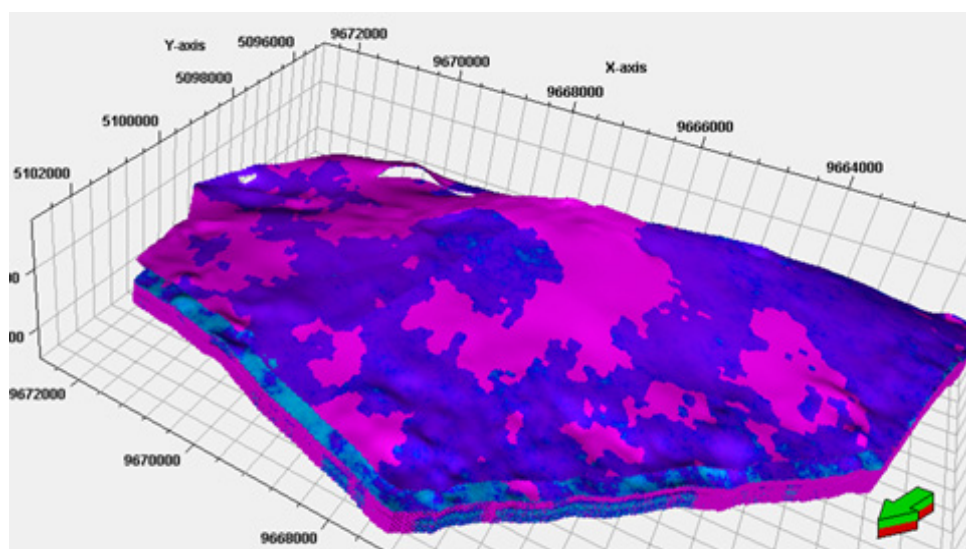


Рисунок 9 – Куб пористости

Результаты и обсуждение

Построение трехмерной геологической модели обеспечило комплексное представление о внутреннем строении продуктивных горизонтов, стратиграфически соответствующих нижнеальбскому, аптскому и двум неокомским интервалам. Конфигурация структурных поверхностей, сформированная на основе актуализированной 3D-сеймики и подтвержденная скважинной корреляцией, позволила достоверно воспроизвести пространственное распределение коллекторских свойств и выделить зоны тектонической дислокации, определяющие блоковое строение залежи.

Моделирование разломов выявило наличие пяти крупных сегментов, разделяющих залежь, что требует учета при подсчете запасов и проектировании системы разработки. Пространственное положение нарушений согласовано с геофизическими признаками и результатами бурения, включая смещения кровель, аномалии в интерпретации ГИС и данные опробования. Это подтвердило реалистичность структурной схемы модели.

Литологическая характеристика пластов продемонстрировала преобладание терригенных пород с варьирующейся степенью песчанистости, соответствующей разным фазам осадконакопления в меловой системе. Песчаные фации аптского и неокомских горизонтов локализуются преимущественно в центральной и восточной частях модели, где они характеризуются наиболее благоприятными фильтрационно-емкостными свойствами.

Петрофизическое моделирование на базе нормализованных кривых каротажа (PHIE, SW, Ntg) и статистической обработки дало возможность получить осмысленные распределения пористости и насыщенности. Значения эффективной пористости в пределах коллекторов колеблются от 13 до 19%, при этом водонасыщенность варьирует от 24 до 36%, что свидетельствует о наличии зон с потенциалом промышленного извлечения углеводородов. Отчетливо прослеживаются участки, где наблюдаются наиболее благоприятные комбинации фильтрационных свойств и структурной ловушки преимущественно в пределах аптского пласта.

Сравнение полученной геологической модели с данными исторической разработки позволило подтвердить обоснованность пространственного распределения свойств, а также уточнить параметры продуктивных интервалов, ранее идентифицированных по данным ГИС. Полученные результаты могут служить надежной основой для построения гидродинамической модели и разработки оптимальной стратегии эксплуатации месторождения.

Таким образом, построенная модель представляет собой надежный инструмент для последующего гидродинамического моделирования, оценки рисков при бурении и оптимизации системы разработки месторождения.

Заключение

В результате выполненного комплекса работ осуществлено построение трехмерной геологической модели продуктивных горизонтов месторождения X, основанной на анализе геолого-геофизических данных. На основании интеграции данных бурения, промыслово-геофизических исследований и 3D-сейсмической переинтерпретации были получены следующие ключевые результаты:

- ♦ выявлены и детализированы тектонические разломы, разделяющие продуктивную зону на пять структурных блоков, что критически важно при планировании разработки;
- ♦ установлены особенности литологического строения и фациального замещения пород, повлиявшие на фильтрационно-емкостные характеристики;
- ♦ получены пространственные распределения ключевых петрофизических параметров: пористости, водонасыщенности и песчанистости;
- ♦ проведена высокоточная корреляция пластов, уточнены положения флюидальных контактов, обеспечившая достоверность геологической модели.

Таким образом, проведенный комплексный анализ геолого-геофизических данных, включающий интерпретацию данных бурения, ГИС и 3D-сеймики, позволил сформировать обо-

снованное представление о строении продуктивных горизонтов месторождения. На основании полученных результатов была построена трехмерная цифровая геологическая модель, которая обеспечила высокую степень детализации распределения литологических и петрофизических свойств. Модель послужила важным инструментом для количественной оценки запасов углеводородов и может быть использована как основа для последующего гидродинамического моделирования и проектирования системы разработки.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Zhumabekov, A.K., Portnov, V.S., and Zhen, L. Integrated Reservoir Characterization Based on a Comprehensive Study of the Geological Structure Using 3D Seismic Survey, E3S Web of Conferences, 264, 07009 (2021). https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/42/e3sconf_ti2021_07009.pdf.
- 2 Bello, A.D. Bida and M. Habib, A Review of Integrated Description and Evaluation of Reservoirs Based on Seismic, Core and Well Log Data: Case Study of Bornu Basin, Int. Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) 8 (5), 345–352 (2019). <https://www.ijert.org/a-review-of-integrated-description-and-evaluation-of-reservoirs-based-on-seismic-core-and-well-log-data-case-study-of-bornu-basin>.
- 3 Salah, A.F., and Abdullah, N.H. 3D Static Reservoir Modeling by Geostatistical Techniques Used for Reservoir Characterization and Data Integration, International Journal of Engineering Research and Applications, 12 (3), 50–59 (2022). <https://www.academia.edu/79442973>.
- 4 El Gendy, M. Application of 3D Static Modeling and Reservoir Characterization for Optimal Field Development: A Case Study from the Kharita Formation, Egypt, International Journal of Advanced Research in Physical Science, 9 (5), 1–12 (2022). <https://www.longdom.org/open-access/application-of-3d-static-modeling-and-reservoir-characterization-for-optimal-field-development-a-case-study-from-the-kharita-forma-102680.html>.
- 5 Mahmood, H.H., and O. Al-Fatlawi, Construction of Comprehensive Geological Model for an Iraqi Oil Reservoir, Iraqi Geological Journal 54 (2F), 22–35 (2021). <https://doi.org/10.46717/igj.54.2F.3ms-2021-12-20>.
- 6 Samadi, M. Soleimani Monfared and M. Kordi, Geological Modelling of Petroleum Reservoir Through Multi-Scale Analysis of Faults in Complex Media, Journal of Asian Earth Sciences, 271, 106238 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2024.106238>.
- 7 Delev, A.N., Nurgaliev, D.K., Sidorov, S.V., and Akhmadullin, R.R. Construction of Geological Model of a Shallow Super-Viscous Oil Deposit Based on Core Analyses and Geophysical Monitoring Data, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 282 (1), 012022 (2019). <https://www.researchgate.net/publication/334523327>.
- 8 Wang, J., Liu, Y., Han, C., Zhang, Y., Li, X., and Gao, X. Integrated Geological Modeling for Complex Hydrocarbon Reservoirs Based on Multi-Scale Seismic and Geological Data, Journal of Asian Earth Sciences, 248, 106238 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2024.106238>.

^{1*}Ерболат Н.К.,

магистр, ORCID ID: 0009 0001 1235 3888,

*e-mail: n_yerbolat@kbtu.kz

¹Түлемисова Ж.С.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0003-1803-4535,

e-mail: z.tulemissova@kbtu.kz

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ГЕОЛОГИЯЛЫҚ-ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕРДІ КЕШЕНДІ ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ КОЛЛЕКТОРЛАРДЫҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ МОДЕЛІН ҚҰРУ

Аңдатпа

Мақалада Каспий маңы ойпатының оңтүстік бөлігінде орналасқан, күрделі жарылым-блоқты құрылымымен, галогенездің белсенді үдерістерімен және жоғары литологиялық-стратиграфиялық әртүрлілігімен сипатталатын кен орнының геологиялық-геофизикалық деректерін кешенді талдау нәтижелері ұсынылған.

Зерттеуде бұрғылау материалдары, соның ішінде керндік талдау деректері, спектралды гамма-каротаж, нейтронды-акустикалық зерттеулер, петрофизикалық интерпретация нәтижелері және 3D сейсмикалық деректердің нақтыланған қайта интерпретациясы пайдаланылды. Өртүрлі деректерді интеграциялау арқылы өнімді горизонттардың (төменгі альб, апт және неоком қабаттары) құрылымдық, литологиялық және петрофизикалық модельдеуді қамтитын егжей-тегжейлі үш өлшемді геологиялық модель құрылды. Жұмыс барысында бес құрылымдық сегмент бөлініп, тектоникалық бұзылыстар жүйесі нақтыланды, фациялар мен өнеркәсіптік әлеуеті бар коллектор аймақтарының кеңістіктік таралуы анықталды. Коллекторлардың фильтрациялық-сыйымдылық қасиеттері: тиімді кеуектілік – 13–19%, су қанығуы – 24–36%. Индикаторлық модельдеу және Гаусстық симуляция әдістерін қолдану геологиялық концепцияны дәл бейнелеуге және модельдің нақты деректермен сәйкестігін арттыруға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер кеніштердің конфигурациясын, көмірсутек қорының таралуын және коллектор параметрлерін дәлірек бағалауға жағдай жасайды, бұл геологиялық тәуекелдер мен белгісіздіктерді азайтады. Дайындалған модель гидродинамикалық модельдеу, тиімді игеру жүйесін жобалау және кен орнын пайдалануды оңтайландыру үшін негіз болып табылады.

Тірек сөздер: геологиялық-геофизикалық деректер, геологиялық модель, өнімді қабаттар, сұзу-сыйымдылық қасиеттері, тектоникалық бұзылулар, құрылымдық модельдеу, литологиялық модельдеу.

¹*Yerbolat N.K.,

Master, ORCID ID: 0009 0001 1235 3888,

*e-mail: n_yerbolat@kbtu.kz

¹Tulemisova Zh.S.,

PhD, Associate Professor,

e-mail: z.tulemissova@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

CONSTRUCTION OF A GEOLOGICAL RESERVOIR MODEL BASED ON A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL DATA

Abstract

The article presents the results of a comprehensive analysis of geological and geophysical data from a field located in the southern part of the Pre-Caspian sedimentary basin, characterized by complex fault-block structures, active halogenesis processes, and high lithological–stratigraphic variability. The study utilized drilling data, including core analysis, spectral gamma-ray logging, neutron–acoustic surveys, results of petrophysical interpretation, as well as refined re-interpretation of 3D seismic data. Integration of diverse information enabled the construction of a detailed three-dimensional geological model of productive horizons (Lower Albian, Aptian, and Neocomian formations), incorporating structural, lithological, and petrophysical modeling. Five structural segments were identified, the fault system was refined, and the spatial distribution of facies and reservoir zones with commercial potential was determined. Reservoir properties vary: effective porosity ranges from 13–19%, water saturation from 24–36%. The use of indicator modeling and Gaussian simulation improved the accuracy of the geological concept reproduction and the model's consistency with actual data. The results provide a more precise assessment of hydrocarbon accumulation geometry, reserves distribution, and reservoir parameters, thus reducing geological risks and uncertainties. The developed model serves as the basis for hydrodynamic modeling, designing efficient development systems, and optimizing field operations.

Keywords: geological and geophysical data, geological model, productive formations, filtration and capacitance properties, tectonic disturbances, structural modeling, lithological modeling.

Дата поступления статьи в редакцию: 26.05.2025

ЭКОНОМИКА ЖӘНЕ БИЗНЕС
ECONOMY AND BUSINESS
ЭКОНОМИКА И БИЗНЕС

UDC 65.011
IRSTI 06.81.12, 06.81.23

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-381-389>

***¹Zhumatayeva A.,**

Master's degree, junior researcher, ORCID ID: 0009-0007-9753-3071,
e-mail: asyl.zhumatayeva@bk.ru

¹Mukashev Y.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0003-1003-176X,
e-mail: e.mukashev@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PROJECT MANAGEMENT:
REVIEW AND ASSESSMENT OF CRITICAL SUCCESS FACTORS**

Abstract

Artificial intelligence (AI) technologies such as machine learning, predictive analytics, and natural language processing are increasingly being integrated into project workflows in organizations. However, while AI improves efficiency, automation, and decision making, many organizations struggle with technology infrastructure, workforce readiness, and regulatory compliance. The purpose of this study is to review and assess the critical success factors (CSFs) that influence the implementation of AI technology in project management. Based on the methodology of bibliometric analysis and expert assessment, advanced research on the topic, key development areas in the field were examined, and CSFs that contribute to the effective implementation of AI technology were identified. The findings indicate that successful integration of AI requires senior management support, strong leadership, organizational agility, workforce competence, and technology readiness. The results will be useful for project managers in organizations planning to implement AI to improve the efficiency of their workflows and projects. The application of the recommended list of 6 CFUs in the project management system will allow organizations to most adaptively and smoothly transition from traditional project management methods to AI-based methods.

Keywords: artificial intelligence, bibliometric analysis, critical success factors, change management, project management, sustainable implementation, digital transformation.

Introduction

The rapid development of artificial intelligence (AI) has had a profound impact on many sectors of the economy and business, including project management. AI technologies, including machine learning, natural language processing, and predictive analytics, are gradually being integrated into project management workflows to enhance efficiency, improve decision-making processes, and

optimize resource allocation [1]. Organizations worldwide are increasingly adopting AI-based solutions to automate repetitive tasks, forecast project risks, and improve project performance.

Although the advantages of applying AI in project management—particularly its ability to enhance data analysis and decision-making—are widely recognized, the adoption of these technologies across industries remains uneven. Many organizations continue to face difficulties in identifying the most effective methods for integrating AI into their project management systems [2]. The growing need to identify critical success factors (CSFs) for the effective use of AI in project management, given its uneven application across industries, defines the relevance of this study.

The purpose of this research is to review and evaluate the application of CSFs that influence the process of integrating AI technology into organizational project management. Accordingly, the objectives of the study include identifying CSFs that facilitate AI adoption and barriers that hinder its implementation, examining the impact of AI-driven decision-making on project performance, and analyzing the financial, ethical, and regulatory prerequisites associated with AI integration.

The research methodology is based on bibliometric literature analysis and expert evaluation by the authors. The scientific novelty of the study lies in the use of bibliometric analysis to identify CSFs for AI implementation in project management. This approach provides a comprehensive understanding of global trends, advanced research, and the key factors that drive or hinder the adoption of AI in organizations.

Materials and methods

In the past decade, there has been a growing body of research examining the integration of AI into project management. Such studies emphasize how AI can enhance resource optimization, business process automation, risk assessment, decision-making within project teams, and the maintenance of effective relationships with project owners [3].

However, the literature also highlights that increasing competition, the rapid growth of data, complex business process protocols, and the constantly changing needs of project clients are common challenges that traditional project management methods are unable to address. It is also noted that the effective integration of AI into an organizational environment requires the presence of critical success factors (CSFs) [4].

Examples of CSFs in the field of project management include leadership support, strategic alignment, robust data-processing infrastructure, staff training, and ethical governance, all of which contribute to the most effective integration of AI technology [5]. Accordingly, the application of CSFs within an organization's project management system ensures the successful implementation of AI into project workflows and helps maintain operational integrity and transparency [6]. International experience demonstrates that AI-based solutions facilitate real-time communication, predictive analytics, and dynamic planning, thereby enabling project managers to make informed decisions based on vast datasets [7].

Nevertheless, current research remains fragmented and lacks a unified framework. This study addresses this gap in the literature by conducting a comprehensive bibliometric review and providing a deeper understanding of the role of CSFs in the integration of AI into organizational project management.

This study employs a bibliometric analysis methodology to systematically examine and quantitatively assess the critical success factors (CSFs) associated with the adoption of AI applications in project management [8]. The bibliometric method has proven particularly valuable, as it facilitates the identification of significant scholarly contributions, collaboration networks, and emerging research gaps in the field of AI applications for project execution. By applying bibliometric tools, this study provides substantial insights into the success factors and barriers related to AI integration in project management, thereby enriching both academic discourse and the practical applicability of the findings.

Data collection for this research was carried out using Scopus, a widely recognized bibliometric database. The search was conducted in four stages. The initial literature search, using general keywords on AI in project management, yielded 8,372 articles from Scopus. Additional keywords helped narrow the dataset to 452 articles. Further refinement of terms related to CSFs and barriers reduced the total to 419 documents. Finally, filters were applied for publication year (2019–2025), document type (article), and language (English), resulting in 269 documents for bibliometric analysis.

The data were exported in CSV, BibTeX, and RIS formats to ensure compatibility with the three bibliometric tools used in the study: Bibliometrix, VOSviewer, and CiteSpace. Bibliometrix, based on R, was selected for its robust capabilities in scientometric analysis [8]. VOSviewer was employed to analyze CSV data, enabling the visualization of co-authorship networks, keyword co-occurrence, citation patterns, bibliographic coupling, and PageRank analysis to understand the structure of influence and collaboration in this domain [9].

The RIS file format was imported into CiteSpace, a Java-based program designed to identify and visualize patterns in scientific literature, in order to map citation networks and detect emerging trends [10]. CiteSpace has proven to be an effective tool for uncovering research directions, intellectual turning points, and temporal patterns in the field of AI adoption in project management. It enabled the analysis of co-citation networks, cluster detection, and clustering analysis, thereby providing a comprehensive view of the intellectual landscape of the field.

Results and discussion

The conducted bibliometric analysis revealed the following results. Publication trends: Research on the adoption of AI in project management has expanded significantly, with the annual number of publications increasing from just two in 2019 to 133 in 2024 (Figure 1). This indicates a growing academic interest in the topic and a heightened recognition of its importance.

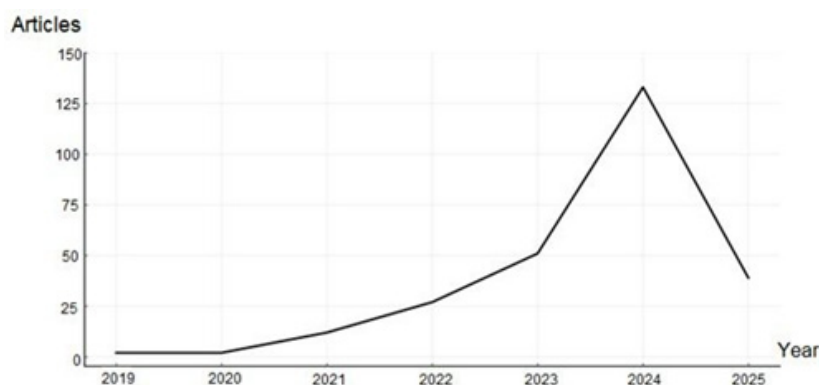


Figure 1 – Annual scientific output

Geographical distribution: As shown in Figure 2, significant international collaboration suggests geographically dispersed yet focused research efforts. China leads globally both in terms of the number of authors and the total number of publications on AI in project management, followed by India, the United Kingdom, and the United States.

Comparative and cluster analyses show that research on AI in project management from 2019 to 2025 has evolved into a diverse interdisciplinary field with strong thematic linkages in decision-making, digital transformation, social intelligence, and sustainable development. It is also worth noting that new research directions have emerged, such as concerns about AI, employee well-being, accident prevention, and social impact. The co-occurrence network analysis in Figure 3 illustrates the most frequently used keywords and their interrelations, providing a visualization of the connections among key terms in the field of AI in project management.

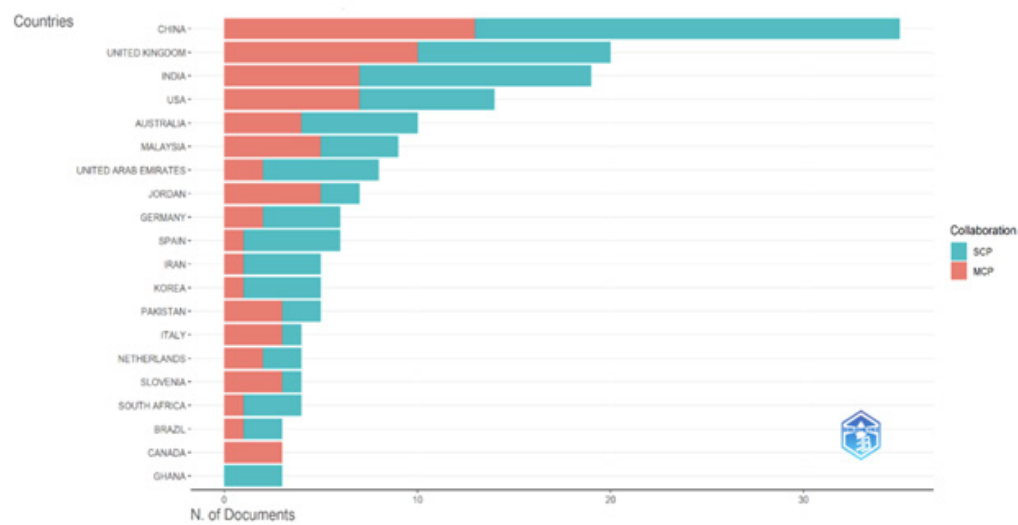


Figure 2 – Countries of corresponding authors (SCP – Single country publications; MCP – Multiple country publications)



Figure 3 – Co-occurrence network analysis in VOSviewer

As a result of the cluster analysis of keywords, nine unique thematic groups were identified, each representing a specific research area in the literature on AI and its applications in project management, industry, education, and organizational development (Figure 4).



Figure 4 – Keyword clusters in CiteSpace

PageRank analysis: Taking into account both the number and the impact of citations, the PageRank analysis made it possible to identify key articles within the citation network [11]. The

$$PR = \frac{1 - d}{N} + d \sum \frac{PR(Y_n)}{C(Y_n)}$$

PageRank score of an article is calculated using the following formula:

where PR – PageRank score;

d – damping factor ranging from 0 to 1;

$C(Y_n)$ – number of citations;

$PR(Y_n)$ – PageRank score of the cited article, calculated on an annual basis.

Table 1, which lists the five most influential articles, presents the results of the PageRank analysis. These works are the most significant in the field under consideration. For example, the study by Abdul Wahab and Radmehr focuses on the adoption of AI in small and medium-sized enterprises, while Almashawreh et al. examined the impact of technological and organizational processes on AI implementation in project management in Jordan [12, 13]. Both studies emphasize that the use of AI is positively associated with improved business efficiency, absorptive capacity, and client flexibility, particularly when firms are technologically and organizationally prepared.

The work of Munjeyi and Schutte explores the prospects, drivers, and barriers of AI adoption in project management [14]. According to their findings, strong leadership, regulatory support, and technological infrastructure are the three main CSFs for applying AI in project-related tax management. Overall, the conclusions of these studies highlight the importance of leadership vision, technological readiness, and strategic alignment for the effective integration of AI. These results are consistent with previous research indicating that some CSFs – such as strategic oversight and infrastructure readiness—are applicable across different sectors, including project management.

Despite the strategic potential of AI, several challenges remain. Shang et al. emphasize the high cost of implementation, shortage of skilled personnel, and organizational resistance to change as significant barriers [15]. These results contrast with more optimistic studies, underscoring the fact that both financial and human resource constraints often hinder AI adoption.

Critical success factors (CSFs) are what make the application of AI in project management successful. These variables were derived from the synthesis of the most influential articles identified through bibliometric analysis. According to the findings, AI adoption involves more than mere technical changes; successful integration also requires organizational and strategic approaches.

Table 1 – PageRank analysis results

Rate	PageRank	Authors	Study topic
1	195	Abdul Wahab (2024)	The impact of AI assimilation on firm performance in SMEs
2	177	Almashawreh (2024)	AI adoption in Jordanian SMEs: The influence of technological and organizational orientations
3	223	Munjeyi (2024)	Examining the critical success factors influencing the diffusion of AI in tax administration in Botswana
4	82	Shang (2023)	Prospects, drivers of, and barriers to AI adoption in project management
5	80	Grover (2022)	Understanding artificial intelligence adoption in operations management: Insights from the review of academic literature and social media discussions

The results indicate that the most important CSFs for the successful implementation of AI in project management are:

Leadership and strategic vision. According to prior studies, strong leadership commitment is a key determinant of AI effectiveness. AI integration is more likely to succeed in organizations with clearly defined goals, proactive leadership, and a coherent strategy. To maximize the impact of AI on project success, Abdul Wahab and Radmehr highlighted the importance of organizational adaptability [12].

Technological readiness and infrastructure. Successful AI adoption requires high computational power, reliable data management systems, and robust IT infrastructure. According to Almashawreh et al., technological capabilities — such as automation tools and AI-based data analytics — enhance project execution efficiency [13].

Workforce competence and training. Zhang et al. identified the shortage of skilled workers as a critical barrier to AI adoption [11]. For effective AI implementation, project managers and teams must develop competencies related to AI, including automation, algorithm-based decision-making, and predictive analytics.

Cost–benefit analysis and financial feasibility. Implementing AI entails substantial costs, particularly for small and medium-sized enterprises [15]. Conducting a long-term return-on-investment analysis is essential to determine whether AI adoption is financially viable and to ensure that its benefits outweigh the associated costs.

Regulatory and ethical considerations. AI applications are subject to ethical concerns as well as regulatory constraints. To achieve responsible AI integration, Munjeyi and Schutte stress the importance of compliance with AI ethics standards and governmental support [14].

Organizational culture and change management. AI-driven changes require businesses to foster an innovative and adaptable culture. Structured change management practices are necessary to overcome skepticism and ensure smooth integration of AI, as resistance to change remains a persistent challenge [15].

Conclusion

This study employed bibliometric analysis to identify and evaluate the critical success factors (CSFs) that influence the adoption of artificial intelligence (AI) in project management. The results clearly demonstrate that successful integration of AI extends beyond technical implementation and requires a combination of organizational, strategic, and human-centered elements. Specifically, the

research highlights top management support, strong leadership, organizational flexibility, workforce competence, and technological readiness as indispensable conditions for effective AI adoption. The bibliometric methodology applied and the structured list of six CSFs proposed in this study constitute the novelty and scholarly contribution of the research.

The findings have important practical implications for organizations seeking to transition from traditional project management methods to AI-driven approaches. By incorporating the six CSFs into project management systems, organizations can create a more adaptive environment, minimize resistance to change, and ensure a smoother and more sustainable integration process. For project managers, these insights provide a roadmap for balancing technological investments with strategic planning, leadership commitment, and workforce development.

In addition, this research contributes to the academic discourse by offering a systematic bibliometric perspective on AI adoption in project management – a field that is rapidly evolving but still fragmented. The identification of key themes, influential publications, and emerging research directions provides a valuable foundation for future scholarly inquiry.

However, the study also underscores that challenges remain. High implementation costs, skills shortages, and ethical and regulatory concerns are persistent barriers that organizations must address to fully realize the benefits of AI. This points to the need for further research, particularly in the following areas: 1) The long-term impact of AI adoption on project success, efficiency, and organizational competitiveness; 2) the scalability of AI integration across different industries and project type; 3) the development of frameworks for responsible and ethical AI use in project management.

Overall, the study demonstrates that AI has the potential to transform project management by enhancing decision-making, resource allocation, and risk management. Yet, its successful implementation depends on a holistic approach that aligns technological readiness with strategic vision, leadership, and human capital development. By addressing both the opportunities and the barriers, organizations can leverage AI not only to improve project performance but also to contribute to broader goals of digital transformation and sustainable organizational growth.

REFERENCES

- 1 Duică, M., Săndulescu C., Panagoreț D. The use of artificial intelligence in project management. *Valahian Journal of Economic Studies*, 15, 105–118 (2024). <https://doi.org/10.2478/vjes-2024-0009>.
- 2 Taboada, I., Daneshpajouh, A., Toledo, N., De Vass, T. Artificial Intelligence enabled project management: a systematic literature review. *Applied Sciences*, 13 (8), 5014 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13085014>.
- 3 Costantino, F., Gravio, G., Nonino, F. Project selection in project portfolio management: An artificial neural network model based on critical success factors. *International Journal of Project Management*, 33, 1744–1754 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.07.003>.
- 4 Prasetyo, M., Peranginangin, R., Martinovic, N., Ichsan, M., Wicaksono, H. Artificial intelligence in open innovation project management: A systematic literature review on technologies, applications, and integration requirements. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11 (1), 100445 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100445>.
- 5 Choi, S., Lee, E., Kim, J. The engineering machine-learning automation platform (EMAP): A big-data-driven ai tool for contractors' sustainable management solutions for plant projects. *Sustainability*, 13 (18), 10384 (2021). <https://doi.org/10.3390/su131810384>.
- 6 Tanim, S. AI driven strategic decision-making in IT project management. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 25 (02), 247–268 (2025). <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.2.0366>.
- 7 Machado, F.J., Martens, C.D.P. Project Management Success: A Bibliometric Analysis // *Revista de Gestão e Projetos*, 6 (1), 28–45 (2015).
- 8 Ari, M., Cuccurullo, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis // *Journal of Informetrics*, 11 (4), 959–975 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.
- 9 Glänzel, W., Schubert, A. Analysing Scientific Networks Through Co-Authorship. *Quantitative Science and*

Technology Research, 1 (5), 257–276 (2005). https://doi.org/10.1007/1-4020-2755-9_12.

10 Chen, C. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 57 (3), 359–377 (2006). <https://doi.org/10.1002/asi.20317>.

11 Zhang, P., Wang, T., Yan, J. PageRank centrality and algorithms. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 586, 126438 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126438>.

12 Abdul Wahab, M., Radmehr, M. The impact of AI assimilation on firm performance in small and medium-sized enterprises: A moderated multi-mediation model. *Heliyon*, 10 (8), e29580 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29580>.

13 Almashawreh, R., Talukder, M., Charath, S.K., Khan, M.I. AI adoption in Jordanian SMEs: The influence of technological and organizational orientations. *Global Business Review*, 1–29 (2024). <https://doi.org/10.1177/09721509241250273>.

14 Munjeyi, E., Schutte, D. Examining the critical success factors influencing the diffusion of AI in tax administration in Botswana. *Cogent Social Sciences*, 10 (1), 2419537 (2024). <https://doi.org/10.1080/23311886.2024.2419537>.

15 Shang, G., Low, S.P., Lim, X.Y.V. Prospects, drivers of, and barriers to AI adoption in project management. *Built Environment Project and Asset Management*, 13 (5), 629–645 (2023). <https://doi.org/10.1108/bepam-12-2022-0195>.

***¹Жұматаева А.Г.,**

магистр, кіші ғылыми қызметкер, ORCID ID: 0009-0007-9753-3071,

*e-mail: asyl.zhumatayeva@bk.ru

¹Мұқашев Е.Б.

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID ID: 0000-0003-1003-176X,

e-mail: e.mukashev@kbtu.kz

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ЖОБА БАСҚАРУЫНДАҒЫ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ: ТАБЫСТЫҚ ФАКТОРЛАРЫН ҚАРАСТЫРУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ

Аңдатпа

Машиналық оқыту, болжамды аналитика және табиғи тілді өңдеу сияқты жасанды интеллект (ЖИ) технологиялары ұйымдардағы жобаның жұмыс үрдісіне көбірек біріктірілуде. Дегенмен, ЖИ тиімділікті, автоматтандыруды және шешім қабылдауды жақсартқанымен, көптеген ұйымдар технологиялық инфрақұрылыммен, жұмыс күшінің дайындығымен және нормативтік талаптарға сәйкестікпен күреседі. Бұл зерттеудің мақсаты – жобаны басқаруда ЖИ технологиясын енгізуге әсер ететін сыни табыстық факторларын (СТФ) қарастыру және бағалау. Библиометриялық талдау және сараптамалық бағалау әдістемесі негізінде тақырып бойынша озық зерттеулер, саладағы негізгі даму бағыттары сарапталып, ЖИ технологиясын тиімді енгізуге ықпал ететін CSF анықталды. Нәтижелер ЖИ табысты интеграциясы жоғары басшылықтың қолдауын, күшті көшбасшылықты, ұйымдастырушылық ептілікті, жұмыс күшінің құзыреттілігін және технология дайындығын қажет ететінін көрсетеді. Нәтижелер жұмыс процестері мен жобаларының тиімділігін арттыру үшін ЖИ енгізуді жоспарлап отырған ұйымдардағы жоба менеджерлері үшін пайдалы болады. Жобаларды басқару жүйесінде ұсынылған 6 STF тізімін қолдану ұйымдарға жобаларды басқарудың дәстүрлі әдістерінен ЖИ негізіндегі әдістерге барынша бейімделгіш және тегіс көшуге мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: жасанды интеллект, библиометриялық талдау, табыстың сыни факторлары, өзгерістерді басқару, жобаларды басқару, тұрақты енгізу, цифрлық трансформация.

***¹Жуматаева А.Г.,**

магистр, младший научный сотрудник, ORCID ID: 0009-0007-9753-3071,

*e-mail: asyl.zhumatayeva@bk.ru

¹Мукашев Е.Б.,

PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0003-1003-176X,

e-mail: e.mukashev@kbtu.kz

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В УПРАВЛЕНИИ ПРОЕКТАМИ: ОБЗОР И ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ УСПЕХА

Аннотация

Технологии искусственного интеллекта (ИИ), такие как машинное обучение, прогнозная аналитика и обработка естественного языка, все больше интегрируются в рабочие процессы проектов в организациях. Однако в то время как ИИ повышает эффективность, автоматизацию и принятие решений, многие организации испытывают трудности с технологической инфраструктурой, готовностью персонала и соблюдением нормативных требований. Целью данного исследования является проведение обзора и оценки критических факторов успеха (КФУ), которые влияют на ход внедрения технологии ИИ в управлении проектами. На основе методологии библиометрического анализа и экспертной оценки, были изучены передовые исследования по тематике, выявлены основные направления развития области и КФУ, способствующие эффективному внедрению технологии ИИ. Выводы показывают, что успешная интеграция ИИ требует поддержки высшего руководства, сильного лидерства, организационной гибкости, компетентности персонала и технологической готовности. Полученные результаты будут полезны проектным менеджерам в организациях, которые планируют внедрение ИИ для повышения эффективности их рабочих процессов и проектов. Применение 6 КФУ в системе управления проектами позволит организациям наиболее адаптивно и плавно перейти от традиционных методов управления проектами к методам, основанным на ИИ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, библиометрический анализ, критические факторы успеха, управление изменениями, управление проектами, устойчивое внедрение, цифровая трансформация.

Article submission date: 11.09.2025

UDC 004.8:005.8
IRSTI 06.81.23

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-390-403>

¹**Kalidullin B.,**

Master's degree, ORCID ID: 0009-0009-4053-9952,
e-mail: kalidullin.b@gmail.com

^{2*}**Samoilov A.,**

PhD student, ORCID ID: 0009-0006-0548-4982,
*e-mail: an_samoilov@kbtu.kz

³**De Marco A.,**

PhD, Professor, ORCID ID: 0000-0002-4145-2287,
e-mail: alberto.demarco@polito.it

¹NGU Project Organization LLP., Almaty, Kazakhstan

²Institute of Advanced Research and Sustainable Development, Almaty, Kazakhstan

³Politecnico di Torino, Turin, Italy

AI APPLICATIONS IN PROJECT MANAGEMENT: TRENDS, CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES

Abstract

Efficient project planning and execution require to implement new methods and techniques instead of traditional ones. Artificial intelligence (AI) driven tools can allocate better project resources and perform project more efficient. The given study explores the role of the AI implementation in project management (PM). Bibliometric analysis is done using VOSviewer and CiteSpace software tools. The research has analyzed academic papers published 2010 to 2025 using Web of Science database. Results of research has shown a significant growth in publications on the topic of the use of AI in PM. AI tools are often used for resource optimization, risk prediction and cost estimation in PM. Keywords analyses have shown the growing importance of fields like machine learning, big data and neural networks. The study also highlights main benefits and challenges in the use of AI tools in PM and the growing interest of the scientific community in this topic.

Keywords: artificial intelligence (AI), bibliometric analyses, project management (PM), VOSviewer, Citespace.

Introduction

Due to rapid growth of scale and complexity of projects, traditional approaches in project management are not being effective anymore. As industries evolve, the limitations of traditional planning and conventional approaches become more evident, prompting project managers to seek more adaptive methodologies [1]. Artificial Intelligence (AI) provides huge opportunities which can be used for better project management [2]. Big potentials of AI applications in project management still requires careful analyses and research [3]. Various AI tools such as machine learning, robotics and neural networks can be used for resource optimization, cost estimation and risk prediction in project phases [4]. However, despite its big potentials, AI integration in project management faces some challenges like high costs, ethical issues and low skilled professionals. Particularly, companies may resist on using AI applications due to very high integration costs. Furthermore, use of AI tools in projects require professionals with the knowledge of machine learning and the skills to analyze the big data, which companies may not have [3].

Academic literature has lots of publications on Artificial Intelligence technologies and their integration in many industries [5]. However, the research in the field of AI integration in project management is not fully discovered. The study explores both benefits and challenges of using

AI applications by performing bibliometric analyses. According to academics, predictive project analytics is where artificial intelligence made a significant contribution to project management [6]. Predictive analytics refers to analyzing large amount of project data and predicting risks and cost estimations for the project. The information value of predictive project analytics has increased as the growth of big data has improved data collection capabilities. Similarly, AI-specific data analysis tools are expected to handle the increasing volume of project data.

The study presents bibliometric analysis of the topic due to the shortcomings of current literature assessments. Bibliometric analyses allow creating networking maps based on analyses of large data [7]. This facilitates the categorization of knowledge structures, the integration of previously acquired concepts, and the identification of new patterns in the field of research [8–10]. As a result, this method seems appropriate to complement current literature assessments by providing a more comprehensive and dynamic analysis.

The purpose of this study is to explore the role of AI application in project management and reveal trends, opportunities and barrier in the integration of AI applications.

Research work has following research questions:

1. How the literature on the topic of using AI applications in project management is organized?
2. What are the research trends on the topic?
3. What are the barriers in using AI applications in Project management?

The research findings are useful for both scientists and practitioners. For scientists, creating a conceptual framework for the subject matter makes it easier for researchers to understand the scientific field as a whole. The process improvements in PM that can be made possible with the help of AI are described in a separate section for practitioners. Possible advantages and challenges of using AI tools in particular industries are highlighted. The main contribution of this study is to better understand the trends in academic publications on the application of AI in project management based on the results of a comprehensive bibliometric analysis.

Additionally, recognizing evolving areas of the topic provides scholars with an organized and synchronized way to advance their academic research. Discussions on fundamental themes of emerging trends allow practitioners to better understand the current limitations of the technology [11]. In addition, businesses can enable intelligent systems by leveraging today's simulated intelligent systems. Finally, the benefits of keyword aggregation are primarily scientific. Scholars can understand structure of a research by mapping most relevant keywords. In addition, it helps scholars index and find relevant documents on a topic.

The three research questions will be examined using the quantitative method of bibliometric research. This study benefits from bibliometric research methods because they compare scientific works in a quantitative and organized manner and assess the productivity of the literature in a given field. Given analyses is beneficial for studying particular field such as AI in project management. Scientific articles in AI use in project management published between 2010–2025 years will be analyzed from Web of Science database.

Materials and methods

The Figure 1 demonstrates the evolution of use of AI in Project Management involves four stages. First phase is happened in 1983, when first automation programs were integrated. Later chatbot assistants have been used to manage meetings. The third phase began with the use of machine learning in project management for the purposes of providing accurate risk predictions, cost estimations and improving communications between stakeholders [12]. Using knowledge gained from project history, artificial intelligence (AI) allows real-time monitoring, adjusting resources and handling risks on real time [13].

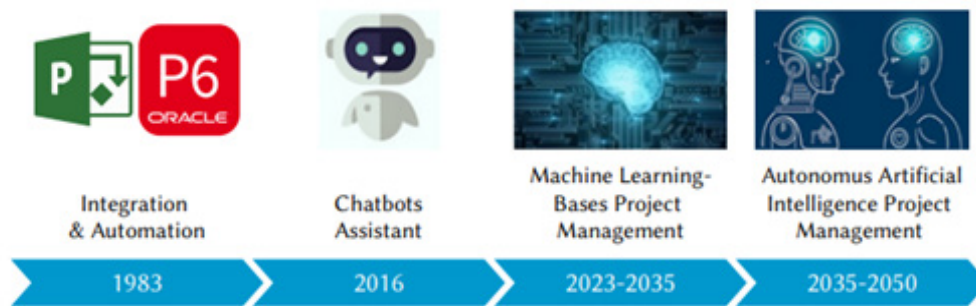


Figure 1 – Development of AI integration in Project Management

Note: compiled by Jayaram et al. [12]

Academicians consider that a new paradigm will be developed by reducing the risks associated with decision making. During the fourth stage, automotive AI system will be developed, which will take decisions itself [11]. The bots used in the different phases of project execution are another useful application of AI. These bots, which are natural language-based agents, improve human efficiency by helping users navigate project management software via chatbots. AI applications in project management are currently not fully integrated and its believed that AI tools can offer more potential benefits in the future [14].

Machine learning (ML) is defined as an AI tool that is able to learn from data and identify certain data patterns [15]. For example, machine-learning algorithms can estimate future budget requirements and timelines by analyzing historical data. Another powerful AI tool which uses machine learning techniques is Natural Language Processing (NLP) which can be efficiently implemented in routine tasks assisting the project team. NLP is mainly about how computers can understand human speech and respond back effectively. NLP can be applied in project management in several ways: NLP can be used for automotive tasks like organizing meetings, taking meeting notes, sending reports thus improving communication between stakeholders [12]. Furthermore, NLP-based applications can be utilized for analyzing project document texts and retrieving data for further cost estimation or risk prediction [16]. In overall, machine learning is used to create models for predictions based on analysis of historical information. Therefore, it can be concluded that ML is mainly used for creating prediction models. Narbaev et al. used Machine Learning for project cost prediction [17]. Authors develop XGBoost forecasting model which proved to work better than EVM and ML models. Lishner and Shtub utilized Artificial Neural Network to predict project duration, where authors propose a dynamic project duration prediction (DPDP) method that uses prediction model which tracks on time project characteristics and optimize it [18].

Robotic process automation (RPA) is AI tool which is used for doing automotive and repetitive tasks. Traditional approaches in project management included involvement of project managers in doing such tasks like preparing reports, putting data entries, tracking project timelines and etc. Integration of RPA in project management is totally changing the process: RPA bots are automatically used for report generation, data entries, tracking project timelines, distributing tasks, updating meeting notes and etc. [14]. Project managers in this case can concentrate on more important tasks and use RPA for better project monitoring and controlling.

Nowadays the scale of projects is increasing continuously, which leads to complexity of analyses of large project data. In this regard data analytics can be used for efficient data analyses. Data analytics involves analyzing large scale data and retrieving trends from the conducted analysis. Data analytics can be used for resource optimization, risk prediction or cost estimation. This in turns lead to better project management and reducing project costs [4]. Data analytics can also be used for real time performance monitoring of the projects. Data analytics can provide relevant data which may be further used by project managers to track the project progress and to respond to occurring

problems [19]. Data analytics identifies common patterns and trends in project data, that can further be used for identification of potential risks and problems. This helps project managers efficiently respond to challenges and improves project outcomes.

Hashimzai and Mohammadi presented a survey based on analyzing scientific articles from several databases [20]. Authors used keywords such as “AI in project management”, “risk management”, “prediction model”. The results of the study showed that the most trending areas in using AI in project management includes predictive analysis, automated scheduling and use of AI driven chatbots. According to the study the main issues companies face in integrating AI are high costs of implementation, data privacy issues and lack of professionals in AI.

Taboada et al. presents AI applications in project management performance and conducts survey to examine role of AI in emerging project management [21]. The results show that there has been a marked increase in number of scientific publications recently. It shows growing importance of AI integration in project management to improve project planning and controlling.

Bento et al. studied the potential and limitations of AI in project management through a literature survey, which allowed analysis and comparison of selected articles and the discovery of some trends and patterns [22]. The results of the study show that the main focus of the researchers is on construction and engineering, but recently they have shown a greater tendency to deviate into other areas that are more focused on artificial intelligence and certain sub-areas of project management that are particularly important, such as human resource management or decision support systems.

Research methodology involves bibliometric analyses which allow analysis of large number of scientific works in the field and revealing trends and gaps in the topic. Bibliometric analysis is performed by using software tools such as Bibliometrix, VOS viewer, CiteSpace and Gephi.

The research design is considered in the first step of the scientific mapping procedure, which also describes the bibliometric methods that address the research questions. In the second phase, data collection is performed. The final phase involves the use of the selected bibliometric software for data analysis, visualization, and interpretation (Figure 2).

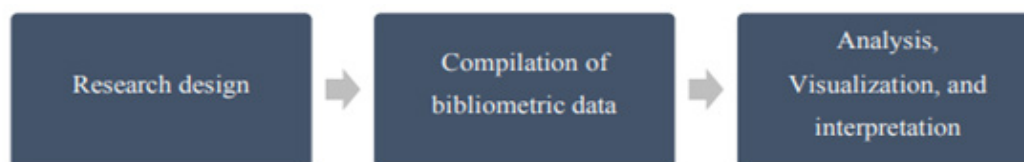


Figure 2 – Research workflow

Note: compiled by authors

Keywords are selected and searched in Web of Science. Identifying specific keywords is essential to this process in order to cover the entire research area.

In given work, two strings are used as input data. String 1 is identified with terms linked to Artificial Intelligence, while second column are keywords linked to Project Management (Table 1).

Table 1 – Keywords used in Web of Science

String 1	String 2
Artificial Intelligence	Project Management
AI	
AI applications	
AI tools	
Search line in Web of Science:	
TS= ('Artificial Intelligence' OR 'AI' OR 'AI applications' OR 'AI tools') AND TS=('Project Management')	

The search by given keywords in Web of Science database resulted in 22,148 scientific works published in 1984–2024 years. The data provided by search of keywords in database can contain unrelated works. Therefore, identifying inclusion and exclusion criteria for filtering data is required. Inclusion criteria included publication type as a journal article or review article, publications only in English language and publications published in the period of 2010–2025 years (Table 2).

Table 2 – Inclusion criteria

№	Inclusion criteria
1	Publication date: 2010–2025
2	Type: journal article or review article
3	Language: English

Search string from Table 1 was inserted to Web of Science database search engine. It resulted in 22,148 scientific articles (Figure 6). At the step 2, publications from 2010–2025 were sorted (20,024 articles). At the step 3, journal and review articles were filtered which resulted in 13,252 works.

Furthermore, inclusion criteria 3 was applied and publications only in English language were selected (12,994 articles). At the next step articles related to technology but not to AI were excluded (4,585 articles). Finally, AI related articles but not in project management domain were excluded. It resulted in final 1,116 scientific articles. According to Rogers and Adams, the recommended number of articles for bibliometric analysis is 1,000 works [23]. Based on this criteria, 1,116 papers will be further analyzed.

Results and discussion

Descriptive analysis is provided in Table 4. Based on the search in Web of Science, we have 1,116 documents in database from the period of 2010–2025. 1,064 scientific works are journal articles, while 52 are review articles. Furthermore, sources of articles are 286, while the number of authors in general is 3,075. There are only 74 authors of single authored articles. In regarding co-authorship, there are 3 authors per article on average. This may be reasoned by the fact that AI in Project Management is quite broad topic and can be applied in many fields.

Table 3 – Descriptive analysis

Description	Results
Main information about data	
Time period	2010–2025
Article sources	286
Articles	1,116
Annual growth rate %	14,3 %
Document average age	4,51
Average citations per article	15.75
References	13,957
Article contents	
Keywords	4,768
Authors keywords	3013
Authors	

Continuation of table 3

Authors	3,075
Authors of single-authored articles	74
Authors collaboration	
Single authored articles	79
Co-authors per article	2.99
International co-authorships %	25.71
Article type	
Journal article	1,064
Review article	52

Average growth rate is equal to 14,3%. From the graphs provided in Figure 3, we can see that the number of publications in given topic significantly has increased from 2019. The highest number of articles are in 2021 and 2024. Few numbers of publications by 2025 can be explained with the fact that the data contains only first three months of the year.

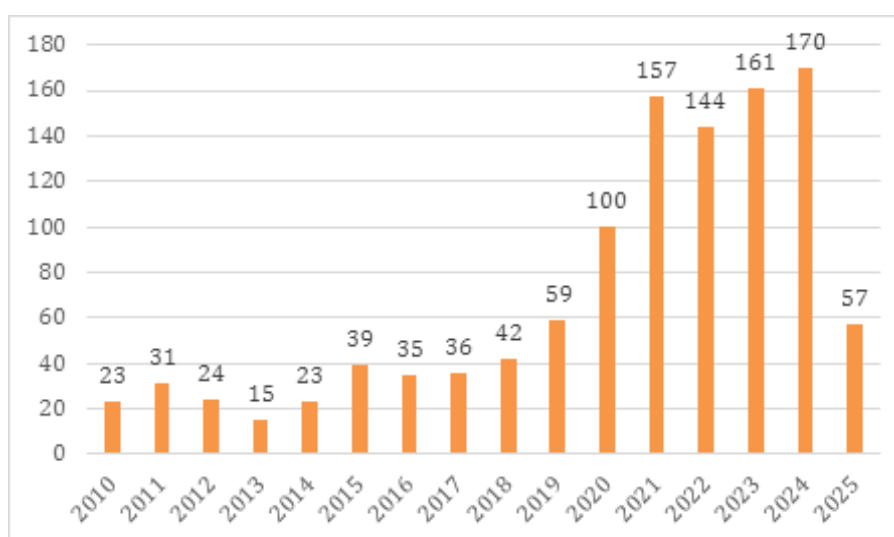


Figure 3 – Annual publication trend 2010–2025

Note: compiled by authors

In Figure 4, network of collaboration of countries with six clusters is presented, where top 10 countries published in field of use of artificial intelligence in Project Management. China, USA and India have most published documents. Regarding total citations received per country, China, USA and Italy are the countries with most total citations in the field. It can be seen that co-authorship rate is low. The reason behind it is the difficulty of research in AI integration in project management. Different countries may have different capabilities to perform research in a given field.

Co-occurrence analyses of keywords are shown in the Figure 5. From the figure, it can be seen that most used keywords are artificial intelligence, management, machine learning and model.

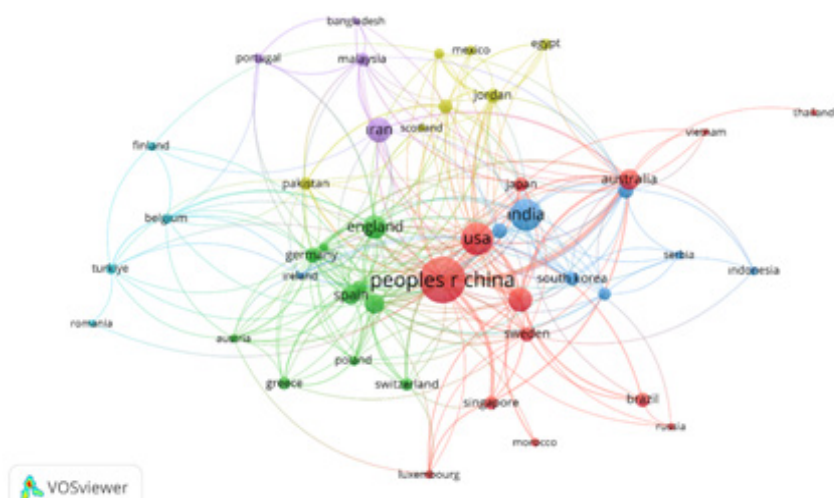


Figure 4 – Collaboration of countries in research field

Note: compiled by authors

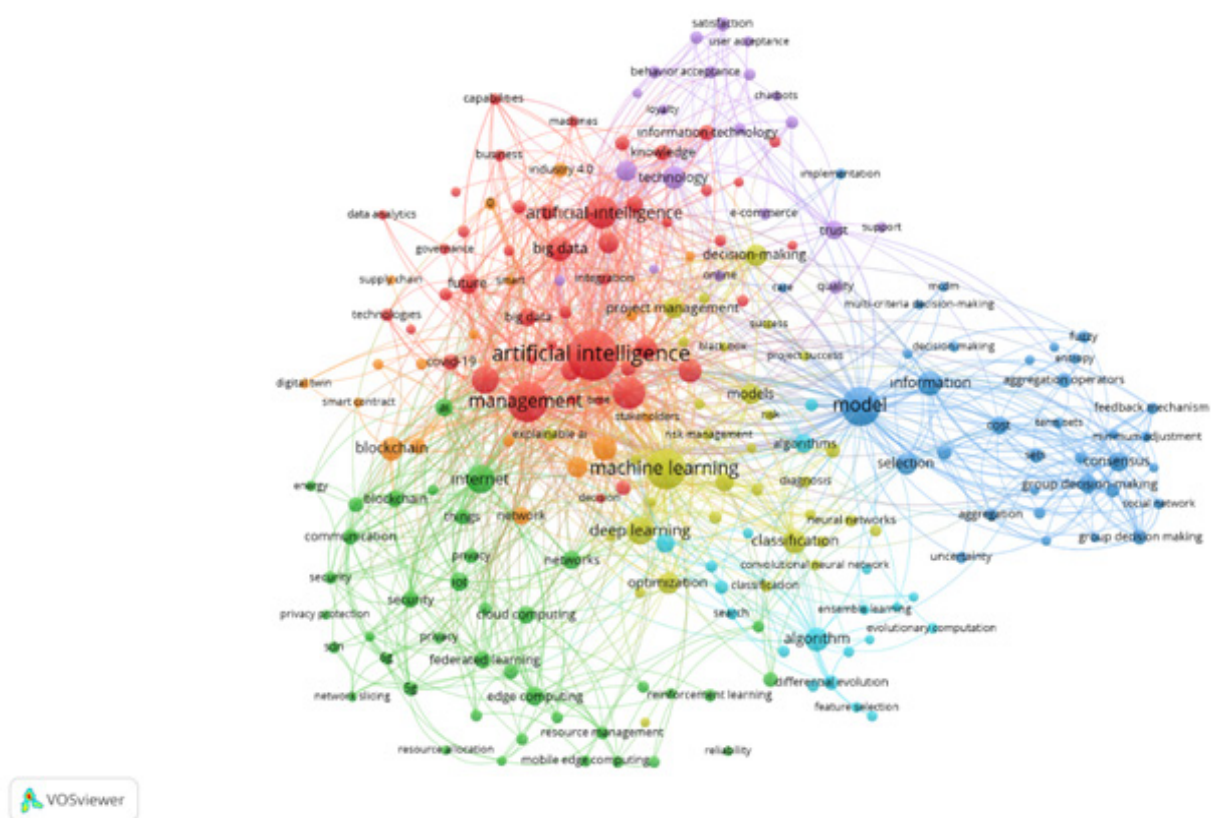


Figure 5 – Co-occurrence of keywords

Note: compiled by authors

Most used keywords are provided in Figure 6. The dominant themes in the research field are artificial intelligence (134 times) and management (83 times). It follows up with following themes machine learning (82), model (78).

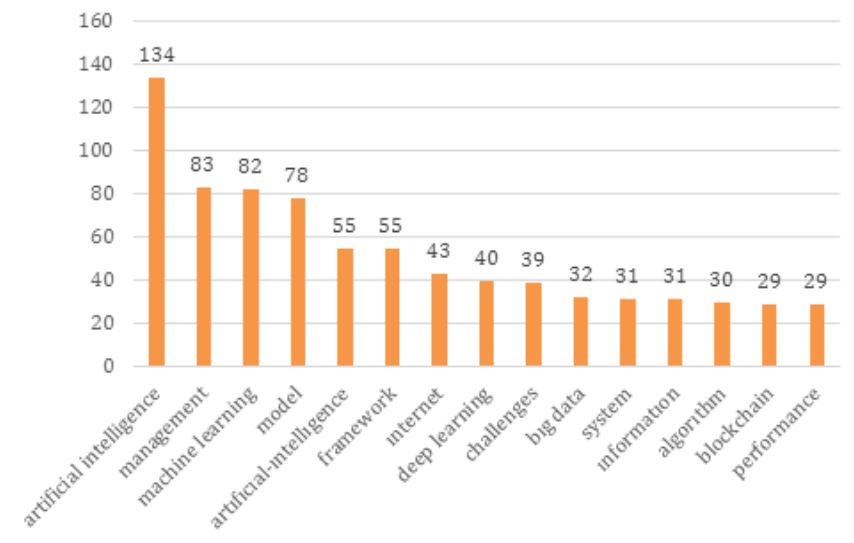


Figure 6 – Most occurred keywords

Note: compiled by authors

Citation burst analyses show the frequency of keywords cited in the literature over a given time period, indicating rapidly developing topics or topics related to citations. CiteSpace was used to conduct the citation analysis. The dataset contained 54 keywords. Figure 7 presents the top 25 keywords with the highest citation bursts.

Top 25 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2011 - 2025
artificial intelligence	2013	18.57	2022	2025	
machine learning	2014	8.5	2022	2025	
challenges	2022	6.66	2022	2023	
internet	2020	6.51	2020	2023	
big data	2016	4.91	2021	2023	
framework	2012	4.49	2021	2023	
management	2016	2.72	2020	2022	
system	2012	1.89	2012	2015	
ethics	2019	1.86	2019	2020	
hybrid	2012	1.71	2012	2013	
genetic algorithm	2012	1.58	2012	2014	
selection	2013	1.26	2013	2014	
fuzzy logic	2011	1.25	2011	2012	
regression	2011	1.25	2011	2012	
terminal assignment problem	2012	1.2	2012	2013	
swarm intelligence	2012	1.2	2012	2013	
support vector machines	2012	1.2	2012	2013	
terminal assignment problems	2012	1.2	2012	2013	
tabu search	2012	1.2	2012	2013	
optimization	2012	1.19	2014	2015	
design	2012	1.14	2012	2013	
algorithms	2018	1.12	2018	2019	
artificial bee colony algorithm	2015	1.12	2015	2016	
efficient	2015	1.12	2015	2016	
nature-inspired algorithms	2017	1.12	2017	2018	

Figure 7 – Citation bursts

Note: compiled by authors

Artificial intelligence has the strongest citation burst in 2022–2025, explaining significant growth of publications in the given period. Machine learning, challenges, big data and management have high citation bursts in the period of 2020–2025, indicating high influence of given topics in the research field.

CiteSpace also allows creating clusters. Figure 8 presents 8 major clusters with high citations. As it can be seen, artificial intelligence, deep learning big data and communications are largest clusters in literature.



Figure 8 – Clustering structure

Note: compiled by authors

Table 11 provides a structured analyses of key trends in the use of artificial intelligence (AI) tools in project management (PM) across industries. It categorizes nine major AI tools such as machine learning (ML), natural language processing (NLP), computer vision, robotic process automation (RPA), and others, based on four key dimensions.

Table 4 – Cross-Sectoral Analysis of AI Tools and Their Applications in Project Management

No.	AI tool	Application in Project Management	Industry	Opportunities	Barriers
1.	Machine Learning (ML)	Used for resource optimization, risk prediction and cost estimation	IT, Construction Management, Engineering	Improves prediction accuracy, provides effective data driven decisions	Large data sets required; model interpretability
2.	Natural Language Processing (NLP)	Used mainly for documentation automation, report generation and sentiment analysis	IT, Legal, Marketing	Saves time on administrative tasks; analyzes stakeholder feedback in real time	Domain-specific language understanding issues

Continuation of table 4

3.	Optimization Algorithms	Used for resource optimization, resource allocation, scheduling, logistics optimization	IT, Construction, Engineering and Logistics	Provides efficient resource allocation and cost & time savings	Difficulties with integration to existing systems
4.	Predictive Analytics	Used for risk prediction, forecasting project outcomes	Construction, Manufacturing, Engineering Healthcare	Improves project outcomes	Historical data required, prediction accuracy depends on quality of data
5.	Computer Vision	Used in site monitoring, observing safety regulations and tracking progress	Construction, Manufacturing, Energy	Provides real-time visual information; hazard detection	High hardware costs, image quality is affected by weather and lighting conditions
6.	Decision Support Systems	Used in multi-criteria decision making	IT, Strategic Planning, Government	Provides efficient decision making	Difficulties in modelling scenarios
7.	Robotic Process Automation (RPA)	Used in repetitive task automation	IT, Finance, Human Relations, Telecommunications	Increases efficiency, reduces manual errors.	Lack of adaptability; limited to rule-based processes
8.	Chatbots and Virtual Assistants	Used in communications with stakeholders, task reminders	IT, Customer Service, Finance, Education	Response time reduction, real time availability	Issues in understanding complex queries
9.	Digital Twins	Used for modeling project performance in real time	Engineering, Construction, Manufacturing	Real-time monitoring; preventive maintenance	High costs, integration issues

The use of AI tools in PM includes cost estimation, planning, risk prediction, and stakeholder engagement. The main areas of using artificial intelligence applications are stated as construction industry, engineering, IT, finance and education. Key advantages of using AI applications in project management involve automation, improving predictive analytics, efficient resource allocation, optimization and improved project outcomes [6]. Barriers for AI integration in project management are firstly high integration costs, need for high quality historical data which companies usually are unable to provide, data privacy issues and other difficulties with adapting and integration [24].

Analyses show that research work in the area of use of AI applications in project management was low until 2010. Starting from 2015, significant increase in publications show the research interest on a given topic. Rapid development in machine learning and artificial intelligence evoked the interest of scientists on the topic. Increasing complexity of projects and requirement for big data analyses made artificial intelligence as essential tool in project management.

With the increase of research interest on the topic, cooperation between researchers from different countries has also increased. Authors from countries like China, USA and India have more collaboration works on the topic.

Research analyses has showed that most cited keywords in given topic were machine learning, project management and artificial intelligence. The trend topics in research field are artificial intelligence (cited 134 times) and management (cited correspondingly 83 times) followed by machine learning (cited 82 times) and model (cited 78 times).

Conclusion

Artificial Intelligence has been revolutionizing many industries. Project management has also been transformed with integration of AI tools. AI applications such as machine learning and robotic process automation helps to analyze large amounts of data and automates repetitive tasks, thus improving and accelerating project management processes. Different AI-driven tools are also being used for predictive analytics, resource allocation and risk management. Beside advantages AI can provide, the main challenges of its integration in project management are high costs and data privacy issues.

The given study explored trends in the use of AI applications in project management based on conducted bibliometric analysis for the scientific publications published in last 15 years. Dataset is retrieved from Web of Science database, thereafter VOSviewer and CiteSpace bibliometric tools were used for data analyses.

The results of the study revealed the significant increase of publications on the usage of AI applications in project management. Published scientific papers on given topic has showed tendency to increase during last 10 years. Countries like China, USA and India have owned most published papers on this topic. Regarding total citations received per country, China, USA and Italy are the countries with most total citations in the field. Keywords analyses have shown that the most occurring keywords on the topic involved artificial intelligence, machine learning, big data and hybrid models.

Limitation of given study is that authors consider only publications in English, excluding non-English publications about the related topic. Results of the study may have particular research gaps such as the use for analysis one scientific database, which may not include important results from other research papers. Future research may continue to analyze scientific papers on the application of AI tools in specific areas of project management, particularly where AGILE and SCRUM techniques are used.

REFERENCES

- 1 Salimimoghadam, S., Ghanbaripour, A.N., Tumpa, R.J., Kamel Rahimi, A., Golmoradi, M. The Rise of Artificial Intelligence in Project Management: A Systematic Literature Review of Current Opportunities, Enablers, and Barriers. *Buildings*, 15 (7), 1130 (2025). <https://doi.org/10.3390/buildings15071130>.
- 2 Müller, R., Locatelli, G., Holzmann, V., Nilsson, M., and Sagay, T. Artificial Intelligence and Project Management: Empirical Overview, State of the Art, and Guidelines for Future Research. *Project Management Journal*, 55 (1), 9–15 (2024). <https://doi.org/10.1177/87569728231225198>.
- 3 Vergara, D., del Bosque, A., Lampropoulos, G., and Fernández-Arias, P. Trends and Applications of Artificial Intelligence in Project Management. *Electronics (Basel)*, 14 (4), 800 (2025). <https://doi.org/10.3390/electronics14040800>.
- 4 Tarawneh, M., AbdAlwahed, H., and AlZyoud, F. Innovating Project Management: AI Applications for Success Prediction and Resource Optimization, 382–391 (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-56950-0_32.
- 5 Hossain, Muhammed Z., Hasan, L., Dewan, A., Monira, N. The Impact of Artificial Intelligence on Project Management Efficiency. *International Journal of Management & Information Systems (IJMIS)*, 1, 1–17 (2024).
- 6 Diao, Z. Project Management in the Age of Artificial Intelligence. *Highlights in Business, Economics and Management*, 39, 1119–1125 (2024). <https://doi.org/10.54097/23axpg43>.
- 7 Kozhakmetova, A., Narbaev, T., Serikbay, D., Mamyrbaev, A and Abdrashova, K. NAVIGATING THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PROJECT MANAGEMENT: A SCIENTOMETRIC ANALYSIS. *Bulletin of Toraighyrov University. Economics series*, 2.2024, 208–221 (Jun. 2024). <https://doi.org/10.48081/RIKK5436>.

- 8 Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., and Lim, W.M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *J Bus Res*, 133, 285–296 (Sep. 2021). [https://doi.org/ 10.1016/j.jbusres.2021.04.070](https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070).
- 9 Osei-Kyei, R., Narbaev, T., and Ampratwum, G. A Scientometric Analysis of Studies on Risk Management in Construction Projects. *Buildings*, 12 (9), 1342 (Aug. 2022). [https://doi.org/ 10.3390/buildings12091342](https://doi.org/10.3390/buildings12091342).
- 10 Da Costa, R.L., Dias, Á.L., Gonçalves, R., Pereira, L., and Abreu, S. Artificial Intelligence in Project Management: Systematic Literature Review. *International Journal of Technology Intelligence and Planning*, 13 (2), 1 (2022). [https://doi.org/ 10.1504/IJTIP.2022.10050400](https://doi.org/10.1504/IJTIP.2022.10050400).
- 11 Gil Ruiz, J., Martínez Torres, J., and González Crespo, R. The Application of Artificial Intelligence in Project Management Research: A Review. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 6 (6), 54–66 (2021). [https://doi.org/ 10.9781/ijimai.2020.12.003](https://doi.org/10.9781/ijimai.2020.12.003).
- 12 Jayaram, M., Bhutkar, Y., I.L. Kumar Bojjanapalli, Yeshwanth, G., and Reddy, B.Y. Beyond Automation: AI-Driven Project Management with OpenAI and Prompt Engineering // in 2024 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET, IEEE, Jul. 2024), pp. 1–6. [https://doi.org/ 10.1109/ICECET61485.2024.10698333](https://doi.org/10.1109/ICECET61485.2024.10698333).
- 13 Narbaev, T., Aitkhozha, B., Samoilov, A., and Castelblanco, G. An Assessment of Financial Stability of Artificial Intelligence-based Monitoring Project in Kazakhstan. *Eurasian Journal of Economic and Business Studies*, 69 (2), 95–108 (Jun. 2025).
- 14 Thiruthuraipondi Natarajan, R. Artificial Intelligence (AI) BOTS in Testing. *International Scientific Journal of Engineering and Management*, 04 (01), 1–7 (Jan. 2025). [https://doi.org/ 10.55041/ISJEM01437](https://doi.org/10.55041/ISJEM01437).
- 15 Vijayakumar Raja. Artificial Intelligence and Machine Learning in Project Management: A Conceptual Framework for Future Integration. *Journal of Business and Management Studies*, 7 (5), 45–52 (Aug. 2025). [https://doi.org/ 10.32996/jbms.2025.7.5.4](https://doi.org/10.32996/jbms.2025.7.5.4).
- 16 Vellela, S.S., Singu, K., Kakarla, L.S., Tadikonda, P., and S.N.R. Sattenapalli. NLP-Driven Summarization: Efficient Extraction of Key Information from Legal and Financial Documents. *SSRN Electronic Journal* (2025). [https://doi.org/ 10.2139/ssrn.5250908](https://doi.org/10.2139/ssrn.5250908).
- 17 Narbaev, T., Hazir, Ö., Khamitova, B., and Talgat, S. A machine learning study to improve the reliability of project cost estimates. *Int J Prod Res*, 62 (12), 4372–4388 (Jun. 2024). [https://doi.org/ 10.1080/00207543.2023.2262051](https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2262051).
- 18 Lishner I. and Shtub, A. Using an Artificial Neural Network for Improving the Prediction of Project Duration. *Mathematics*, 10 (22), 4189 (Nov. 2022). [https://doi.org/ 10.3390/math10224189](https://doi.org/10.3390/math10224189).
- 19 Serikbay, D., Kozhakhmetova, A., Jumasseitova, A.K., and Mukashev, Y. When Machines Manage. *International Journal of Asian Business and Information Management*, 16 (1), 1–18 (Jul. 2025). [https://doi.org/ 10.4018/IJABIM.384773](https://doi.org/10.4018/IJABIM.384773).
- 20 Hashimzai, I.A. and Mohammadi, M.Q. The Integration of Artificial Intelligence in Project Management: A Systematic Literature Review of Emerging Trends and Challenges. *TIERS Information Technology Journal*, 5 (2), 153–164 (Dec. 2024). [https://doi.org/ 10.38043/tiers.v5i2.5963](https://doi.org/10.38043/tiers.v5i2.5963).
- 21 Taboada, I., Daneshpajouh, A., Toledo, N., and de Vass, T. Artificial Intelligence Enabled Project Management: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 13 (8), 5014 (Apr. 2023). [https://doi.org/ 10.3390/app13085014](https://doi.org/10.3390/app13085014).
- 22 Bento, S., Pereira, L., Gonçalves, R., Dias, Á., and da Costa, R.L. Artificial intelligence in project management: systematic literature review. *International Journal of Technology Intelligence and Planning*, 13 (2), 143 (2022). [https://doi.org/ 10.1504/IJTIP.2022.126841](https://doi.org/10.1504/IJTIP.2022.126841).
- 23 Rogers, G., Szomszor, M., and Adams, J. Sample size in bibliometric analysis. *Scientometrics*, 125 (1), 777–794 (Oct. 2020). [https://doi.org/ 10.1007/s11192-020-03647-7](https://doi.org/10.1007/s11192-020-03647-7).
- 24 Vergara, D., del Bosque, A., Lampropoulos, G., and Fernández-Arias, P. Trends and Applications of Artificial Intelligence in Project Management. *Electronics (Basel)*, 14 (4), 800 (2025). [https://doi.org/ 10.3390/electronics14040800](https://doi.org/10.3390/electronics14040800).

¹Калидуллин Б.Р.,

магистр, ORCID ID: 0009-0009-4053-9952,

e-mail: kalidullin.b@gmail.com

^{2*}Самойлов А.А.,

докторант, ORCID ID: 0009-0006-0548-4982,

*e-mail: an_samoilov@kbtu.kz

³Де Марко А.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-4145-2287,

e-mail: alberto.demarco@polito.it

¹«НГУ жобалау ұйымы» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан²Жетілдірілген зерттеулер және тұрақты даму институты, Алматы қ., Қазақстан³Турин политехникалық университеті, Турин қ., Италия

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТТІ ЖОБА БАСҚАРУДА ҚОЛДАНУ: ТЕНДЕНЦИЯЛАР, ҚИЫНДЫҚТАР ЖӘНЕ БОЛАШАҚ

Аңдатпа

Жобаны тиімді жоспарлау және жүзеге асыру дәстүрлі әдістердің орнына жаңа тәсілдер мен технологияларды енгізуді талап етеді. Жасанды интеллект (ЖИ) негізіндегі құралдар жоба ресурстарын тиімді бөлуге және оны табысты орындауға мүмкіндік береді. Бұл зерттеу жобаны басқаруда (ЖБ) ЖИ енгізудің рөлін қарастырады. Библиометриялық талдау VOSviewer және CiteSpace бағдарламалық құралдарының көмегімен жүзеге асырылды. Зерттеу Web of Science деректер базасындағы 2010–2025 жж. аралығында жарияланған ғылыми мақалаларды қамтыды. Нәтижелер РМ саласында ЖИ қолдану тақырыбы бойынша жарияланымдар санының айтарлықтай артқанын көрсетті. ЖИ құралдары ресурстарды оңтайландыру, тәуекелдерді болжау және шығындарды бағалау үшін жиі пайдаланылады. Түйінді сөздерге жасалған талдау машиналық оқыту, үлкен деректер және нейрондық желілер салаларының маңыздылығының артып келе жатқанын айқындады. Сонымен қатар, зерттеу ЖБ-да ЖИ құралдарын пайдаланудың негізгі артықшылықтары мен қиындықтарын көрсетіп, ғылыми қоғамдастықтың бұл тақырыпқа деген қызығушылығының арта түскенін дәлелдейді.

Тірек сөздер: жасанды интеллект (ЖИ), библиометриялық талдау, жобаны басқару (ЖБ), VOSviewer, CiteSpace.

¹Калидуллин Б.Р.,

магистр, ORCID ID: 0009-0009-4053-9952,

e-mail: kalidullin.b@gmail.com

^{1,2*}Самойлов А.А.,

докторант PhD, ORCID ID: 0009-0006-0548-4982,

*e-mail: an_samoilov@kbtu.kz

³Де Марко А.,

PhD, профессор, ORCID ID: 0000-0002-4145-2287,

e-mail: alberto.demarco@polito.it

¹ТОО «Проектная организация НГУ», г. Алматы, Қазақстан²Институт перспективных исследований и устойчивого развития, г. Алматы, Казахстан³Политехнический университет Турина, г. Турин, Италия

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ ПРОЕКТАМИ: ТЕНДЕНЦИИ, ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация

Эффективное планирование и реализация проектов требуют внедрения новых методов и технологий вместо традиционных. Инструменты на основе искусственного интеллекта (ИИ) позволяют более эффек-

тивно распределять ресурсы проекта и выполнять его более эффективно. В данном исследовании изучается роль внедрения ИИ в управление проектами (УП). Библиометрический анализ проводится с использованием программных инструментов VOSviewer и CiteSpace. В ходе исследования были проанализированы научные статьи, опубликованные в период с 2010 по 2025 гг., с использованием базы данных Web of Science. Результаты исследования показали значительный рост числа публикаций на тему использования ИИ в УП. Инструменты ИИ часто используются для оптимизации ресурсов, прогнозирования рисков и оценки затрат в УП. Анализ ключевых слов показал растущую важность таких областей, как машинное обучение, большие данные и нейронные сети. В исследовании также освещаются основные преимущества и проблемы использования инструментов ИИ в УП, а также растущий интерес научного сообщества к этой теме.

Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), библиометрический анализ, управление проектами (УП), VOSviewer, Citespace.

Article submission date: 10.09.2025

REQUIREMENTS TO THE DESIGN OF ARTICLES PUBLISHED IN THE JOURNAL KBTU BULLETIN

Previously **unpublished material by the author (s)** corresponding to the profile of the journal in Russian, Kazakh or English is accepted for publication. The article is provided in electronic format (in formats .doc, .docx,) only by downloading it through the functionality of the journal's website (<https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/about>), which has detailed instructions for authors on the process of submitting articles, as well as on payment for publication.

Mandatory requirements for registration:

- ♦ The MRNTI index is placed in the upper-left corner. (Times New Roman 14 size)
- ♦ One single interval below the authors' surnames and initials in bold. Detailed names of organizations, cities, countries where the work was performed, e-mail of one of the authors. Specify footnotes to the place of work of the authors.
- ♦ Below, in one interval, the full title of the article is in bold.
- ♦ Below, a brief (150–250 words) abstract (abstract) at one interval. Abstract should outline the general orientation of the article and formulate its main results and be self-sufficient, it should not contain references to literary sources or to any sections and elements of the article to which it relates.
- ♦ Key words related to the submitted article.

The text of the article is typed in a straight font Times New Roman, size 14. The line spacing is single. All fields are 2 cm long.

The article should be divided into sections: Introduction, Materials and Methods, Results and Discussion, Conclusion, Information on funding (if available).

At the end, a "List of References" is given. Literary references in the text are in square brackets [1]. The list of references is drawn up twice: according to the above GOST. The list should fully correspond to the main text of the article, contain all the works mentioned (and only mentioned) in it. Next, the same list of references should be presented in the generally accepted English transliteration (see the sample of the literature design below).

The article undergoes "blind" review, reviewers are appointed by the editorial board of the journal.

At the end of the article please indicate full name, return address, phone numbers, fax, e-mail address.

The author(s) are responsible for the content of the article. The opinion of the Scientific and Editorial Board does not always coincide with the opinion of the author (authors). The Editorial Board reserves the right to publish or reject articles.

The reference to our edition in reprinting is obligatory.

Our address: **59, Tole Bi St., Almaty, 050000, Kazakhstan-British Technical University.**

Website: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/pages/view/EditorialC> Editorial Board.

ЖУРНАЛЫНДА ЖАРИЯЛАНАТЫН МАҚАЛАЛАРДЫ РӘСІМДЕУГЕ ҚОЙЫЛАТЫН ТАЛАПТАР

Жариялау үшін **автормен (авторлармен) бұрын жарияланбаған**, журнал бейініне сәйкес келетін орыс, қазақ немесе ағылшын тілдеріндегі материалдар қабылданады. Мақала журнал сайтының (<https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/about>) функционалдығы арқылы жүктеу жолымен тек электронды форматта (.doc, .docx форматтарында) қабылданады, сайтта авторларға мақаланы жүктеу, ұсыну үрдісі туралы, сондай-ақ жарияланымға ақы төлеу туралы толық нұсқаулық бар.

Ресімдеу бойынша міндетті талаптар:

Жоғарғы сол жақ бұрышта FTAMI индексі жазылады. (Times New Roman 14 өлшем)

- ♦ Бір бірлік интервалдан кейін авторлардың тегі мен аты-жөні жартылай қалың қаріппен жазылады. Жұмыс орындалған ұйымдардың, қалалардың, елдердің толық атаулары, авторлардың бірінің e-mail поштасы көрсетіледі. Авторлардың жұмыс орнына сілтеме беріледі.

- ♦ Бір интервалдан кейін мақаланың толық атауы жартылай қалың қаріппен жазылады.

- ♦ Бір интервалдан кейін қысқаша (150–250 сөз) аңдатпа (abstract) ұсынылады. Аңдатпа мақаланың жалпы бағытын көрсетіп, оның негізгі нәтижелерін тұжырымдауы тиіс, аңдатпада әдеби дереккөздерге де, оған қатысты мақаланың кез-келген бөлімдері мен элементтеріне сілтеме жасауға болмайды.

- ♦ Ұсынылған мақалаға қатысты кілт сөздер (тірек сөздер) жазылады.

Мақала мәтіні 14 өлшемді Times New Roman шрифтімен теріледі. Жолдар арасында бірлік интервал сақталады. Шеттер – барлық жағынан 2 см.

Мақала келесі бөлімдерді қамтуы тиіс: Кіріспе, Материалдар және әдістер, Нәтижелер мен талқылау, Қорытынды, Қаржыландыру туралы ақпарат (болған жағдайда көрсетіледі).

Соңында «Әдебиеттер тізімі (References)» жазылады. Мәтіндегі әдеби сілтемелер төртбұрышты жақшада ұсынылады [1]. Әдебиеттер тізімі MEMCT-ке сәйкес екі рет рәсімделеді. Тізім мақаланың негізгі мәтініне толық сәйкес келіп, мақалада аталған (тек аталған) барлық жұмыстарды қамтуы керек. Әрі қарай, дәл осы сілтемелер жалпы қабылданған ағылшын транслитерациясында жазылады.

Мақала «жасырын» рецензиялаудан өтеді, рецензенттерді журналдың редакциялық алқасы тағайындайды.

Мақаланың соңында авторлардың толық аты-жөнін, кері байланыс мекенжайын, телефондар, факс және электрондық пошта мекенжайын (e-mail) жазуыңызды сұраймыз.

Мақаланың мазмұнына автор (авторлар) жауапты. Ғылыми-редакция алқасының пікірі әрдайым автордың (авторлардың) пікірімен сәйкес келе бермейді. Редакция алқасы мақалаларды жариялау немесе қабылдамау құқығын өзіне қалдырады.

Қайта басылым кезінде біздің жарияланымға сілтеме жасау керек.

Мекенжайымыз: **050000, Алматы қ., Төле би көш., 59, Қазақстан-Британ техникалық университеті.**

Сайт: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/pages/view/EditorialC> Редакция алқасы.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ, ПУБЛИКУЕМЫХ В ЖУРНАЛЕ ВЕСТНИК КБТУ

Для публикации принимается **ранее неопубликованный автором (авторами) материал**, соответствующий профилю журнала, на русском, казахском или английском языках. Статья предоставляется в электронном формате (в форматах .doc, .docx,) только путем ее загрузки через функционал сайта журнала (<https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/about>), в котором имеется подробная инструкция для авторов о процессе подачи статей, а также об оплате публикации.

Обязательные требования по оформлению:

- ♦ В левом верхнем углу ставится индекс МРНТИ (Times New Roman 14 размер).
- ♦ Через один одинарный интервал ниже фамилии и инициалы авторов полужирным шрифтом. Развернутые названия организаций, городов, стран, где выполнена работа, e-mail одного из авторов. Указать сноски на место работы авторов.
- ♦ Ниже через один интервал полное название статьи полужирным шрифтом.
- ♦ Ниже через один интервал краткая (150–250 слов) аннотация (abstract). Аннотация должна обрисовывать общую направленность статьи, формулировать ее основные результаты и быть самодостаточной, в ней недопустимы ссылки ни на литературные источники, ни на какие-либо разделы и элементы статьи, к которой она относится.
- ♦ Ключевые слова (Key words), относящиеся к представляемой статье.

Текст статьи набирается прямым шрифтом Times New Roman, размер 14. Интервал между строками одинарный. Поля все по 2 см.

Статья должна быть разделена на разделы: Введение, Материалы и методы, Результаты и обсуждение, Заключение, Информация о финансировании (при наличии).

В конце дается «Список литературы (References)». Литературные ссылки в тексте в квадратных скобках [1]. Список литературы оформляется дважды: согласно ГОСТу. Список должен полностью соответствовать основному тексту статьи, содержать все упомянутые (и только упомянутые) в нем работы. Далее тот же список литературы представить в общепринятой английской транслитерации.

Статья проходит «слепое» рецензирование, рецензенты назначаются редколлегией журнала.

В конце статьи просим указать Ф.И.О. полностью, обратный адрес, телефоны, факс, адрес электронной почты (e-mail).

Ответственность за содержание статьи несет автор (авторы). Мнение Научно-редакционного совета не всегда совпадает с мнением автора (авторов). Редакционный совет оставляет за собой право публикации или отклонения статей.

Ссылка на наше издание при перепечатке обязательна.

Наш адрес: **050000, г. Алматы, ул. Толе Би, 59, Казахстанско-Британский технический университет.**

Сайт: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/pages/view/EditorialC> Редакционная коллегия.

ҚАЗАҚСТАН-БРИТАН ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ
HERALD
OF THE KAZAKH-BRITISH TECHNICAL UNIVERSITY
ВЕСТНИК
КАЗАХСТАНСКО-БРИТАНСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Ответственный за выпуск
Алагузов Рашид Жуманович

Редакторы
Кабылдаева Толганай Кайсаровна,
Скуратова Ирина Михайловна

Компьютерная верстка
Жуйкова Майя Антоновна

Подписано в печать 15.09.2025 г.
Тираж 300 экз. Формат 60x84 1/16.
Бумага тип. Усл.печ.л. 51,0 Уч.-изд.л. 53,0
Заказ № 34

Редакция журнала «Вестник КБТУ» не несет ответственность за содержание публикуемых статей. Содержания статей целиком принадлежат авторам, и размещаются в журнале исключительно под их ответственность.

Издание Казахстанско-Британского технического университета
Издательский центр КБТУ, Алматы, ул. Толе би, 59

ДЛЯ ЗАМЕТОК
