MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

KAZAKHSTAN

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

INTERNATIONAL UNIVERSITY SINCE 2009

МЕЖДУНАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Published since 2020.
Volume 7. 3 (27). 2026
July–September

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ АҚПАРАТТЫҚ ЖӘНЕ КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖУРНАЛЫ

2020 жылдан бері шығарылады
Том 7. 3 (27). 2026
Шілде-Қыркүйек

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ИНФОРМАЦИОННЫХ И КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Издается с 2020 г.
Том 7. 3 (27). 2026
Июль-Сентябрь

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан № KZ82VPY00020475, выданное от 20.02.2020 г.

Зарегистрировано в Международном центре регистрации серийных изданий ISSN (ЮНЕСКО, Париж, Франция). ISSN 2708–2032 (print), ISSN 2708–2040 (online)

Журнал входит в Перечень научных изданий, рекомендуемых КОКНВО МНВО РК для публикации основных результатов научной деятельности.

EDITOR-IN-CHIEF:
Kateryna Kolesnikova — Doctor of Technical Sciences, professor, Vice-Rector for Research, International Information Technology University (Kazakhstan)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:
Madina Ipalakova — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Director of the Research Department, International Information Technology University (Kazakhstan)

EDITORIAL BOARD:
Abdul Razak — PhD, professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)
Lucio Tommaso De Paolis — Director of the R&D Department of the AVR Laboratory, Department of Engineering for Innovation, University of Salento (Italy)
Liz Bacon — Professor, Deputy Vice-Chancellor, Abertay University (United Kingdom)
Michele Pagano — PhD, Professor, University of Pisa (Italy)
Mukhtarbay Otelbayev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, professor of the Department of Mathematical and Computer Modeling, International Information Technology University (Kazakhstan)
Bolatbek Rysbaiuly — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of the Department of Computing and Data Science, Astana IT University (Kazakhstan)
Yevgeniya Daineko — PhD, research professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)
Nurzhan Duzbayev — PhD, associate professor, Vice-Rector for Digitalization and Innovation, International Information Technology University (Kazakhstan)
Bakhtgerei Sinchev — Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)
Nurgul Seilova — Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Computer Technologies and Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)
Ardak Mukhamediyeva — Candidate of Economic Sciences, Dean of the Faculty of Business, Media and Management, International Information Technology University (Kazakhstan)
Zamira Abdikalikova — PhD, associate professor, Head of the Department of Mathematical and Computer Modeling, International Information Technology University (Kazakhstan)
Yerlan Shildibekov — PhD, associate professor, Head of the Department of Economics and Business, International Information Technology University (Kazakhstan)
Damilya Yeskendirova — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Head of the Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)
Aigul Niyazgulova — Candidate of Philological Sciences, Professor, Head of the Department of Media Communications and History of Kazakhstan, International Information Technology University (Kazakhstan)
Altai Aitmagambetov — Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, International Information Technology University (Kazakhstan)
Yelena Bakhtiyarova — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Head of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, International Information Technology University (Kazakhstan)
Kanibek Sansyzbay — PhD, research professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)
Sakhybay Tynymbayev — Candidate of Technical Sciences, Professor, Research Professor, Department of Computer Engineering, International Information Technology University (Kazakhstan)
Ali Abd Almisreb — PhD, associate professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)
Mohamed Ahmed Hamada — PhD, associate professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)
Yang Im Chu — PhD, Professor, Gachon University (South Korea)
Tadeusz Wallas — PhD, Vice-Rector, Adam Mickiewicz University (Poland)
Orken Mamyrbayev — PhD, Deputy Director for Science, RSE Institute of Information and Computational Technologies, Committee for Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Kazakhstan)
Sergey Bushuyev — Doctor of Technical Sciences, professor, Director of the Ukrainian Project Management Association “UKRNET,” Head of the Department of Project Management, Kyiv National University of Construction and Architecture (Ukraine)
Svetlana Beloshitskaya — Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Computing and Data Science, Astana IT University (Kazakhstan)

MANAGING EDITOR
Raushan Mrzabayeva — Master of Science, editor, International Information Technology University (Kazakhstan)

International Journal of Information and Communication Technologies
Periodicity: 4 times a year.
Languages: Kazakh, Russian, English
DOI prefix: 10.54309
ISSN 2708–2032 (print)
ISSN 2708–2040 (online)
Thematic focus: "Information technology"; "Digital technologies in the development of socio-economic systems"; "Information security and communication technologies".
Distribution: Materials are distributed under the Creative Commons Attribution 4.0
Journal website: https://journal.iitu.edu.kz
Owner: International Information Technology University JSC (Almaty).
Copyright: © International Journal of Information and Communication Technologies, 2026

РЕДАКЦИЯ

БАС РЕДАКТОР:

Колесникова Катерина Викторовна — техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің ғылыми-зерттеу қызметі жөніндегі проректор (Қазақстан)

БАС РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЫ:

Ипалакова Мадина Тулегеновна — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің ғылыми-зерттеу қызметі жөніндегі департамент директоры (Қазақстан)

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА:

Разак Абдул — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының профессоры (Қазақстан)

Лучио Томмазо де Паолис — Саленто Университеті (Италия) инновация және технологиялық инжиниринг департаменті AVR зертханасының зерттеу және әзірлеу бөлімінің директоры

Лиз Бэкон — профессор, Абертей Университеті (Ұлыбритания) вице-канцлерінің орынбасары

Микеле Пагано — PhD, Пиза Университетінің (Италия) профессоры

Өтелбаев Мухтарбай Өтелбайұлы — физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті математика және компьютерлік модельдеу кафедрасының профессоры (Қазақстан)

Рысбайулы Болатбек — физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Есептеу және деректер ғылымдары департаментінің профессоры, Astana IT University (Казахстан)

Дайнеко Евгения Александровна — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

Дузбаев Нуржан Токкужаевич — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті цифрландыру және инновациялар жөніндегі проректор (Қазақстан)

Синчев Бахтгерей Куспанович — техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының профессоры (Қазақстан)

Сейлова Нургуль Абадуллаевна — техника ғылымдарының докторы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті компьютерлік технологиялар және киберқауіпсіздік факультетінің деканы (Қазақстан)

Мухамедиева Ардак Габитовна — экономика ғылымдарының кандидаты, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті бизнеса медиа және басқару факультетінің деканы (Қазақстан)

Абдикаликова Замира Турсынбаевна — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті математика және компьютерлік модельдеу кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Шильдибеков Ерлан Жаржанович — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті экономика және бизнес кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Дамеля Максутовна Ескендирова — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Ниязгулова Айгуль Аскарбековна — филология ғылымдарының кандидаты, доцент, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті медиакоммуникация және Қазақстан тарихы кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Айтмагамбетов Алтай Зуфарович — техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының профессоры (Қазақстан)

Бахтиярова Елена Ажибековна — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Канибек Сансызбай — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

Тынымбаев Сахибай — техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті компьютерлік инженерия кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

Алмисреб Али Абд — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қазақстан)

Мохамед Ахмед Хамада — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қазақстан)

Янг Им Чу — PhD, Гачон университетінің профессоры (Оңтүстік Корея)

Тадеуш Валлас – PhD, Адам Мицкевич атындағы (Польша) университеттің проректоры

Мамырбаев Оркен Жумажанович — PhD, ҚР ҒЖБМ Ғылым комитеті ақпараттық және есептеу технологиялары институты ӨМК директорының ғылым жөніндегі орынбасары (Қазақстан)

Бушуев Сергей Дмитриевич — техника ғылымдарының докторы, профессор, Украинаның "УКРНЕТ" жобаларды басқару қауымдастығының директоры, Киев ұлттық құрылыс және сәулет университеті жобаларды басқару кафедрасының меңгерушісі (Украина)

Белощицкая Светлана Васильевна — техника ғылымдарының докторы, доцент, Astana IT University есептеу және деректер ғылымы кафедрасының профессоры (Қазақстан)

ЖАУАПТЫ РЕДАКТОР:

Мрзабаева Раушан Жалиевна — магистр, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің редакторы (Қазақстан)

Халықаралық ақпараттық және коммуникациялық технологиялар журналы
ISSN 2708–2032 (print)
ISSN 2708–2040 (online)
Префикс DOI: 10.54309
Мерзімділігі: жылына 4 рет.
Басылым тілі: қазақ, орыс, ағылшын.
Тақырып бағыты: "Ақпараттық технологиялар"; "Ақпараттық қауіпсіздік және коммуникациялық технологиялар"; "Әлеуметтік-экономикалық жүйелерді дамытудағы цифрлық технология".
Журнал сайты: https://journal.iitu.edu.kz
Тарату: материалдар Creative Commons Attribution 4.0 лицензиясы бойынша таратылады
Меншік иесі: АҚ «Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» (Алматы қ.).
Авторлық құқық: © Халықаралық ақпараттық және коммуникациялық технологиялар журналы, 2026

РЕДАКЦИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Колесникова Катерина Викторовна — доктор технических наук, профессор, проректор по научно-исследовательской деятельности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Ипалакова Мадина Тулегеновна — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, директор департамента по научно-исследовательской деятельности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Разак Абдул — PhD, профессор кафедры кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Лучио Томмазо де Паолис — директор отдела исследований и разработок лаборатории AVR департамента инноваций и технологического инжиниринга Университета Саленто (Италия)

Лиз Бэкон — профессор, заместитель вице-канцлера Университета Абертей (Великобритания)

Микеле Пагано — PhD, профессор Университета Пизы (Италия)

Отелбаев Мухтарбай Отелбайулы — доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, профессор кафедры математического и компьютерного моделирования Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Рысбайулы Болатбек — доктор физико-математических наук, профессор, профессор Astana IT University (Казахстан)

Дайнеко Евгения Александровна — PhD, профессор-исследователь кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Дузбаев Нуржан Токкужаевич — PhD, ассоциированный профессор, проректор по цифровизации и инновациям Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Синчев Бахтгерей Куспанович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Сейлова Нургуль Абадуллаевна — кандидат технических наук, декан факультета компьютерных технологий и кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Мухамедиева Ардак Габитовна — кандидат экономических наук, декан факультета бизнеса медиа и управления Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Абдикаликова Замира Турсынбаевна — PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой математического и компьютерного моделирования Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Шильдибеков Ерлан Жаржанович — PhD, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой экономики и бизнеса Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Дамеля Максутовна Ескендирова — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Ниязгулова Айгуль Аскарбековна — кандидат филологических наук, доцент, профессор, заведующая кафедрой медиакоммуникаций и истории Казахстана Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Айтмагамбетов Алтай Зуфарович — кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехники, электроники и телекоммуникаций Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Бахтиярова Елена Ажибековна — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой радиотехники, электроники и телекоммуникаций Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Канибек Сансызбай – PhD, ассоциированный профессор, профессор-исследователь кафедры кибербезопасности, Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Тынымбаев Сахибай – кандидат технических наук, профессор, профессор-исследователь кафедры компьютерной инженерии, Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Алмисреб Али Абд — PhD, ассоциированный профессор кафедры кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Мохамед Ахмед Хамада — PhD, ассоциированный профессор кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Янг Им Чу — PhD, профессор университета Гачон (Южная Корея)

Тадеуш Валлас – PhD, проректор университета имен Адама Мицкевича (Польша)

Мамырбаев Оркен Жумажанович — PhD, заместитель директора по науке РГП Института информационных и вычислительных технологий Комитета науки МНВО РК (Казахстан)

Бушуев Сергей Дмитриевич — доктор технических наук, профессор, директор Украинской ассоциации управления проектами «УКРНЕТ», заведующий кафедрой управления проектами Киевского национального университета строительства и архитектуры (Украина)

Белощицкая Светлана Васильевна — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислений и науки о данных Astana IT University (Казахстан)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР:

Мрзабаева Раушан Жалиевна — магистр, редактор Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Международный журнал информационных и коммуникационных технологий
ISSN 2708–2032 (print)
ISSN 2708–2040 (online)
Префикс DOI: 10.54309
Периодичность: 4 выпусков в год.
Язык издания: казахский, русский, английский.
Тематическая направленность: "Информационные технологии"; "Информационная безопасность и коммуникационные технологии"; "Цифровые технологии в развитии социо-экономических систем".
Сайт журнала: https://journal.iitu.edu.kz
Распространение: материалы распространяются по лицензии Creative Commons Attribution 4.0
Собственник: АО «Международный университет информационных технологий» (г. Алматы).
Авторские права: © Международный журнал информационных и коммуникационных технологий, 2026

CONTENTS

DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

A Adalbek, S.Ye. Kerimkhulle, K.D. Kuliev, O. Mekesh, Zh.Zh. Khamitova
DEVELOPMENT OF RESULT-ORIENTED DATA SMOOTHING MODELS AND ANALYSIS OF THEIR EFFECTIVENESS 11
A.T. Iskakova, G.E. Kurmankulova, K. Gromaszek, K.O. Togzhanova, R.S. Algozhayeva
APPLICATION OF MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING FOR PREDICTIVE PLANNING AND RESOURCE EFFICIENCY IN PRODUCTION SYSTEMS 30
A.B. Kassymova, R.K. Uskenbayeva, Zh.A. Sydykov, D. Omirzak, S. Kalibekov
ARCHITECTURE OF AN INTELLIGENT CHATBOT FOR SMART CITY: AI-BASED RECEIVING, ANALYSIS AND ROUTING OF CITIZEN REQUESTS 46
O.M. Olzhayev, B.S. Omarov, A. Suliman
YOLO-CBAM: A LIGHTWEIGHT NEURAL NETWORK MODEL WITH INTEGRATED ATTENTION MECHANISM FOR ROAD DAMAGE ANALYSIS 66
K. Yermagambetova, A. Sarsekeyeva, Y. Akhlassov
OVERCOMING FRAGMENTATION IN THE CLASSIFICATION OF DIGITAL CULTURAL HERITAGE: AN INTEGRATIVE MULTIDIMENSIONAL MODEL 78

INFORMATION TECHNOLOGY

D. Abzhanova, S. Sharipova
ARCHITECTURE AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF A DIGITAL PLATFORM FOR MONITORING AND DATA EXCHANGE ON TRANSBOUNDARY WATER RESOURCES IN THE ZHAMBYL REGION 101
A. Aitanuly, O.A. Ussatova
ENHANCING TWO-FACTOR AUTHENTICATION FOR CLOUD HEALTHCARE SECURITY: THE ROLE OF DEEP LEARNING 122
O. Alseitov, O. Kuchanskyi
PHYSICS-INFORMED HYBRID LEARNING FOR HOURLY POWER-PLANT EMISSIONS: A MULTI-POLLUTANT BENCHMARK WITH UNCERTAINTY AND TRANSFER 141
A.M. Akhmetova, D.O. Baizhanova, Zh.N. Alisheva, B.A. Shaimov
ADAPTIVE OUTPUT ROUTER FOR NATURAL LANGUAGE MODELS CONSIDERING KEY PERFORMANCE INDICATORS 160
A.K. Aitim
AUTOMATIC AND SEMI-AUTOMATIC ANNOTATION OF KAZAKH TEXT CORPORA 180
Z.E. Balabayev, S.V. Biloshchytska
HANDWRITTEN TEXT RECOGNITION FOR CHAGATAI MANUSCRIPTS: COMPARING CRNN TRAINING FROM SCRATCH AND TRANSFORMER-BASED TRANSFER LEARNING 198
D.B. Baumuratova, T.K. Zhukabayeva, K.A. Abdrakhmanov, Z. Ahmad, A.A. Seitov
A NEURO-DIGITAL LEARNING MODEL FOR AI DRIVEN DIGITAL TRANSFORMATION IN HIGHER EDUCATION 219
T. Daoyun, G.A. Amirkhanova, Fu Yanwei, Y. Faruzkyzy
MULTIMODAL SEMANTIC MANIPULATION IN FAKE VIDEOS AND ITS INFLUENCE MECHANISM ON USERS' PERCEIVED TRUST 241
Zh. Doumchariyev, J. Tussupov, A. Akynbekova, M. Khassanova, M. Kassim
ENSEMBLE AND HYBRID LEARNING FOR DIGITAL TWIN MILK CLASSIFICATION 258
K.Z. Igibayev, A.Kh. Kozbakova, O. Auelbekov , T. Merembayev, K. Yessentayev
STUDY OF A DYNAMIC MIXING DEVICE IN A BIOREACTOR USING IOT TECHNOLOGIES 279
A.N. Ismukanova, G. Kochshanova, D.V. Pleskachev, Zh. Sarsenbayeva, P. Schmidt
AUTOMATED CLASSIFICATION OF SCIENTIFIC DATA USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A COMPARATIVE ANALYSIS OF TRANSFORMER ARCHITECTURES AND HYBRID APPROACHES 306
T. Zh. Kamalov, Ali Abd. Almisreb, Mohammed A. Saleh
INVESTIGATION OF HYBRID QUANTUM-CLASSICAL ALGORITHMS FOR MACHINE LEARNING 323
B. Karimkyzy, K.G. Karasenko, N.A. Alisherov, N.M. Muratbek, A. Karim

KEY PUBLICATIONS OF 2021–2025 ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS IN THE MANUFACTURING AND DIAGNOSTICS OF MEDICAL DEVICES FOR GLYCEMIC MONITORING: A THEMATIC ANALYTICAL REVIEW 338
S.K. Kumyzbaeva, K.E. Baglanbaev, K.S. Sarkyt, M.Zh. Konyrova
THREE-PHASE TRAINING OF INTELLIGENT ENERGY MANAGEMENT FOR A HYBRID ENERGY SYSTEM WITH A CLIMATE-AWARE STATE REPRESENTATION 357
N.E. Karabayev, S.K. Serikbayeva, E. Benkhelif, B. Tassuov
RESEARCH ON THE ROBUSTNESS OF ENSEMBLE MACHINE LEARNING MODELS TO ADVERSARIAL ATTACKS IN INTRUSION DETECTION SYSTEMS FOR IOT NETWORKS 369
M. Nurtas, G. Kapyshev
A METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR THE PREPROCESSING AND INTEGRATION OF GEOSPATIAL AND GEOPHYSICAL DATA FOR MINERAL PROSPECTIVITY PREDICTION USING MACHINE LEARNING 392
A. Neftissov, A. Biloshchytskyi, I. Kazambayev, A. Medetkhan, L. Kirichenko
ENERGY EFFICIENT MICROCLIMATE STABILIZATION FOR SEALED ARCHIVAL STORAGE ENCLOSURES 405
A.Zh. Omurtayeva, U.T. Makhazhanova, A.K. Adilova, Sh.K. Yelezhanova, J. Kultan
AN ADAPTIVE NEURAL-FUZZY MODEL FOR ASSESSING INVESTMENT RISKS IN THE AGRI-INDUSTRIAL COMPLEX: ODERNISATION OF THE DECISION-SUPPORT ARCHITECTURE THROUGH THE INTEGRATION OF MACHINE LEARNING 421
N. Shazhdekeyeva, A. Mukhanbetkaliyeva, A. Abdigaliyeva, A. Zhanekeshova, L. Nurgaliyeva
COMPARATIVE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF COLLABORATIVE FILTERING IN THE DEVELOPMENT OF A MOVIE RECOMMENDER SYSTEM 445
S. Sharmukhanbet, G. Turmukhanova, O. Findik, V. Makhatova, M. Rakhmetov
AN INTELLIGENT PIPELINE DEFECT DETECTION SYSTEM USING AN IN-PIPE ROBOT 461

INFORMATION SECURITY AND COMMUNICATIONTECHNOLOGIES

S.Z. Daruish, A.U. Utegenova, A.U. Kalizhanova, Zh.Zh. Zhumabekova
MACHINE LEARNING FOR POLLUTION CLASSIFICATION IN ROCKET BOOSTER IMPACT AREAS 480
S.N. Issabayeva, A.K. Rysbayeva, Zh.B. Ibrayeva, N.R. Mussabekov, N.Sh. Akimzhan
MACHINE LEARNING-BASED CYBERATTACK DETECTION IN OT-NETWORKS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF NETWORK ANOMALY CLASSIFICATION METHODS 495
G. Shangytbayeva, A.N. Amanov, M.K. Issenova, G.E. Berikkhanova, K.O. Shakerkhan
INFORMATION SECURITY IN GOVERNMENT CLOUD SERVICES: RISK ASSESSMENT AND PROTECTION STRATEGIES 512
Ye. N. Tursynbek, N. Albanbay, D. Djenouri
OPTIMISATION OF COMMUNICATION COSTS IN TWO-TIER FEDERATED LEARNING FOR CYBERATTACK DETECTION IN IOT NETWORKS 529
A. Tastemirov, S.B. Mukhanov, S.T. Amanzholova, B. Aldosh
A COMPARATIVE EVALUATION OF MACHINE LEARNING MODELS FOR ACTIVE DIRECTORY THREAT DETECTION: FEATURE-LEAKAGE CONTROL AND CROSS-SCENARIO VALIDATION ON WINDOWS SECURITY EVENT LOGS 545

МАЗМҰНЫ
ӘЛЕУМЕТТІК-ЭКОНОМИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ ДАМЫТУДАҒЫ ЦИФРЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

А Адалбек, С.Е. Керімқұл, К.Д. Кулиев, О. Мекеш, Ж.Ж. Хамитова
ДЕРЕКТЕРДІҢ НӘТИЖЕ БАҒДАРЛАНҒАН ТЕГІСТЕУ МОДЕЛЬДЕРІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТИІМДІЛІГІН ТАЛДАУ 11
А.Т. Искакова, Г.Е. Курманкулова, Конрад Громашек, К.О. Тогжанова, Р.С. Алгожаева
ӨНДІРІС ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ БОЛЖАМДЫ ЖОСПАРЛАУ ЖӘНЕ РЕСУРСТАРДЫ ҮНЕМДЕУ ҮШІН МАШИНАЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕРЕҢ ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАНУ 30
А.Б. Касымова, Р.К. Ускенбаева, Ж.А. Сыдыков, Д. Өмірзақ, С. Калибеков
SMART CITY ҮШІН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЧАТ-БОТ АРХИТЕКТУРАСЫ: АЗАМАТТАРДЫҢ

ӨТІНІШТЕРІН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ ҚАБЫЛДАУ, ТАЛДАУ ЖӘНЕ БАҒЫТТАУ 46
О.М. Олжаев, Б.С. Омаров, A.Suliman
YOLO-CBAM: ЖОЛДЫҢ ЗАҚЫМДАНУЫН ТАЛДАУҒА АРНАЛҒАН ИНТЕГРАЦИЯЛАНҒАН ЗЕЙІН МЕХАНИЗМІ БАР ЖЕҢІЛ САЛМАҚТЫ НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІ МОДЕЛІ 66
К. Ермагамбетова, А. Сарсекеева, Е. Ахласов
ЦИФРЛЫҚ МӘДЕНИ МҰРАНЫ ЖІКТЕУДЕГІ ФРАГМЕНТАЦИЯНЫ ЕҢСЕРУ: ИНТЕГРАТИВТІ КӨПӨЛШЕМДІ МОДЕЛЬ 78

АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

Д.Е. Абжанова, С.Е. Шарипова
ЖАМБЫЛ ӨҢІРІНІҢ ТРАНСШЕКАРАЛЫҚ СУ РЕСУРСТАРЫН МОНИТОРИНГТЕУ ЖӘНЕ ДЕРЕКТЕР АЛМАСУҒА АРНАЛҒАН ЦИФРЛЫҚ ПЛАТФОРМАНЫҢ АРХИТЕКТУРАСЫ МЕН ПРАКТИКАЛЫҚ ІСКЕ АСЫРЫЛУЫ 101
А.Айтанұлы, О.А. Усатова
БҰЛТТЫ МЕДИЦИНАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДЕ ЕКІ ФАКТОРЛЫ АУТЕНТИФИКАЦИЯНЫ ЖАҚСАРТУ: ТЕРЕҢ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІНІҢ ҚОЛДАНУ МҮМКІНДІКТЕРІ 122
О. Альсеитов, О. Кучанский
ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ САҒАТТЫҚ ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫН ФИЗИКАЛЫҚ ЗАҢДЫЛЫҚТАРДЫ ЕСКЕРЕТІН ГИБРИДТІ ОҚЫТУ: БЕЛГІСІЗДІК ПЕН ТАСЫМАЛДАУДЫ ЕСКЕРЕТІН КӨПЛАСТАУЫШТЫ БЕНЧМАРК 141
А.М. Ахметова, Д.О. Байжанова, Ж.Н. Алишева, Б.А. Шаймов
КРІ КӨРСЕТКІШТЕРІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП, ТАБИҒИ ТІЛ МОДЕЛЬДЕРІНЕ АРНАЛҒАН ШЫҒЫС МАРШРУТТАУЫНЫҢ АДАПТИВТІ ЖҮЙЕСІ 160
Ә.Қ. Әйтім
ҚАЗАҚ МӘТІНДІК КОРПУСТАРЫН АВТОМАТТЫ ЖӘНЕ ЖАРТЫЛАЙ АВТОМАТТЫ АННОТАЦИЯЛАУ 180
Ж.Е. Балабаев, С.В. Белощицкая
ШАҒАТАЙ ҚОЛЖАЗБАЛАРЫНЫҢ МӘТІНІН ТАНУ: CRNN-ДІ НӨЛДЕН БАСТАП ОҚЫТУ МЕН ТРАНСФОРМЕР НЕГІЗІНДЕГІ ТРАНСФЕРЛІК ОҚЫТУДЫ САЛЫСТЫРУ 198
Д.Б. Баумуратова, Т.К. Жукабаева, К.А. Абдрахманов, З. Ахмад, А.А. Сеитов
ЖОҒАРЫ БІЛІМ БЕРУДЕ AI НЕГІЗДЕЛГЕН ЦИФРЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯҒА АРНАЛҒАН НЕЙРО-ЦИФРЛЫҚ ОҚЫТУ МОДЕЛІ 219
Т. Даоюн, Г. Амирханова, Фу Яньвэй, Е. Фарузқызы
ФЕЙК ВИДЕОЛАРДАҒЫ МУЛЬТИМОДАЛЬДЫ СЕМАНТИКАЛЫҚ МАНИПУЛЯЦИЯНЫҢ ПАЙДАЛАНУШЫЛАРДЫҢ ҚАБЫЛДАЙТЫН СЕНІМІНЕ ӘСЕР ЕТУ МЕХАНИЗМІ 241
Ж. Доумчариева, Д. Тусупов, А. Акынбекова, М. Хасанова, М. Кассим
ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕГІ СҮТ САПАСЫН АНСАМБЛЬДІК ЖӘНЕ ГИБРИДТІ ОҚЫТУ АРҚЫЛЫ ЖІКТЕУ 258
Қ.З. Игибаев, А.Х. Козбакова, О. Әуелбеков, Т. Мерембаев, Қ. Есентаев
БИОРЕАКТОРДА IoT ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП ДИНАМИКАЛЫҚ АРАЛАСТЫРУ ҚҰРЫЛҒЫСЫН ЗЕРТТЕУ 279
А.Н. Исмуканова, Г.Кощанова, Д.В. Плескачев, Ж.Сарсенбаева, П. Шмидт
ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕ ҒЫЛЫМИ ДЕРЕКТЕРДІ АВТОМАТТЫ ТҮРДЕ ЖІКТЕУ: ТРАНСФОРМЕР АРХИТЕКТУРАЛАРЫ МЕН ГИБРИДТІ ТӘСІЛДЕРДІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ 306
Т.Ж. Камалов, Али Абд. Альмисреб, Мохаммед А. Салех
МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУҒА АРНАЛҒАН ГИБРИДТІ КВАНТТЫҚ-КЛАССИКАЛЫҚ АЛГОРИТМДЕРІН ЗЕРТТЕУ 323
Б. Кәрімқызы, К.Г. Карасенко, Н.А. Әлішеров, Н.М. Мұратбек, А. Кәрім
2021–2025 ЖЫЛДАР АРАЛЫҒЫНДАҒЫ ГЛИКЕМИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГКЕ АРНАЛҒАН МЕДИЦИНАЛЫҚ ҚҰРЫЛҒЫЛАРДЫ ӨНДІРУ ЖӘНЕ ДИАГНОСТИКАЛАУДАҒЫ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ӘДІСТЕРІ БОЙЫНША НЕГІЗГІ ЖАРИЯЛАНЫМДАР 338
С. К. Кумызбаева, К.Е. Багланбаев, К.С. Саркыт, М. Конырова
КҮЙ-ЖАЙДЫ КЛИМАТҚА СЕЗІМТАЛ ҰСЫНУМЕН ГИБРИДТІ ЭНЕРГОЖҮЙЕНІҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТІН ҮШФАЗАЛЫ ОҚЫТУ 357
Н.Е. Қарабаев, С.К. Серикбаева, Е. Бенкхелифа, Б. Тасуов

IOT-ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ БАСЫП КІРУДІ АНЫҚТАУЖҮЙЕЛЕРІНДЕ МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫҢ АНСАМБЛЬДІ КҮЛГІЛЕРІНІҢ БӘСЕКЕЛЕС ШАБУЫЛДАРҒА ТӨЗІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ 369
М. Нұртас, Ғ. Капышев
МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ПАЙДАЛЫ ҚАЗБАЛАРДЫҢ ПЕРСПЕКТИВАЛЫЛЫҒЫН БОЛЖАУ ҮШІН ГЕОКЕҢІСТІКТІК ЖӘНЕ ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕРДІ АЛДЫН АЛА ӨҢДЕУ ЖӘНЕ БІРІКТІРУДІҢ ӘДІСТЕМЕЛІК НЕГІЗІ 392
А. Нефтиссов, А. Билощицкий, И. Казамбаев, А. Медетхан, Л. Кириченко
ГЕРМЕТИКАЛЫҚ АРХИВТІК САҚТАУ ҚАПТАМАЛАРЫНДА МИКРОКЛИМАТТЫ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП ТҰРАҚТАНДЫРУ 405
Ә.Ж. Омуртаева, У.Т. Махажанова, А.К. Адилова, Ш.К. Ележанова, Я. Култан
АГРОӨНЕРКӘСІПТІК КЕШЕНДЕГІ ИНВЕСТИЦИЯЛЫҚ ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАҒАЛАУҒА АРНАЛҒАН БЕЙІМДЕЛГІШ НЕЙРОНДЫҚ-БҰЛДЫР МОДЕЛЬ: МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУДЫ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ АРҚЫЛЫ ШЕШІМ ҚАБЫЛДАУДЫ ҚОЛДАУ СӘУЛЕТІН ЖАҢҒЫРТУ 421
Н. Шаждекеева, А. Мұханбетқалиева, А. Әбдіғалиева, А. Жанекешова, Л. Нұрғалиева
ФИЛЬМДЕРДІ ҰСЫНУ ЖҮЙЕСІН ҚҰРУ КЕЗІНДЕГІ КОЛЛАБОРАТИВТІК СҮЗГІЛЕУДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ 445
С. Шармұханбет, Г. Тұрмұханова, О. Финдик, В. Махатова, М. Рахметов
ҚҰБЫРІШІЛІК РОБОТТЫ ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ҚҰБЫР АҚАУЛАРЫН АНЫҚТАУДЫҢ ЗИЯТКЕРЛІК ЖҮЙЕСІ 461

АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІК ЖӘНЕ КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРҒА АРНАЛҒАН

С.З. Дәруіш, А.У. Утегенова, А.У. Калижанова, Ж.Ж. Жумабекова
ЗЫМЫРАН ТАСЫМАЛДАУШЫЛАРДЫҢ ҚҰЛАУ АЙМАҚТАРЫНЫҢ ЛАСТАНУЫН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУМЕН ЖІКТЕУ 480
С.Н. Исабаева, А.К. Рысбаева, Ж.Б. Ибраева, Н.Р. Муссабеков, Н.Ш. Акимжан
МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ НЕГІЗІНДЕ ОТ-ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ КИБЕРШАБУЫЛДАРДЫ АНЫҚТАУ: ЖЕЛІЛІК АНОМАЛИЯЛАРДЫ ЖІКТЕУ ӘДІСТЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ 495
Г.А. Шангытбаева, А.Н. Аманов, М.К. Исенова, Г.Е. Берикханова, Қ.О. Шакерхан
МЕМЛЕКЕТТІК ОРГАНДАРДЫҢ БҰЛТТЫ СЕРВИСТЕРІНДЕГІ АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІК: ТӘУЕКЕЛДЕРДІ БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ҚОРҒАУ СТРАТЕГИЯЛАРЫ 512
Е.Н. Турсынбек, Н. Албанбай, Д. Дженоури
IOT ЖЕЛІЛЕРІНДЕ КИБЕРШАБУЫЛДАРДЫ АНЫҚТАУ ҮШІН ЕКІ ДЕҢГЕЙЛІ ФЕДЕРАЦИЯЛАНҒАН ОҚЫТУДАҒЫ БАЙЛАНЫС ШЫҒЫНДАРЫН ОҢТАЙЛАНДЫРУ 529
А. Тастемиров, С.Т. Аманжолова, Б. Алдош, С.Б. Муханов
ACTIVE DIRECTORY ЖҮЙЕСІНДЕ ҚАУІПТЕРДІ АНЫҚТАУ ҮШІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ МОДЕЛЬДЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ БАҒАЛАУ: WINDOWS ҚАУІПСІЗДІК ОҚИҒАЛАРЫ ЖУРНАЛДАРЫНДА БЕЛГІ ЖЫЛЫСТАУЫН БАҚЫЛАУ ЖӘНЕ КРОСС-СЦЕНАРЛЫҚ ВАЛИДАЦИЯ 545

СОДЕРЖАНИЕ
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАЗВИТИИСОЦИО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А Адалбек, С.Е. Керимкулов, К.Д. Кулиев, О. Мекеш, Ж.Ж. Хамитова
РАЗРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТИВНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ 11
А.Т. Искакова, Г.Е. Курманкулова, К. Громашек, К.О. Тогжанова, Р.С. Алгожаева
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ 30
А.Б. Касымова, Р.К. Ускенбаева, Ж.А.Сыдыков, Д. Омирзак, С. Калибеков
АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЧАТ-БОТА ДЛЯ SMART CITY: ПРИЁМ, АНАЛИЗ И МАРШРУТИЗАЦИЯ ОБРАЩЕНИЙ ГРАЖДАН НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА 46
О.М. Олжаев, Б.С. Омаров, A.Suliman
YOLO-CBAM: ЛЕГКОВЕСНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ МЕХАНИЗМОМ ВНИМАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ДОРОЖНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ 66
К. Ермагамбетова, А. Сарсекеева, Е. Ахласов
ПРЕОДОЛЕНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ В КЛАССИФИКАЦИИ ЦИФРОВОГО КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ:

ИНТЕГРАТИВНАЯ МНОГОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ 78

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Д.Е. Абжанова, С.Е. Шарипова
АРХИТЕКТУРА И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ МОНИТОРИНГА И ОБМЕНА ДАННЫМИ О ТРАНСГРАНИЧНЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСАХ ЖАМБЫЛСКОГО РЕГИОНА 101
А. Айтанулы, О.А. Усатова
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДВУХФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЛАЧНЫХ МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ: ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ 122
О. Альсеитов, О. Кучанский
ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННОЕ ГИБРИДНОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ПОЧАСОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ: МНОГОКОМПОНЕНТНЫЙ БЕНЧМАРК С ОЦЕНКОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ И ПЕРЕНОСИМОСТЬЮ МОДЕЛЕЙ 141
А.М. Ахметова, Д.О. Байжанова, Ж.Н. Алишева, Б.А. Шаймов
АДАПТИВНЫЙ МАРШРУТИЗАТОР ВЫВОДА С УЧЕТОМ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА 160
Ә.Қ. Әйтім
АВТОМАТИЧЕСКАЯ И ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ АННОТАЦИЯ КАЗАХСКИХ ТЕКСТОВЫХ КОРПУСОВ 180
Ж.Е. Балабаев, С.В. Белощицкая
РАСПОЗНАВАНИЕ РУКОПИСНОГО ТЕКСТА ШАГАТАЙСКИХ РУКОПИСЕЙ: СРАВНЕНИЕ ОБУЧЕНИЯ CRNN С НУЛЯ И ТРАНСФЕРНОГО ОБУЧЕНИЯ НА БАЗЕ ТРАНСФОРМЕРОВ 198
Д.Б. Баумуратова, Т.К. Жукабаева, К.А. Абдрахманов, З. Ахмад, А.А. Сеитов
НЕЙРО-ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ AI 219
Т. Даоюн, Г. Амирханова, Фу Яньвэй, Е. Фарузкызы
МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ СЕМАНТИЧЕСКОЙ МАНИПУЛЯЦИИ В ФЕЙКОВЫХ ВИДЕО НА ВОСПРИНИМАЕМОЕ ДОВЕРИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ 241
Ж. Доумчариева, Д. Тусупов, А. Акынбекова, М. Хасанова, М. Кассим
КЛАССИФИКАЦИЯ КАЧЕСТВА МОЛОКА В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ АНСАМБЛЕВЫМИ И ГИБРИДНЫМИ МЕТОДАМИ 258
К.З. Игибаев, А.Х. Козбакова, О. Ауелбеков, Т. Мерембаев, К. Есентаев
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В БИОРЕАКТОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ IoT 279
А. Н. Исмуканова, Г.Кощанова, Д.В. Плескачев, Ж.Сарсенбаева, П. Шмидт
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ НАУЧНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАНСФОРМЕРНЫХ АРХИТЕКТУР И ГИБРИДНЫХ МЕТОДОВ 306
Т.Ж. Камалов, Али Абд. Альмисреб, Мохаммед А. Салех
ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ КВАНТОВО-КЛАССИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 323
Б. Каримкызы, К.Г. Карасенко, Н.А. Алишеров, Н.М. Муратбек, А. Карим
КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ 2021–2025 ГОДОВ ПО МЕТОДАМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОИЗВОДСТВЕ И ДИАГНОСТИКЕ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ГЛИКЕМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА 338
С.К. Кумызбаева, К.Е. Багланбаев, К.С. Сарқыт, М.Ж. Конырова
ТРЁХФАЗОВОЕ ОБУЧЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТА ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С КЛИМАТО-ОСВЕДОМЛЁННЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ СОСТОЯНИЯ 357
Н.Е. Қарабаев, С.К. Серикбаева, Е. Бенкхелифа, Б. Тасуов
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АНСАМБЛЕВЫХ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К СОСТЯЗАТЕЛЬНЫМ АТАКАМ В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ IOT-СЕТЕЙ 369
М. Нуртас, Г. Капышев
МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ И ИНТЕГРАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНО-

СТИ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 392
А. Нефтиссов, А. Билощицкий, И. Казамбаев, А. Медетхан, Л. Кириченко
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ МИКРОКЛИМАТА В ГЕРМЕТИЧНЫХ АРХИВНЫХ ХРАНИЛИЩАХ 405
А.Ж. Омуртаева, У.Т. Махажанова, А.К. Адилова, Ш.К. Ележанова, Я.Култан
АДАПТИВНАЯ НЕЙРО-НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РИСКОВ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ: МОДЕРНИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ ИНТЕГРАЦИИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 421
Н. Шаждекеева, А. Муханбеткалиева, А. Абдигалиева, А. Жанекешова, Л. Нургалиева
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ФИЛЬМОВ 445
С. Шармуханбет, Г. Турмуханова, О.Финдик, В.Махатова, М. Рахметов
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ТРУБОПРОВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНУТРИТРУБНОГО РОБОТА 461

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

С.З. Дәруіш, А.У. Утегенова, А.У. Калижанова, Ж.Ж. Жумабекова
МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАЙОНОВ ПАДЕНИЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ 480
С.Н. Исабаева, А.К. Рысбаева, Ж.Б. Ибраева, Н.Р. Муссабеков, Н.Ш. Акимжан
ОБНАРУЖЕНИЕ КИБЕРАТАК В ОТ-СЕТЯХ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ СЕТЕВЫХ АНОМАЛИЙ 495
Г.А. Шангытбаева, А.Н. Аманов, М.К. Исенова, Г.Е. Берикханова, Қ.О. Шакерхан
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСАХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ОРГАНОВ: ОЦЕНКА РИСКОВ И СТРАТЕГИИ ЗАЩИТЫ 512
Е.Н. Турсынбек, Н. Албанбай, Д. Дженоури
ОПТИМИЗАЦИЯ КОММУНИКАЦИОННЫХ ЗАТРАТ В ДВУХУРОВНЕВОМ ФЕДЕРАТИВНОМ ОБУЧЕНИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ КИБЕРАТАК В IOT-СЕТЯХ 529
А. Тастемиров, С.Т. Аманжолова, Б. Алдош, С.Б. Муханов
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УГРОЗ В ACTIVE DIRECTORY: КОНТРОЛЬ УТЕЧКИ ПРИЗНАКОВ И КРОСС-СЦЕНАРНАЯ ВАЛИДАЦИЯ НА ЖУРНАЛАХ БЕЗОПАСНОСТИ WINDOWS 545

INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES
ISSN 2708–2032 (print)
ISSN 2708–2040 (online)
Vol. 7. Is.3. Number 27 (2026). Pp. 258–278
Journal homepage: https://journal.iitu.edu.kz
https://doi.org/10.54309/IJICT.2026.27.3.014
UDC 004.89:004.94:637.1

ENSEMBLE AND HYBRID LEARNING FOR DIGITAL TWIN MILK CLASSIFICATION

Zh. Doumchariyev[1,3], J. Tussupov[1]*, A. Akynbekova[2], M. Khassanova[2], M. Kassim[4]
[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;
[2]Taraz University named after M.H Dulati, Taraz, Kazakhstan;
[3]Turan – Astana University, Astana, Kazakhstan;
[4]Universiti Teknologi MARA (UiTM), Shah Alam, Selangor, Malaysia.
E-mail: tussupov@mail.ru

Zhanagul Doumchariyeva — PhD Student, Senior Lecturer of the Department "Information Systems", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
https://orcid.org/0009-0006-4085-8409;
Jamalbek Tussupov — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department "Information Systems", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
E-mail: tussupov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9179-0428;
Aiman Akynbekova — Master, Senior Lecturer of the Department "Information Systems", Taraz University named after M.H Dulati, Taraz, Kazakhstan
https://orcid.org/0009-0003-0280-095X;
Munaram Khassanova — Master, Senior Lecturer of the Department "Applied informatics and programming", Taraz University named after M.Kh. Dulaty, Taraz, Kazakhstan
https://orcid.org/0009-0006-4833-4351;
Murizah Kassim — Professor, Head of Research and Innovation, Institute for Big Data Analytics and Artificial Intelligence (IBDAAI), Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi MARA (UiTM), Shah Alam, Selangor, Malaysia
https://orcid.org/0000-0002-8494-4783.

© Zh. Doumchariye, J. Tussupov, A. Akynbekova, M. Khassanova, M. Kassim

Abstract. Changes in milk composition and quality affect consumer health, production efficiency, and supply chain safety, which is why fast and reliable assessment is essential. Lately, there's increasing interest in digital models for food systems. However, the number of studies comparing ensemble, hybrid, and classical

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

machine learning models to directly classify milk quality is still limited. The aim of this study was to evaluate and compare the performance of classical, ensemble, and hybrid machine learning models for milk quality classification within a Digital Twin framework. The Kaggle Milk Quality dataset (1,059 samples, seven physicochemical attributes) was used. Six conventional algorithms, three ensemble methods (Random Forest, XGBoost, LightGBM), and three hybrid models (RF+KNN, XGBoost+RF, and Stacking) were assessed using stratified train–test splitting and five-fold cross-validation. The results showed that ensemble and hybrid methods consistently outperformed traditional machine learning methods. The RF+KNN hybrid model achieved perfect classification (100.0% across all metrics), while the Stacking hybrid model reached 99.69% due to a single misclassification. Both models substantially outperformed classical baselines. The findings indicate that ensemble and hybrid machine learning models are well suited for Digital Twin–based real-time milk quality monitoring and can support intelligent decision-making in smart dairy production.

Keywords: digital twin, milk quality classification, machine learning, ensemble learning, hybrid models

For citation: Doumchariye Zh., Tussupov J., Akynbekova A., Khassanova M., Kassim M. (2026). Ensemble and hybrid machine learning for real-time milk quality classification in digital twins // International journal of information and communication technologies. Vol. 7. No. 27. Pp. 258–278. https://doi.org/10.54309/IJICT.2026.27.3.014. (In Eng.).

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗДЕГІ СҮТ САПАСЫН АНСАМБЛЬДІК ЖӘНЕ ГИБРИДТІ ОҚЫТУ АРҚЫЛЫ ЖІКТЕУ

Ж. Доумчариева[1,3], Д. Тусупов[1]*, А. Акынбекова[2], М. Хасанова[2], М. Кассим[4]
[1]Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;
[2]М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан;
[3]«Тұран-Астана» университеті, Астана, Қазақстан;
[4]MARA технологиялық университеті (UiTM), Шах-Алам, Селангор, Малайзия.
E-mail: tussupov@mail.ru

Доумчариева Жанагул — магистр, Ақпараттық жүйелер кафедрасының PhD докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан https://orcid.org/0009-0006-4085-8409;
Тусупов Джамалбек — физика-математика ғылымдарының докторы, Ақпараттық жүйелер кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
E-mail: tussupov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9179-0428;
Акынбекова Айман — магистр, Ақпараттық жүйелер кафедрасының аға оқытушысы, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан https://orcid.org/0009-0003-0280-095X;

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

Хасанова Мунарам — магистр, Қолданбалы информатика және бағдарламалау кафедрасының аға оқытушысы, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, Қазақстан
https://orcid.org/0009-0006-4833-4351;
Кассим Муризах — Зерттеу және инновациялар бөлімінің басшысы, Үлкен деректерді талдау және жасанды интеллект институтының профессоры (IBDAAI), MARA технологиялар университеті (UiTM), Шах Алам, Селангор, Малайзия
https://orcid.org/0000-0002-8494-4783.

© Ж. Доумчариева, Д. Тусупов, А. Акынбекова, М. Хасанова, М. Кассим

Аннотация. Сүттің құрамы мен сапасындағы өзгерістер тұтынушылардың денсаулығына, өндіріс тиімділігіне және жеткізу тізбегінің қауіпсіздігіне тікелей әсер етеді. Сондықтан сүт сапасын жедел әрі сенімді бағалау ерекше маңызды. Соңғы жылдары азық-түлік өндірісінде цифрлық егіз (Digital Twin) технологияларын қолдануға қызығушылық артып келеді. Дегенмен, сүт сапасын тікелей жіктеуде классикалық, ансамбльдік және гибридті машиналық оқыту модельдерін салыстырмалы түрде зерттеген жұмыстар әлі де аз. Зерттеудің мақсаты – Digital Twin тұжырымдамасы аясында сүт сапасын жіктеуге арналған классикалық, ансамбльдік және гибридті машиналық оқыту модельдерінің тиімділігін бағалау және салыстыру. Зерттеуде Kaggle платформасындағы Milk Quality деректер жиынтығы (1059 үлгі, жеті физика-химиялық көрсеткіш) пайдаланылды. Алты классикалық алгоритм, үш ансамбльдік әдіс (Random Forest, XGBoost, LightGBM) және үш гибридті модель (RF+KNN, XGBoost+RF және Stacking) стратификацияланған оқыту/сынақ жиынтықтары мен бес еселік кросс-валидация арқылы бағаланды. Нәтижелер ансамбльдік және гибридті әдістердің дәстүрлі машиналық оқыту модельдерінен тұрақты түрде жоғары нәтиже көрсеткенін дәлелдеді. RF+KNN гибридті моделі барлық көрсеткіштер бойынша 100,0% дәлдікпен мінсіз классификация нәтижесін көрсетті, ал Stacking ансамблі бір ғана қате классификацияға байланысты 99,69% нәтижеге жетті. Екі модель де классикалық базалық модельдерден айтарлықтай жоғары нәтиже көрсетті. Қорытындысында, ансамбльдік және гибридті машиналық оқыту модельдері Digital Twin негізіндегі нақты уақыттағы сүт сапасын бақылау және интеллектуалды шешім қабылдау жүйелерін құру үшін тиімді тәсіл болып табылады.

Түйінді сөздер: цифрлық егіз, сүт сапасын жіктеу, машиналық оқыту, ансамбльдік оқыту, гибридті модельдер

Дәйексөздер үшін: Доумчариева Ж., Тусупов Д., Акынбекова А., Хасанова М., Кассим М. (2026). Цифрлық егіздер негізінде сүт сапасын нақты уақыт режимінде жіктеуге арналған ансамбльдік және гибридті машиналық оқыту әдістері // Халықаралық ақпараттық және коммуникациялық технологиялар журналы. Т. 7. No 27. Б. 258–278. https://doi.org/10.54309/IJICT.2026.27.3.014. (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

жоқ деп мәлімдейді.

КЛАССИФИКАЦИЯ КАЧЕСТВА МОЛОКА В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ АНСАМБЛЕВЫМИ И ГИБРИДНЫМИ МЕТОДАМИ

Ж. Доумчариева[1,3], Д. Тусупов[1]*, А. Акынбекова[2], М. Хасанова[2], М. Кассим[4]
[1]Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, Астана, Казахстан;
[2]Таразский университет имени М. Х. Дулати, Тараз, Казахстан;
[3]Университет «Туран-Астана», Астана, Казахстан;
[4]Университет технологий MARA (UiTM), Шах-Алам, Селангор, Малайзия.
E-mail: tussupov@mail.ru

Доумчариева Жанагул — магистр, PhD докторант кафедры Информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан
https://orcid.org/0009-0006-4085-8409;
Тусупов Джамалбек — доктор физико-математических наук, профессор кафедры Информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан
E-mail: tussupov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9179-0428;
Акынбекова Айман — магистр, старший преподаватель кафедры Информационных систем, Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан
https://orcid.org/0009-0003-0280-095X;
Хасанова Мунарам — магистр, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и программирования, Таразский университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан
https://orcid.org/0009-0006-4833-4351;
Кассим Муризах — руководитель отдела Исследований и инноваций, профессор Института Анализа больших данных и искусственного интеллекта (IBDAAI), Технологический университет MARA (UiTM), Шах Алам, Селангор, Малайзия
https://orcid.org/0000-0002-8494-4783.

© Ж. Доумчариева, Д. Тусупов, А. Акынбекова, М. Хасанова, М. Кассим

Аннотация. Изменения состава и качества молока оказывают влияние на безопасность продукции, эффективность производства и здоровье потребителей, что делает актуальной разработку интеллектуальных методов оценки качества. Целью исследования являлось сравнение классических, ансамблевых и гибридных моделей машинного обучения для классификации качества молока в рамках концепции Digital Twin. В работе использован набор данных Milk Quality (Kaggle), содержащий 1059 образцов и семь физико-химических признаков. Были исследованы шесть классических алгоритмов, три ансамблевых ме-

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

тода (Random Forest, XGBoost, LightGBM) и три гибридные модели (RF+KNN, XGBoost+RF и Stacking) с применением стратифицированного разделения выборки и пятикратной кросс-валидации. Результаты показали преимущество ансамблевых и гибридных моделей над традиционными алгоритмами. Гибридная модель RF+KNN продемонстрировала идеальную классификацию с результатом 100,0% по всем метрикам, тогда как ансамбль Stacking достиг 99,69% из-за единственной ошибочной классификации. Обе модели значительно превзошли классические базовые модели. Полученные результаты подтверждают перспективность использования ансамблевых и гибридных моделей в системах мониторинга качества молока на основе Digital Twin и интеллектуальной поддержки принятия решений.

Ключевые слова: цифровой двойник, классификация качества молока, машинное обучение, ансамблевое обучение, гибридные модели

Для цитирования: Доумчариева Ж., Тусупов Д., Акынбекова А., Хасанова М., Кассим М. (2026). Ансамблевые и гибридные методы машинного обучения для классификации качества молока в режиме реального времени на основе цифровых двойников // Международный журнал информационных и коммуникационных технологий. Т. 7. No. 27. Стр. 258–278. https://doi.org/10.54309/IJICT.2026.27.3.014. (На англ.).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

Milk is one of the most important foods in the human diet. This is because the composition and nutritional value of milk is rich in proteins, fats, carbohydrates, vitamins and minerals. It plays a fundamental role for human health, especially for the growth and development of children, as well as for maintaining the health of adults. However, the quality of milk can deteriorate due to improper storage, lack of pasteurization and microbiological contamination. Drinking poor quality milk can lead to foodborne illnesses, bacterial infections, exposure to toxins, and long-term health complications. Therefore, a quick and reliable assessment of milk quality is an important issue in modern food safety systems (Sioneket al., 2023).

This study examines the interactions between food science, industrial automation, and Data-Driven Decision Support in the context of the Industry 4.0. The dairy industry, especially the production of fermented milk products, is facing an increasing need to introduce intelligent control systems that can reduce waste and operating costs while ensuring product quality. The integration of dual digital technologies with machine learning will allow predictive quality control, real-time monitoring and provide the necessary early warning capabilities for a modern intelligent production environment.

Traditionally, the quality of milk is checked in the laboratory through tests that examine its physical and chemical properties, as well as its microbiology. Although these methods give tangible results, they are often time-consuming, labor-intensive, expensive, and unsuitable for continuous monitoring in a production environment

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

(Aydogdu et al., 2023). New technologies such as advanced sensors, Internet of things and artificial intelligence will help us create intelligent systems capable of checking the quality of milk in real time. These technologies allow you to automatically check the quality of milk and quickly make decisions in the production of food products (Rajeswari et al., 2024). By combining sensors that can transmit data via the internet with artificial intelligence, we can now regularly check the quality of milk and achieve quick results even at large industrial enterprises. This is a big step forward in ensuring the safety and quality of our food (Rajeswari et al., 2024).

Milk quality problems have serious economic consequences: product recall, risk to consumer health, and closing production can lead to significant financial losses for dairy farmers. While traditional laboratory quality assessment methods are accurate, they work slowly and cannot provide the prompt feedback needed to manage the workflow. In recent years, advances in sensor technology, the Internet of Things (IoT), and artificial intelligence (AI) have opened up new opportunities for Automated Continuous Quality Control. However, integrating these technologies into real production environments remains a challenge that requires creating models that combine high accuracy and low computational latency.

One of the most promising developments in this area is the concept of Digi tal Twins. A Digital Twin is a copy of a physical system that always sends and receives information with the real thing through sensors and computer models (Huang et al., 2024). In factories and industries Digital Twin technology has shown it can be very useful for watching what is happening fixing problems before they start and helping people make decisions (Rasheed et al., 2025; Rasheed et al., 2020). In the food business this idea has become Digital Food Twins, which use sensor information, computer models and machine learning to check the quality of food guess what will happen and help people make decisions (Krupitzer et al., 2022; Verboven et al., 2020). Recent studies have also demonstrated the application of Digital Twin concepts for modeling fermentation kinetics and supporting intelligent operator decision-making in dairy production (Alimardanova et al., 2026; Doumcharuyeva et al., 2025).

Machine learning is becoming very important for checking the quality of milk and guessing what it will be like. Some people named Sharma and Kumar looked at all the research. Found that machine learning is a good way to check food quality because it is fast and accurate. They also found that using methods together works better than using just one old method (Liakos et al., 2024).

People participating in the study can divide their work into three groups. The first group uses such machine learning methods as reference vector machines, close neighbors, decision trees, and the naive Bayesian method. Some studies have shown that these methods allow you to correctly classify the quality of milk in more than 95% of cases. Solution trees and support vector machines are especially good for this. They work very well with milk quality data. Digital twin and digital food Twin technologies use these methods to achieve results. Machine learning and digital twin technologies help the food industry make decisions and improve milk quality (Bhavsar et al., 2023; Zhao, 2025). The second category consists of ensemble learning methods, including

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

Random Forest, Extreme Gradient Boosting, Light Gradient Boosting Machine, and Gr adient Boosting approaches. When you combine several simple models, you can create even more advanced ones. This is the so-called an ensemble Model. This can make the forecast more accurate and reliable. One of the most popular types of Group models is XGBoost. It is fast and can be used in different situations (Chen et al., 2016). Some studies have shown that the use of random forest and extreme gradient enhancement models can be really effective in predicting milk quality and analyzing dairy products. For example, such models will help determine whether milk is good or not, what it contains. By combining multiple models, you can better understand the data and make more accurate predictions. This is important in many areas, such as food safety and quality control (Mhapsekar et al., 2025; Goyal et al., 2024).

The third category includes hybrid machine learning models that combine the advantages of several algorithms. Random Forests and k-Nearest Neighbors showed really good results. These methods can be combined with other methods, for example, deep learning, the creation of more powerful tools. In fact, some studies have shown that these hybrid models can be 99% accurate, which is very important for systems such as food management systems. However, there is still disagreement about which approach is better (Keong et al., 2024; Rao et al., 2025). Some people consider deep learning to be the right path because it can be really accurate. Others believe that simple models, such as assembly methods, are better because they are faster and easier to understand. This is especially important for things like the Internet of Things, where speed and clarity are important (Neto et al., 2019; Ehsani et al., 2025). A great example of this is the dairy industry. With the development of the IoT and artificial intelligence, there is a great need for models that can combine accuracy and computational efficiency. This means that the models must be fast, but at the same time be able to explain what you are doing. Most of the research done so far has focused on obtaining correct predictions, but it has not paid enough attention to things like real-time constraints and the ability to interpret models (Alimardanova et al., 2026). It is important not only to get the right answer, but also to get it quickly and understand why. This is where Digital Twin architectures come to the rescue-they help to integrate these models into the big picture and make them more useful. Therefore, despite the fact that we have made some progress, there is still a lot of work to be done to create accurate and practical models for use in the real-world.

Despite these advances, several important research gaps remain. First, we need to look at how different machine learning models work to determine the quality of milk. We need to see if these models can work together and work with models. Secondly, in most cases, people who study this do not think that everything should happen quickly, whether these models can work in real life or not. Third, we must understand how machine learning models work and be able to see what is happening inside them. This is very important if we want to use them in life. Finally, we need to figure out how to use machine learning models in Digital Food Twin systems. We should also consider how to share models to check the quality of food. It still works. This is important for the future of food systems (Doumchariyeva et al., 2026).

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

Based on these observations, the research hypothesis of this study shows that hybrid and group machine learning models can significantly improve the accuracy of milk quality classification while maintaining appropriate computational performance for real-time digital twin applications. In addition, it is assumed that some complex methods can provide a good balance between prediction accuracy and output speed, which makes it more suitable for the Industrial Internet of things.

The main goal of this study is to compare the effectiveness of Classical, Group and hybrid machine learning models to classify milk quality within the framework of the digital twin concept. To achieve this goal, a publicly available milk quality data set consisting of 1,059 samples and seven quality-related characteristics was analyzed. Six classical machine learning algorithms, three cluster models (Random Forest, Extreme Gradient Boosting, and Light Gradient Boosting Machine) and three hybrid models (Random Forest plus k-Nearest Neighbors, Extreme Gradient Boosting plus Random Forest, and Stacking) were evaluated.). The results obtained provide practical recommendations for the selection of suitable machine learning models and Digital Food Twin applications for double food for real-time monitoring of milk quality. The results showed that the overlapping cluster system achieved the highest classification accuracy, and the Light Gradient Boosting Machine showed the fastest prediction delay of 1.89 MS, which is a useful solution for delay-sensitive industrial systems.

Materials and methods.

Dataset Description

The empirical analysis is based on a collection of publicly available data for predicting the quality of milk hosted on the Cagle platform (https://www.kaggle.com/datasets/cpluzshrijayan/milkquality). The collection includes 1,059 milk samples, each characterized by seven physico-chemical and organoleptic indicators that are often used in assessing the quality of milk: pH, temperature, taste, aroma, fat content, turbidity and color. The score variable encodes quality scores as one of three ordinal categories — Low, Medium, and high. This data set was selected on the basis of a heterogeneous combination of quantitative and categorical characteristics reflecting the main indicators of milk quality and their role recognized as a reference in the literature on the classification of food quality.

The characteristics of the input data, as well as the data types and their range of values, are presented in Table 1.

Table 1. Input characteristics of milk quality data sets

Feature	Type	Range / Values
pH	Numerical	3.0–9.5
Temperature (°C)	Numerical	34–90
Taste	Categorical	0 (unpleasant), 1 (pleasant)
Odor	Categorical	0 (unpleasant), 1 (pleasant)
Fat	Categorical	0, 1
Turbidity	Categorical	0, 1
Color	Numerical	240–255

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

Data Preprocessing

Before training the model, the data set went through several stages of pre-processing to improve the quality of the data and ensure reliable operation of the model. First, duplicate records were detected and deleted. With the help of statistical analysis, abnormal observations were identified that can negatively affect Model training.

Categorical variables were encoded using One- Hot Encoding to convert them into machine-readable digital representations. In order to ensure that all variables make the same contribution during model training, quantitative characteristics were normalized using the StandardScaler method.

Data Partitioning and Validation Strategy

The data sets were divided into training and testing subgroups in a 70: 30 ratio. The training subgroup was used to develop the model and adjust the Superparameters, while the testing subgroup was reserved for final performance assessments.

To increase the reliability of the results, five-fold validation was used during model training. This approach reduces the risk of overconformity and provides a more representative assessment of the effectiveness of Model generalization.

Digital Twin Architecture

The proposed research framework was designed for integration into a Digital Food Twin environment. The architecture combines sensor-based data acquisition, machine learning prediction, and intelligent monitoring functionalities.

The workflow consists of the following stages:

IoT Sensors → Feature Extraction → Machine Learning Classifier → Digital Twin → Dashboard → Process Optimization

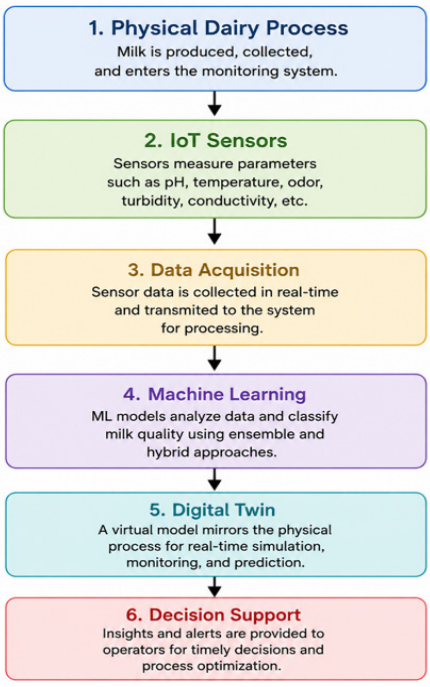


Fig. 1. General conceptual framework of Digital Twin–based milk quality monitoring.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

Figure 1 shows the proposed Digital Twin framework for milk quality monitoring and optimization. Real-time data collected from IoT sensors are preprocessed through feature extraction techniques and analyzed using machine learning classifiers. The prediction results are integrated into the Digital Twin environment, where the virtual model is continuously updated. The generated information is visualized through a dashboard and used to support monitoring, quality assessment, and process optimization decisions.

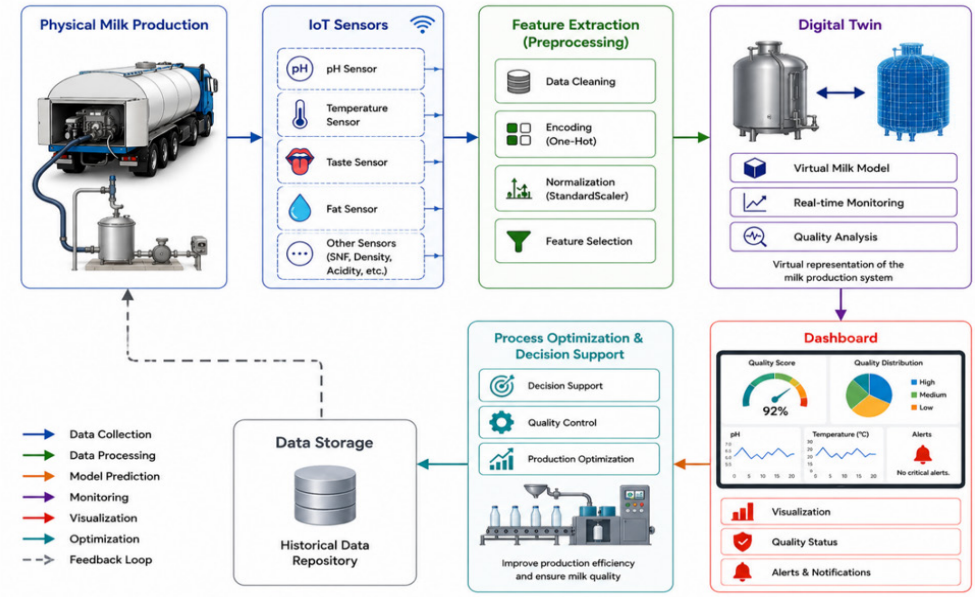


Fig. 2. Proposed Digital Twin architecture integrating machine learning models for real-time milk quality monitoring and decision support.

Figure 2 illustrates the proposed six-stage Digital Twin architecture for real-time milk quality monitoring. IoT sensors acquire physicochemical milk parameters, which are then preprocessed and classified by ensemble and hybrid machine learning models (Random Forest, XGBoost, LightGBM, and Stacking) to predict quality grades. The predictions are transferred to the Digital Twin environment, continuously updating the virtual representation for real-time monitoring. An interactive dashboard visualizes quality status and alerts, while the Process Optimization module translates analytical insights into quality control actions. Historical data are stored and fed back to support continuous model refinement.

Machine Learning Models

Three categories of machine learning models were investigated in this study: classical models, ensemble models, and hybrid models.

Classical Machine Learning Models

The baseline models included:

- Logistic Regression;
- k-Nearest Neighbors (k = 5);

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

- Decision Tree;
- Support Vector Machine with Radial Basis Function kernel;
- Gaussian Naïve Bayes;
- Multi-Layer Perceptron Neural Network.

These models were selected because they are commonly used benchmarks in food quality classification research.

Ensemble Learning Models

Although Random Forest, XGBoost, and LightGBM are commonly treated as individual algorithms, each internally combines multiple decision trees to generate a final prediction. Therefore, these approaches belong to the ensemble learning family, where multiple weak learners are aggregated to improve classification accuracy and robustness.

Three ensemble methods were evaluated:

- Random Forest (100 trees);
- Extreme Gradient Boosting (100 boosting iterations);
- Light Gradient Boosting Machine (100 boosting iterations).

Hybrid Models

Unlike ensemble methods, which combine multiple learners within the same algorithmic framework, hybrid models integrate two or more distinct machine learning algorithms. This approach allows the exploitation of complementary strengths of different methods and may improve predictive performance in complex classification tasks.

To investigate whether combinations of algorithms can outperform individual models, three hybrid approaches were developed:

RF + KNN, where feature importance scores generated by Random Forest were incorporated into the k-Nearest Neighbors classifier;

XGBoost + RF, combining gradient boosting and bagging principles;

Stacking Ensemble, using Random Forest, XGBoost, and Support Vector Machine as base learners and Logistic Regression as the meta-learner.

The hybrid models were designed to exploit complementary strengths of individual algorithms and improve classification performance within Digital Twin environments.

In addition, the Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (ROC-AUC) was used to evaluate the overall discriminative ability of the models independently of the classification threshold.

The region of the functioning characteristics of the receptors under the winter (rock-OK) is faking a «one-to-one» strategy to evaluate the multi-layer central recognition cabinet. The calculation efficiency was measured using:

- Exercise time (in seconds);
- Prediction time (milliseconds per 1000 samples).

These indicators are very important for digital twin systems, where real-time performance and low latency are the main requirements.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

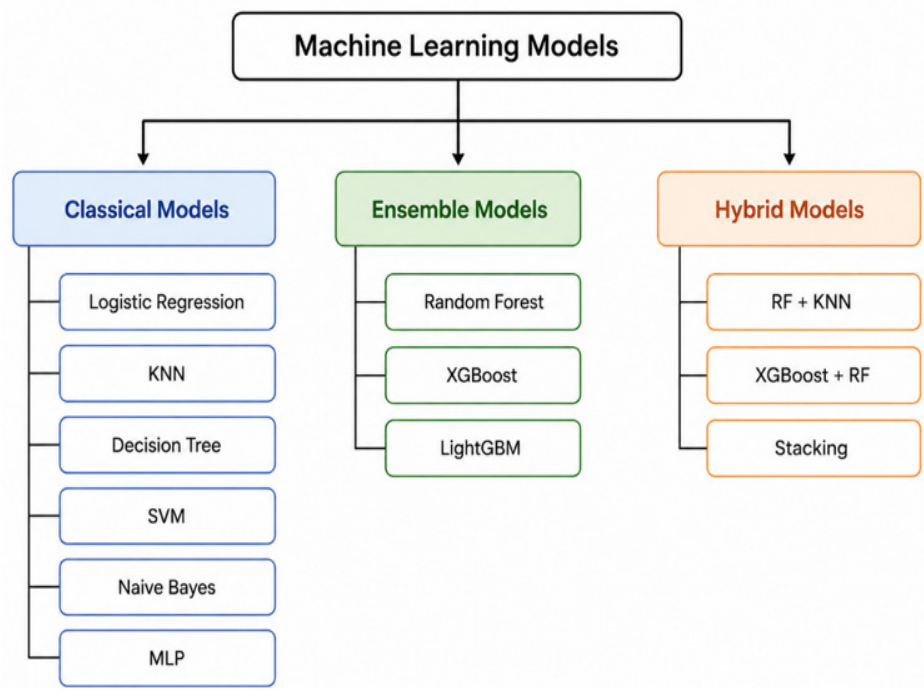


Fig. 3. Classification of classical, ensemble, and hybrid machine learning models used in this study.

Figure 3 shows the classification of machine learning models used in this study. Models are divided into three groups: Classic ensemble and hybrid methods, after which they are compared in terms of the effectiveness of the Milk Quality Rating.

Performance Evaluation Metrics.

The effectiveness of the model was evaluated using several additional evaluation indicators. Accuracy was used as the primary evaluation metric:

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

where TP, TN, FP, and FN denote true positives, true negatives, false positives, and false negatives, respectively.

To provide a comprehensive evaluation of the classification models, Precision, Recall, and F1-score were also calculated:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$F1 = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision+Recall} \quad (4)$$

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

Experimental Environment

All experiments were conducted using a workstation running Microsoft Windows 11 with an Intel Core i7 processor and 16 GB RAM.

Python 3.10, Scikit-learn 1.2.2, XGBoost 1.7.6, LightGBM 4.0.0, NumPy, Pandas, Matplotlib were used for the software environment.

The experimental installation is designed in such a way as to provide the possibility of reproduction and an objective comparison of all studied machine learning models.

The source code used to train and evaluate models is available at the reasonable request of the respective author.

Results and discussion.

Comparative Performance of Machine Learning Models

The effectiveness of the studied machine learning models was evaluated using the indicators of Accuracy, Precision, Recall, F1-score, and ROC-AUC. The results are presented in Table 2.

Table 2. Comparative efficiency of machine learning models to classify milk quality

Category	Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	ROC-AUC
Hybrid	RF+KNN	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Hybrid	Stacking	0.9969	0.9969	0.9969	0.9969	1.0000
Hybrid	XGBoost+RF	0.9969	0.9969	0.9969	0.9969	1.0000
Ensemble	XGBoost	0.9969	0.9969	0.9969	0.9969	1.0000
Ensemble	Random Forest	0.9969	0.9969	0.9969	0.9969	1.0000
Ensemble	LightGBM	0.9969	0.9969	0.9969	0.9969	1.0000
Classical	SVM (RBF)	0.9969	0.9969	0.9969	0.9969	1.0000
Classical	Decision Tree	0.9969	0.9969	0.9969	0.9969	0.9969
Classical	KNN (k=5)	0.9937	0.9937	0.9937	0.9937	1.0000
Classical	MLP	0.9277	0.9284	0.9277	0.9284	0.9970
Classical	Naïve Bayes	0.8365	0.8387	0.8365	0.8387	0.9750
Classical	Logistic Regression	0.8239	0.8272	0.8239	0.8272	0.9270

As shown in Table 2, the RF+KNN hybrid model achieved perfect classification on the test set, with 100.0% across all five metrics (Accuracy, Precision, Recall, F1-score, and ROC-AUC). The Stacking model, XGBoost+RF, XGBoost, Random Forest, LightGBM, and SVM (RBF) each achieved 99.69%, reflecting a single misclassification out of 318 test samples. The Decision Tree and KNN (k=5) reached 99.69% and 99.37%, respectively. Among classical classifiers, SVM and Decision Tree were the strongest, while Logistic Regression (82.39%) and Naïve Bayes (83.65%) showed the lowest accuracy. Overall, hybrid and ensemble models consistently outperformed the classical baselines, confirming the benefit of combining multiple learning algorithms for milk quality classification.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

Table 3. Average accuracy of classification by model class

Category	Models	Mean Accuracy
Classical	6 models	92.93%
Ensemble	3 models	99.69%
Hybrid	3 models	99.79%

As shown in Table 3, the average classification accuracy increased from 92.93% for basic models to 99.69% for group methods and 99.79% for hybrid models. The results show that combining multiple learning algorithms significantly increases the effectiveness and reliability of classification. In particular, hybrid methods have achieved the highest overall accuracy, demonstrating their potential for for Digital Twin–based quality control based on dual technologies and decision support applications.

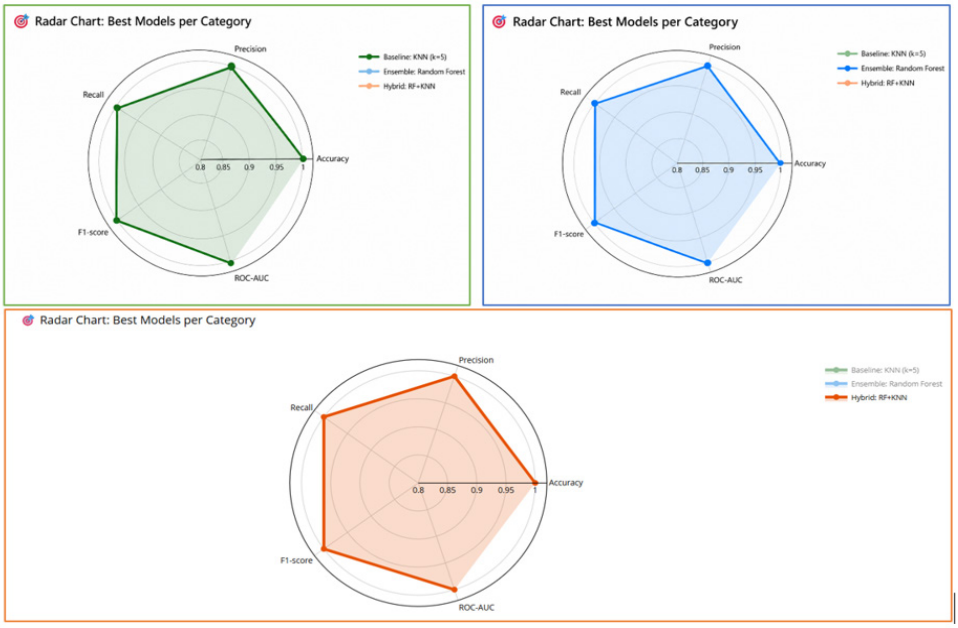


Fig. 4. Radar chart comparison of KNN, Random Forest, and RF+KNN models across five classification metrics.

Figure 4 presents radar chart visualizations comparing the best-performing model from each category across five classification metrics: Precision, Accuracy, ROC-AUC, F1-score, and Recall. The Ensemble model (Random Forest) demonstrates a consistently balanced and high-coverage profile across all metrics. The Hybrid model (RF+KNN) achieves the largest area coverage overall, reflecting superior performance particularly in Accuracy and ROC-AUC. In contrast, the Baseline model (KNN, k=5) exhibits a notably reduced profile in ROC-AUC and F1-score, indicating comparatively weaker generalization. These visualizations confirm that ensemble and hybrid approaches outperform the classical baseline across all evaluated dimensions.

Computational Performance

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

The time of training and forecasting of the most effective models is given in Table 4.

Table 4. Learning time and prediction of effective machine learning models

Model	Training Time (s)	Prediction Time (ms/1000 samples)
Logistic Regression	0.03	0.20
KNN (k=5)	0.01	0.50
Decision Tree	0.02	0.30
SVM (RBF)	2.84	19.60
Naive Bayes	0.01	0.15
MLP	0.50	0.40
Random Forest	0.39	2.98
XGBoost	0.42	2.15
LightGBM	0.21	1.89
RF+KNN	0.08	1.50
XGBoost + RF	1.15	4.20
Stacking	3.68	28.40

As shown in Table 4, XGBoost showed an estimated time of 2.15 ms per 1000 samples, followed by the speed of LightGBM (1.89 Ms), RF+KNN (1.50 ms) and Random Forests (2.98 ms). Among the models evaluated, the SVM (RBF) showed the highest computational cost, requiring 2.84 seconds to perform and 19.60 Ms per 1,000 samples to predict. The Stacking and XGBoost+RF also require additional computing resources compared to individual range models. These results show that XGBoost and LightGBM provide an effective balance between computational efficiency and classification performance.

The violin diagrams in Figure 5 show that ensemble and hybrid models consistently achieve high F1-scores with low contrast, which confirms their stability and reliability. In contrast, key models, especially Logistic Regression and the Naive Bayes method, show low estimates and low predictive power.

Confusion Matrix Analysis

To provide a more detailed assessment of classification performance, confusion matrices were constructed for three representative models (Figure 6). The RF+KNN hybrid model achieved perfect classification, with zero misclassifications across all 318 test samples. The Stacking model produced one misclassification (one high-quality sample classified as medium-quality), corresponding to 99.69% accuracy. The Logistic Regression baseline exhibited substantial confusion between adjacent classes, with 56 misclassifications, reflecting its lower accuracy of 82.39%.

These results confirm that the perfect performance of the RF+KNN model is not an artifact of metric calculation but reflects the genuine separability of the three milk quality classes in the feature space when heterogeneous base learners are combined. The single misclassification of the Stacking model is consistent with its 99.69% accuracy reported in Table 2.

The stability and robustness of the evaluated models were further assessed using

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

cross-validation. The distribution of F1-scores across validation folds is presented in Figure 5.

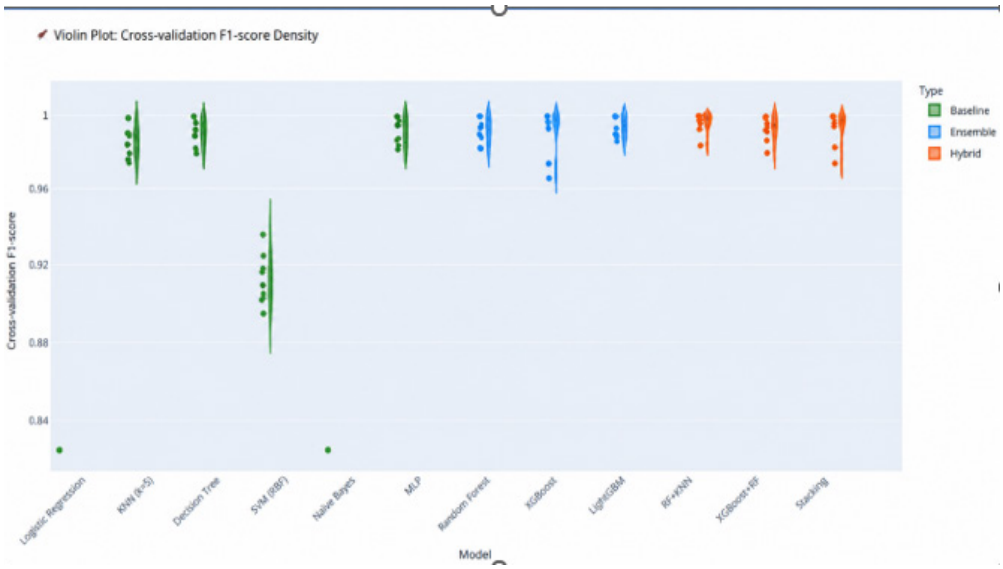


Fig. 5. Violin plot of cross-validation F1-score distributions for the evaluated machine learning models.

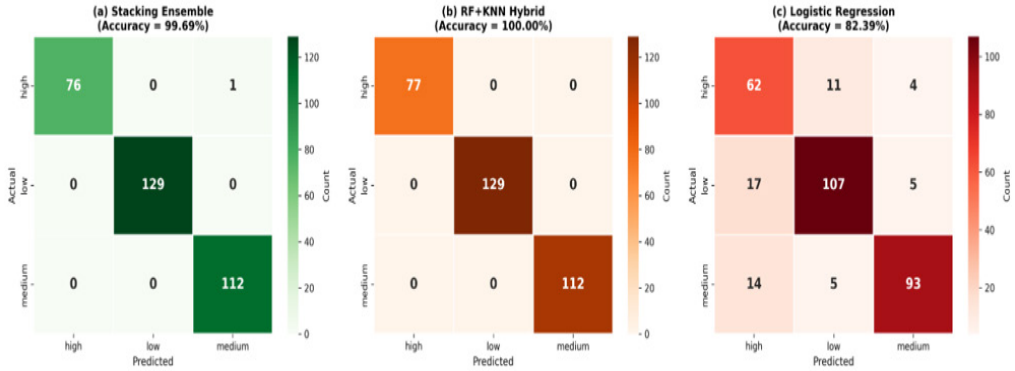


Fig. 6. Confusion matrices for three representative models.

(a) RF+KNN hybrid (Accuracy = 100.0%, 0 misclassifications); (b) Stacking model (Accuracy = 99.69%, 1 misclassification); (c) Logistic Regression baseline (Accuracy = 82.39%, 56 misclassifications). The matrices confirm the perfect classification of the RF+KNN model and illustrate the progressive degradation of performance in the Stacking and baseline models.

Digital Twin Deployment Readiness

A heat map has been developed to provide a visual comparison of the performance of the model for several evaluation indicators. The results are shown in Figure 7.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

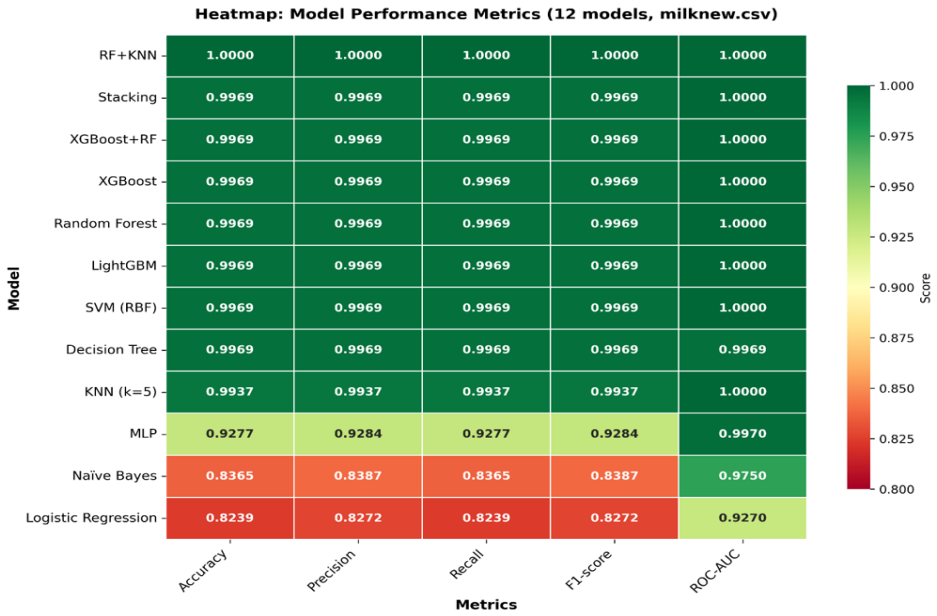


Fig. 7. Heatmap visualization of classification performance metrics for the evaluated machine learning models.

The heatmap shows that RF+KNN achieved the highest overall performance, with 1.0000 across all evaluated metrics, while Stacking and the other ensemble models also demonstrated near-perfect performance.

Interpretation of Classification Results

The high performance of the stacking model is due to its ability to combine the advantages of several classifiers. It is implemented at the meta-learning level. By combining predictions from different listeners, the model identifies complementary patterns in the data set and increases the reliability of the classification. This finding is consistent with previous studies (Liakos et al., 2025; Keong et al., 2024; Rao et al., 2025), which stated that integrated and hybrid methods often outperform individual classifiers in predicting food quality. In particular, our results are similar to those of Sharma and Kumar (Liakos et al., 2025), who showed that ensemble learning methods consistently provide high accuracy in food quality control applications.

Readiness to work with the Digital Twin and the ability to use it in Real-Time.

Digital twin systems provide continuous monitoring and intelligent decision-making. Digital dual systems require high prediction accuracy and minimal calculation delay (Su et al., 2025). As noted by Su et al. (Su et al., 2025), real-time data processing and predictive analysis are an important component of industrial dual digital architecture. In conclusion, among the high-performance models, the RF + KNN model has the lowest prediction delay, which is only 1.50 Ms per 1000 samples. The prediction time for LightGBM and XGBoost models is 1.89 MS and 2.15 ms, respectively. These results are consistent with the conclusions of Rasheed et al. (Rasheed et al., 2020). They particularly emphasize the importance of computational efficiency in implementing a Digital Twin in a production environment. Although the Stacking model showed

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

near-perfect classification performance, it required significantly more computational resources, resulting in a prediction delay of 28.40 ms.

The comparison of the evaluated models indicates a clear trade-off between predictive accuracy and computational efficiency. Although the Stacking model achieved near-perfect classification performance, its inference time was longer because predictions must be generated sequentially by multiple base learners and a meta-learner. In contrast, the RF+KNN hybrid model exhibited the lowest prediction latency, as Random Forest reduces feature complexity before the KNN classification stage, enabling faster inference while maintaining high accuracy. LightGBM also demonstrated an effective balance between prediction accuracy and computational efficiency due to its histogram-based learning and leaf-wise tree growth strategy. These findings suggest that the selection of a machine learning model for Digital Twin applications should consider not only predictive performance but also real-time computational requirements.

Comparison with Previous Studies

The results obtained in this study are consistent with previous studies. This study also demonstrated the effectiveness of group training in predicting and evaluating food quality, as in this case. Previous research has shown that Random Forest and XGBoost often outperform basic machine learning methods due to their ability to detect nonlinear relationships and complex interactions of objects (Liakos, 2025; Bhavsar et al., 2023; Mhapsekar et al., 2025). In this study, similar results were obtained: Ensemble and hybrid models consistently surpassed Logistic Regression, naive bays, MLB, KNN methods, decision-making trees.

In particular, a study by Vidal and Franco confirms the 99.69% accuracy obtained using the zgpost and litgbm methods (Mhapsekar et al., 2025), showing that gradient enhancement methods provide excellent predictive properties in tasks related to assessing milk quality. Our results also confirm the observations of Singh and Goyal (Alimardanova et al., 2026), who stressed the importance of computational efficiency in IoT-based dairy tracking applications.

In addition, the excellent results obtained using the Stacking model in this study (99.69% accuracy) confirm the latest results of Kumar and Sharma (Doumchariyeva et al., 2026). These researchers showed that combining heterogeneous learning patterns using the structure of the Stacking model can improve the accuracy and reliability of predictions in food quality classification tasks. However, unlike many previous studies that focused solely on classification efficiency, this study also evaluated computational efficiency and ease of use of Digital Twins. This means that it provides a comprehensive assessment of the industrial implementation in real-time.

The main objective of this study is to systematically compare the prediction latency of classical, ensemble, and hybrid models. Although the Stacking model provides near-perfect classification, its prediction time is long—28.40 ms per 1000 samples. This makes it less suitable for real-time IoT applications. In contrast, the prediction time of the RF+KNN model is 1.50 ms, the LightGBM model is 1.89 ms, and the XGBoost model is 2.15 ms, providing a good balance between accuracy and

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

speed. This meets the practical requirements of digital twin systems (Ehsani et al., 2025; Alimardanova et al., 2026).

Practical Implications

The results of the study provide practical recommendations on intelligent milk quality control systems. For applications where both classification accuracy and computational efficiency are critical, the RF+KNN model offers the most attractive solution, achieving 100.0% across all evaluated metrics with a prediction latency of only 1.50 ms per 1000 samples. In addition, the LightGBM and XGBoost models offer alternative deployment solutions in IoT and peripheral computing space. These recommendations contribute to the creation of effective digital doubles of nutrition. They support real-time quality assessment, process management, and intelligent decision-making in dairy production systems.

Research Limitations and Future Directions

Regardless of the expected results, it is worth noting a number of limitations. Most importantly, the study was conducted using a publicly available data set on the quality of Kaggle milk, which may not fully reflect the observed variability in industrial milk production. In addition, the data set contains relatively accurate and structured measurement results. Real-time transmitted IoT sensor data often includes interference, missing values, calibration errors, and connection latency.

In addition, the studied models were evaluated in stable conditions. They did not take into account the conceptual drift or online learning scenarios often used in long-term industrial implementations. Therefore, future research should focus on testing the proposed approach using sensory data collected in real-time in dairies. Additional features include the adaptive structure of digital twins, online learning algorithms, mechanisms for detecting model deviations, and the application of the proposed structure to kefir and other traditional dairy products.

Overall, the results show that collective and hybrid machine learning models are a viable solution. They emphasize that digital food products provide a solid foundation for the twin system, and can significantly improve automated milk quality control and support intelligent decision-making.

These findings are consistent with previous studies on Digital Twin-based fermentation modeling and Markov chain-based decision support, which demonstrated the feasibility of integrating predictive models into intelligent dairy production systems (Alimardanova et al., 2026; Doumcharieva et al., 2026).

Conclusion.

This study presented a Digital Twin-based framework for real-time milk quality classification by integrating classical, ensemble, and hybrid machine learning models into an intelligent decision support system.

The experimental results demonstrated that hybrid and ensemble models consistently outperformed classical baselines. The RF+KNN hybrid achieved perfect classification (100.0% across all metrics) with the lowest prediction latency (1.50 ms), offering the most attractive balance for real-time Digital Twin applications. The Stacking model reached 99.69% but required higher computational resources (28.40

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

ms), while LightGBM provided an efficient ensemble alternative (1.89 ms) for edge computing environments.

The proposed framework provides a practical foundation for intelligent quality monitoring in smart dairy production and supports Digital Twin-driven decision making. Future research will focus on validating the proposed architecture using real industrial sensor data and deploying it within an operational Digital Twin environment.

The proposed framework extends previous research on Digital Twin modeling and intelligent decision support for dairy fermentation by applying ensemble and hybrid machine learning methods to real-time milk quality classification (Alimardanova et al., 2026; Doumchariyeva et al., 2026).

REFERENCES

Aydogdu, T., O'Mahony, J. A., & McCarthy, N. A. (2023). pH, the Fundamentals for Milk and Dairy Processing: A Review // Dairy. — Vol. 4. — No. 3. — Pp. 395–409. DOI: https://doi.org/10.3390/dairy4030026. [In Eng.].

Alimardanova, M., Doumchariyeva, Z., Zhumakhan, N., Togzhanova, K., & Tlevlessova, D. (2026). Comparative Kinetic Modeling of Ayran Fermentation with Functional Additives // Fermentation. — Vol. 12. — No. 7. — Pp. 323. DOI: https://doi.org/10.3390/fermentation12070323. [In Eng.].

Bhavsar, D., Jobanputra, Y., Swain, N. K., & Swain, D. (2023). Milk Quality Prediction Using Machine Learning // EAI Endorsed Transactions on Internet of Things. — Pp. 10. DOI: https://doi.org/10.4108/eetiot.4501. [In Eng.].

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. — Pp. 785–794. DOI: https://doi.org/10.1145/2939672.2939785. [In Eng.].

Doumchariyeva, Z., Tussupov, J., Sambetbayeva, M., Zhukabayeva, T., Yessenaliyeva, M., Kalemshariva, B., Issayev, S., Khassanova, M. (2026). Reliability reserve: A Markov chain-based metric for real-time operator decision support in ayran fermentation // Informatics. — Vol. 13. — No. 7. — Pp. 105. DOI: https://doi.org/10.3390/informatics13070105. [In Eng.].

Ehsani, S., Weller, P., & Parastar, H. (2025). Revolutionizing food integrity: Harnessing the power of ensemble learning algorithms // TrAC Trends in Analytical Chemistry. — Vol. 193. — Article 118458. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118458. [In Eng.].

Goyal, K., Kumar, P., & Verma, K. (2024). XAI-empowered IoT multi-sensor system for real-time milk adulteration detection // Food Control. — Vol. 164. — Article 110495. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110495. [In Eng.].

Huang, Y., Ghadge, A., & Yates, N. (2024). Implementation of digital twins in the food supply chain: a review and conceptual framework // International Journal of Production Research. — Vol. 62. — No. 17. — Pp. 6400–6426. DOI: https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2305804. [In Eng.].

Rajeswari K.A., M., & Priyadharshini, C. (2024). A Comprehensive Review of Recent Artificial Intelligence Techniques and IOT Applications in Dairy Farms. 2024 10th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS). — Pp. 242–247. DOI: https://doi.org/10.1109/icaccs60874.2024.10717012. [In Eng.].

Krupitzer, C., Noack, T., & Borsum, C. (2022). Digital Food Twins Combining Data Science and Food Science: System Model, Applications, and Challenges. Processes. — Vol. 10. — No. 9. — Pp. 1781. DOI: https://doi.org/10.3390/pr10091781. [In Eng.].

Keong, T. W., Husin, Z., Ismail, M. A. H., & Yasruddin, M. L. (2024). Stacked ensemble learning based on deep transfer learning models for food ingredient classification and food quality determination // Neural Computing and Applications. — Vol. 36. — No. 30. — Pp. 18705–18725. DOI: https://doi.org/10.1007/s00521-024-10233-y. [In Eng.].

Liakos, K. G., Athanasiadis, V., Bozinou, E., & Lalas, S. I. (2025). Machine Learning for Quality Control in the Food Industry: A Review // Foods. — Vol. 14. — No. 19. — Pp. 3424. DOI: https://doi.org/10.3390/foods14193424. [In Eng.].

Mhapsekar, R., Kilbane, D., Davy, S., Abraham, L., Fenelon, M., & O'Shea, N. (2025). A systematic review of the internet of things and artificial intelligence applications in milk quality monitoring and analysis // International Journal of Dairy Technology. — Vol. 78. — No. 3. Portico. DOI: https://doi.org/10.1111/1471-

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

0307.70049. [In Eng.].

Neto, H. A., Tavares, W. L. F., Ribeiro, D. C. S. Z., Alves, R. C. O., Fonseca, L. M., & Campos, S. V. A. (2019). On the utilization of deep and ensemble learning to detect milk adulteration // BioData Mining. — Vol. 12. — No. 1. DOI: https://doi.org/10.1186/s13040-019-0200-5. [In Eng.].

Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective // IEEE Access. — Vol. 8. — Pp. 21980–22012. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2020.2970143. [In Eng.].

Rao, S., & Neethirajan, S. (2025). Computational Architectures for Precision Dairy Nutrition Digital Twins // A Technical Review and Implementation Framework. DOI: https://doi.org/10.20944/preprints202506.2401.v1. [In Eng.].

Sionek, B., Szydłowska, A., Küçükgöz, K., & Kołożyn-Krajewska, D. (2023). Traditional and New Microorganisms in Lactic Acid Fermentation of Food // Fermentation. — Vol. 9. — No. 12. — Pp. 1019. DOI: https://doi.org/10.3390/fermentation9121019. [In Eng.].

Su, S., Zhong, R. Y., & Jiang, Y. (2025). Digital twin and its applications in the construction industry: A state-of-art systematic review // Digital Twin. — Vol. 2. — No. 1. DOI: https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17664.3. [In Eng.].

Verboven, P., Defraeye, T., Datta, A. K., & Nicolai, B. (2020). Digital twins of food process operations: the next step for food process models? Current Opinion in Food Science. — Vol. 35. — Pp. 79–87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.002. [In Eng.].

Zhao, B. (2025). Machine Learning-based Milk Quality Prediction // Exploring Science Academic Conference Series. — Vol. 9. — Pp. 1–14. DOI: https://doi.org/10.70267/ic-aimees.202501. [In Eng.].

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

ХАЛЫҚАРАЛЫҚ АҚПАРАТТЫҚ ЖӘНЕ КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖУРНАЛЫ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ИНФОРМАЦИОННЫХ И КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Собственник:
АО «Международный университет информационных технологий» (Казахстан, Алматы)

Главный редактор:
Колесникова Катерина Викторовна

Ответственный редактор:
Мрзабаева Раушан Жалиевна

Компьютерная верстка:
Калабай Замзагуль Ертугановна

Сайт журнала: https://journal.iitu.edu.kz
ISSN 2708–2032 (print)
ISSN 2708–2040 (online)

Подписано в печать 30.09.2026.
050040 г. Алматы, ул. Манаса 34/1, каб. 709, тел: +7 (727) 244-51-09).

Издание АО "Международного университета информационных технологий"