ISSN(online) 2959-5894
ISSN (print) 2959-5886

Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті
Казахский национальный педагогический университет имени Абая
Abai Kazakh National Pedagogical University

ХАБАРШЫ

«Физика-математика ғылымдары» сериясы
Серия «Физико-математические науки»
Series of Physics & Mathematical Sciences
№1(93)

Алматы, 2026

Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті

ХАБАРШЫ
«Физика-математика ғылымдары» сериясы №1 (93), 2026 ж.

Бас редактор:
ф.-м.ғ.д., профессор **М.А. Бектемесов**

Редакция алқасы:
Бас ред.орынбасары:
п.ғ.д., профессор **Е.Ы. Бидайбеков,**
ф.-м.ғ.д., профессор **В.Н. Косов**

Жауапты хатшылар:
п.ғ.к., қауым. профессор,
Ш.Т. Шекербекова,
п.ғ.к., қауым. профессор,
Г.А. Абдулкаримова

Ғылыми редактор
тех.ғ.д., профессор, **Н.С. Заурбеков,**
PhD доктор, қауымд. профессор м.а.,
А.Р. Рысқан

Редакциялық алқа мүшелері:
Phd.d., Professor **A. Cabada** *(Spain),*
ф.-м.ғ.д., профессор **Ф.Ф. Комаров** *(Республика Беларусь),*
Phd.d., Professor **M. Ruzhansky** *(Belgium),*
Phd.d **E. Kovatcheva** *(Bulgaria),*
ф.-м.ғ.д., профессор, РҒА корреспондент-мүшесі, **С.И. Кабанихин** *(Ресей),*
п.ғ.д., **профессор В.В. Гриншкун** *(Ресей),*
ф.-м.ғ.д., профессор **В.М. Лисицин** *(Ресей),*
п.ғ.д., профессор **Н.И. Пак** *(Ресей),*
ф.-м.ғ.д., профессор **А.Л. Семенов** *(Ресей),*
п.ғ.д., профессор, РБА академигі
А.Е. Абылқасымова,
PhD d., профессор **К. Алимхан**,
т.ғ.д., профессор **Б.С. Ахметов**,
ф.-м.ғ.д., профессор **А.С. Бердышев**,
т.ғ.д., профессор **К. Бисембаев**,
ф.-м.ғ.д., профессор **М.Н. Калимолдаев**,
т.ғ.д., профессор **М.К. Кулбек**,
ф.-м.ғ.д., профессор **С.Т. Мухамбетжанов**,
Phd.d., қауым., профессор м.а.
Ж.М. Нурмухамедова,
п.ғ.д., профессор **Б.Д. Сыдықов**,
т.ғ.д., профессор **А.К. Тулешов**

© Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, 2026

Қазақстан Республикасының Ақпарат министрлігінде тіркелген
№ 4824 – Ж - 15.03.2004
(Журнал бір жылда 4 рет шығады)
2000 жылдан бастап шығады

Басуға 27.03.2026 қол қойылды
Пішімі 60x84 1/8. Көлемі 41,875 е.б.т.
Таралымы 300 дана. Тапсырыс 621.

050010, Алматы қаласы,
Достық даңғылы, 13
Абай атындағы ҚазҰПУ-ің "Ұлағат" баспасы

М а з м ұ н ы
С о д е р ж а н и е
C o n t e n t

МАТЕМАТИКА ЖӘНЕ ФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕР МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

MATHEMATICS AND MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESSES AND MECHANICAL SYSTEMS

Ismailov Kh.B., Urinboyev A.A., Ismailov B.R.
Mathematical modeling for optimizing grain drying prior to milling ……..……. 7

Қоштыбаев Т.Б., Үмбетов Е.С., Алиева М.Е., Тугелбаева Г.Т., Жантлеуов К.Қ.
Гравитациялық теориядағы эквиваленттік принципі мен сақталу заңдарын аффиндік симметрия тұрғысында зерттеу……..... 17

Сағындықов Б.Ж., Бимұрат Ж.
Эльзаки түрлендіруі және оның қолданылуы …… 27

Татенов А.М., Жавлиева А.Т., Жаналиева Г.Ж., Қамбаш А.Ә., Файзуллина А.
Кинетикалық теориядағы тепе-теңсіздік жүйелерді стохастикалық және функционалдық модельдер арқылы зерттеу …… 42

МАТЕМАТИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ МАТЕМАТИКИ

METHODS OF TEACHING MATHEMATICS

Әбілқасымова А.Е., Хамраев Ш.И., Қосанов Б.М., Халимбетов Б.Я.
Міржақып Дулатовтың әдістемелік-математикалық мұралары туралы …… 53

Берикханова Г.Е., Құдайбергенов Д.С., Искакова М.Т.
Стандартты емес трансцендентті теңдеулерді шешу әдістері .. 65

Zhunussova R.A., Bokayeva M.S., Zhapakova A.A.
Developing students' creative thinking in the process of studying projective geometry …… 75

Шмигирилова И.Б., Таджигитов А.А., Дуткин М.А.
Механизмы педагогической поддержки в обучении математике: скаффолдинг как технология сопровождения учебной деятельности …….. 85

Казахский национальный педагогический университет имени Абая

ВЕСТНИК
Серия «Физико-математические науки»
№1 (93), 2026 г.

Главный редактор:
д.ф.-м.н., профессор **М.А. Бектемесов**

Редакционная коллегия:

Зам.главного редактора:
д.п.н., профессор **Е.Ы. Бидайбеков,**
д.ф.-м.н., профессор **В.Н. Косов**

Ответ. секретари:
к.п.н., асс. профессор **Ш.Т. Шекербекова,**
к.п.н., асс. профессор **Г.А. Абдулкаримова**

Научный редактор
д.т.н., профессор, **Н.С. Заурбеков**,
PhD д., и.о. профессор **А.Р. Рысқан**

Члены редколлегии:
Phd.d. **A.Cabada** *(Spain),*
д.ф.-м.н., профессор **Ф.Ф. Комаров** (Республика Беларусь),
Phd.d. **M. Ruzhansky** *(Belgium),*
Phd.d **E. Kovatcheva** *(Bulgaria),*
д.ф.-м.н., профессор, член-корр. РАН **С.И. Кабанихин** *(Ресей),*
д.п.н., профессор **В.В. Гриншкун** *(Россия),*
д.ф.-м.н., профессор **В.М. Лисицин** *(Ресей),*
д.п.н., профессор **Н.И. Пак** *(Россия),*
д.ф.-м.н., профессор **А.Л. Семенов** *(Россия),*
д.п.н., профессор, академик РАН **А.Е. Абылкасымова,**
PhD d., профессор **К. Алимхан**
д.т.н., профессор **Б.С. Ахметов**,
д.ф.-м.н., профессор **А.С. Бердышев**,
д.т.н., профессор **К. Бисембаев**,
д.ф.-м.н., профессор **М.Н. Калимолдаев**,
д.т.н., профессор **М.К. Кулбек**,
д.ф.-м.н., профессор **С.Т. Мухамбетжанов**,
Phd.d., асс., профессор и.о. **Ж.М. Нурмухамедова**,
д.т.н., профессор **Б.Д. Сыдықов**,
д.т.н., профессор **А.К. Тулешов**

© Казахский национальный педагогический университет им. Абая, 2026

Зарегистрирован в Министерстве информации
Республики Казахстан,
№ 4824 - Ж - 15.03.2004
(периодичность – 4 номера в год)
Выходит с 2000 года

Подписано в печать 27.03.2026.
Формат 60x84 $^{1}/_{8}$. Об. 41,875 уч.-изд.л.
Тираж 300 экз. Заказ 621.

050010, г. Алматы, пр. Достык, 13,
Издательство «Ұлағат» КазНПУ им. Абая

ИНФОРМАТИКА

COMPUTER SCIENCE

Abdrakhmanov R., Sultan D., Nazarbek T., Iskakov T., Yagaliyeva B.
Transformer based BI-LSTM deep learning model for automatic cyberbullying detection in kazakh textual data…….. 100

Адилжанова С.А., Миркасимова Т.Ш., Абдулкаримова Г.А., Гусманова Ф.Р.
Ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін бағалау үдерістерін автоматтандыру……..… 115

Aitim A.K.
Semantic role labeling for kazakh: models and datasets..... 128

Алханова Г.А., Алимбекова И.А.
Қазақ тіліне арналған семантикалық рөлдерді белгілеу: модельдер және деректер жинағы …….. 141

Бажибаева А.Б., Исабаева Д.Н., Алдашев С.М., Байпакбаева С.
Компьютерное зрение для вовлеченности учащихся в онлайн обучении: обзор литературы …….. 149

Байдулла А.М., Жайсанова Д.С., Мансурова М.Е., Мұса А.
Llm негізіндегі білім беру шешімдерін қолдау жүйелерін библиометриялық талдау ……. 160

Baimussayeva A.B., Torebay N.D., Karzhaubekova S.S., Kurakbayeva S.D., Azhibekova Zh.Zh.
Real-time detection of cardiac pathologies using an intelligent digital stethoscope ……. 176

Beissenova G.I., Ospanova R.D., Balgymbekova U.B., Abdrakhmanoava G.M., Zhidebayeva A.N.
Neural network – based security framework for iot devices ……. 187

Бектемесов Ж.М., Турарбек А.Т., Социалова Ұ.Қ., Нұрғали А.А.
Әлеуметтік желілердегі фейктердің таралуын сандық модельдеу …….. 196

Капалова Н.А., Ергеш Н.С.
Қорғалған аутентификация схемалары: әдістері және қауіпсіздік талдауы …….. 205

Сакыпбекова М.Ж., Солтангельдинова М.К.
Өсімдік ауруларын тануда қолданылатын бес терең оқыту әдістеріне шолу ……. 218

Sembayev T., Karsenbay Zh., Alimkhanova D., Sydykov A.
Predictive modeling of employee burnout via speech analysis: a systematic literature review ……. 227

Sembina G.
Machine learning-based model for it project cost estimation ……. 242

Abai Kazakh National Pedagogical University

BULLETIN
Ser. Physics & Mathematical Sciences

№1(93), 2026.

Editor-in-Chief
Dr. Sci. **M.A. Bektemesov**

Deputy Editor-in-Chief:
Dr. Sci. (Ped.), **Ye.Y. Bidaibekov,**
Dr. Sci. **V.N. Kosov**

Responsible editorial secretary:
Cand. Sci. (Ped.) **Sh.T. Shekerbekova**,
Cand. Sci. (Ped.) **G.A. Abdulkarimova**

Scientific editor
Ph.D., professor, **N.S. Zaurbekov**,
PhD, associate Professor **A.R. Ryskan**

Editorial board:
Phd.d. **A. Cabada** *(Spain),*
Dr. Sci. **F.F. Komarov** *(Republic of Belarus),*
Phd.d. **M. Ruzhansky** (Belgium),
Phd.d **E. Kovatcheva** (Bulgaria),
Dr.Sc. **S.I. Kabanikhin** (Russia),
Dr.Sci. **V.V. Grinshkun** (Russia),
Dr. Sci. **V.M. Lisicin** (Russia),
Dr. Sci. (Ped.) **N.I. Pak** (Russia),
Dr. Sci. **A.L. Semenov** (Russia),
Dr. Sci. (Ped.) **A.Ye. Abylkasymova**,
*Dr.Sci***. K. Alimhan**,
Dr.Sci. **B.S. Akhmetov**,
Dr. Sci. **A.S. Berdyshev**,
Dr. Sci. **K. Bisembaev**,
Dr. Sci. **M.N. Kalimoldayev**,
Dr.Sci.(Engineering) **M.K. Kulbek**,
Dr. Sci. **S.T. Mukhambetzhanov**,
Phd.d. **Zh.M. Nurmukhamedova**,
Dr. Sci. (Ped.) **B.D. Sydykov**,
Dr.Sci.(Engineering) **A.K. Tuleshov**

© Abai Kazakh National Pedagogical University, 2026

Registered in the Ministry of Information of the Republic of Kazakhstan,
№ 4824 - Ж - 15.03.2004
(Periodicity: 4 issues per year)
Published since 2000

Signed to print 27/03/2026
Format 60x84 $^{1}/_{8}$. Vol. 41,875 p.
Printing 300 copies. Order 621.

Publishing and Editorial:
050010, 13 Dostyk av., Almaty, Kazakhstan
Publisher "Ulagat" Abai KazNPU

Тойганбаева Н.А., Әбдіманап Ғ.,
Муса А., Абдурахмонова Н.
Қазақ тіліне арналған LLM үшін деректерді OCR арқылы дайындау …… 251

Узак Д., Мералиев М.М., Серек А.Г.,
Хачатрян А.К., Сексенова Д.У.
Разработка и внедрение систем автоматизированного тестирование на основе искусственного интеллекта для повышения качества программного обеспечения …….. 261

ИНФОРМАТИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ.
БІЛІМ БЕРУДІ АҚПАРАТТАНДЫРУ

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ИНФОРМАТИКИ.
ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

METHODS OF TEACHING COMPUTER SCIENCE.
INFORMATIZATION OF EDUCATION

Бостанов Б.Г., Абдисаметова А.А.,
Смаилова Д.А., Тойшыбек Т.Т.
Оқушыларда алгоритмдік ойлау дағдыларын қалыптастыруда жасанды интеллектке негізделген оқытудың қажеттілігі ……. 271

Kamalova G.B., Turashova Sh.P.,
Alimbay A.M., Nauryzbayev D.B., Amangeldin A.A.
Power Bi as a data visualization and analysis tool in the department's educational management …… 280

Мұсират Е., Бидайбеков Е.Ы., Пак Н.И.,
Ошанова Н.Т., Сәлғожа И.Т.
Педагогтерді IT-микробіліктіліктерге оқытуға арналған адаптивті EdTech-платформалар: халықаралық және қазақстандық тәжірибеге шолу …….. 289

Сағымбаева А.Е., Жамкеева А.Б.,
Жаксылыков А.Е., Қожан А.Е.
Студенттердің программалау есептерін шешу көрсеткішін бағалау моделі …….. 300

Сугуралиева А.М., Тогайбаева А.К.,
Рамазанова Д.Ж., Сагиева А.А., Абляшева А.М.
Эмоциональный интеллект как медиатор эффективности педагогических решений, принимаемых при поддержке искусственного интеллекта в высшей школе …… 311

Tursynov N.A., Turganbayeva A.R.
Implementing AI-Based personalized learning in middle-school informatics: a hybrid instructional model …… 324

МАТЕМАТИКА ЖӘНЕ ФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕР МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

МАТЕМАТИКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

MATHEMATICS AND MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESSES AND MECHANICAL SYSTEMS

IRSTI 27.39.19

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.001

Kh.B. Ismailov[1]*, A.A. Urinboyev[2], B.R. Ismailov[1,2]

[1]M. Auezov South Kazakhstan research university, Shymkent, Republic of Kazakhstan
[2]Fergana state technical university, Fergana, Republic of Uzbekistan
**e-mail: ismailovkhb@mail.ru*

MATHEMATICAL MODELING FOR OPTIMIZING GRAIN DRYING PRIOR TO MILLING

Abstract

This study presents a mathematical description of grain pre-drying formulated as a coupled system of ordinary differential equations that captures the essential heat and mass exchange between the grain and the drying agent. The model incorporates the principal operational and material parameters, including the initial moisture content of the grain and the effective heat and mass transfer coefficients. A parametric investigation is performed to quantify the influence of these factors on dehydration kinetics and on the time required to reach technologically acceptable moisture levels. The numerical predictions are evaluated against experimental measurements and demonstrate statistically acceptable agreement, supporting the adequacy of the proposed formulation for engineering analysis. The developed framework can be employed for preliminary estimation of drying duration, sensitivity assessment of process parameters, and as a foundation for subsequent extensions that account for spatial gradients of moisture and temperature in distributed drying models.

Keywords: grain drying, mathematical modeling, heat and mass transfer, parametric analysis, model adequacy.

Х.Б. Исмаилов[1]*, А.А. Уринбоев[2], Б.Р. Исмаилов[1,2]
[1] Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан
[2] Ферганский государственный технический университет, г. Фергана, Республика Узбекистан

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПЕРЕД ПОМОЛОМ

Аннотация

В статье представлено математическое моделирование процесса предварительной сушки зерна на основе системы связанных обыкновенных дифференциальных уравнений тепломассопереноса. Рассмотрены основные параметры процесса – начальная влажность зерна, коэффициенты тепло- и массообмена. Проведен параметрический анализ влияния этих факторов на кинетику обезвоживания. Численные результаты сопоставлены с экспериментальными данными и подтверждают адекватность модели. Предложенная модель может быть использована для анализа времени сушки и влияния ключевых параметров на динамику процесса, а также служит основой для дальнейшего развития моделей с пространственными градиентами влажности.

Ключевые слова: сушка зерна, математическое моделирование, тепломассоперенос, параметрический анализ, адекватность модели.

Х.Б. Исмаилов[1]*, А.А. Уринбоев[2], Б.Р. Исмаилов[1,2]
[1]М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан
[2]Ферғана мемлекеттік техникалық университеті, Ферғана қ., Өзбекстан Республикасы

ДӘНДІ ҰНТАҚТАУ АЛДЫНДА КЕПТІРУ ПРОЦЕСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Мақалада жылу және масса алмасу процестерін сипаттайтын өзара байланысқан қарапайым дифференциалдық теңдеулер жүйесіне негізделген дәнді алдын ала кептіру процесінің математикалық модельдеу процесі келтірілген. Процестің негізгі параметрлері ретінде дәннің бастапқы ылғалдылығы, жылу және масса алмасу коэффициенттері қарастырылған. Аталған факторлардың сусыздану кинетикасына әсерін бағалау мақсатында параметрлік талдау жүргізілді. Сандық нәтижелер эксперименттік деректермен салыстырылып, модельдің адекваттылығын растайды. Ұсынылған модель кептіру уақыты мен негізгі параметрлердің процесс динамикасына әсерін талдауға мүмкіндік береді, сондай-ақ ылғалдылықтың кеңістіктік градиенттерін ескеретін модельдерді одан әрі дамыту үшін негіз болып табылады.

Түйін сөздер: дәнді кептіру, математикалық модельдеу, жылу және масса алмасу, параметрлік талдау, модельдің адекваттылығы.

Introduction

Drying of grain with elevated initial moisture content remains one of the most energy-demanding operations in post-harvest processing and flour-milling technology [1-4]. From a theoretical standpoint, the process is commonly described through coupled heat and mass transfer relations together with kinetic equations governing the evolution of grain moisture content over time [5-8]. Comprehensive overviews of contemporary drying technologies, their physical principles, practical implementation, and modeling approaches are provided in [9], while targeted strategies aimed at lowering energy consumption during grain dehydration are discussed in [10].

In recent years, the use of mathematical modeling and numerical simulation has intensified as a means of improving drying performance for grain and other agricultural products. For example, Zhang et al. [11] formulated a corn-drying model derived from energy and mass conservation laws, implemented it in MATLAB, and validated the predicted dehydration curves against experimental observations. Wang et al. [12] investigated nonlinear models of wheat drying in a fluidized-bed configuration using finite-element discretization, reporting accurate approximation of moisture-loss trajectories and potential reductions in energy demand relative to conventional regimes. The role of equipment geometry and airflow organization has been further explored by Chen et al. [13] through CFD simulations, demonstrating their influence on the uniformity of temperature and moisture fields within the drying chamber. Rahman et al. [14] showed that adaptive control schemes supported by artificial neural-network models can provide real-time moisture prediction, thereby improving product quality and limiting avoidable thermal losses.

Unlike systems such as those considered in [15], where interphase mass transfer is governed predominantly by dynamic factors, grain drying in industrial practice is often constrained by physicochemical mechanisms of heat and mass transfer, including evaporation at the surface and internal moisture migration. The literature reviewed above therefore reinforces the practical value of embedding mathematical models into the monitoring and control loop of drying units used at flour-milling enterprises. At the same time, despite clear progress, the engineering adoption of heat- and mass-transfer based models and robust numerical solution techniques remains limited, and their capabilities are not yet fully exploited in routine process design and operation.

Against this background, the present study proposes a mathematical description of preliminary grain drying formulated as a system of coupled ordinary differential equations representing heat and mass exchange between the grain and the drying agent. The scientific contribution of the work lies in providing a rigorous justification of the associated Cauchy problem: under physically meaningful constraints on the parameters, the existence and uniqueness of the solution are established, and the model behavior is examined through a parametric study that quantifies how the initial grain moisture

content and the heat and mass transfer coefficients affect dehydration kinetics. From an applied perspective, the model (i) enables systematic evaluation of the sensitivity of drying dynamics to key operating parameters, (ii) supports preliminary estimates of drying duration and qualitative analysis of solution trajectories, and (iii) offers a tractable foundation for subsequent extensions that incorporate spatial moisture gradients and more realistic initial and boundary conditions tailored to specific dryer configurations.

Research methodology. To characterize the temporal evolution of the main drying-process variables, a lumped-parameter mathematical model was formulated in the form of coupled ordinary differential equations (ODEs). The model follows classical heat and mass transfer considerations while preserving a level of simplicity suitable for preliminary engineering analysis. The following assumptions were adopted:

Spatial averaging of moisture content. The grain moisture content is treated primarily as a function of time. Although moisture may vary within the grain layer and along spatial coordinates, these gradients are neglected in the present first-order description.

Constant transfer parameters. Heat and mass transfer coefficients are assumed not to depend on local physicochemical conditions and are taken as constant during the considered drying interval.

Uniform supply of the drying agent. Mixing and segregation effects in the grain bed are not modeled; the hot air is assumed to be supplied uniformly to the grain volume.

Assumptions (1)-(3) reduce model fidelity relative to distributed (PDE-based) formulations; however, they allow the moisture and temperature dynamics to be expressed as a tractable ODE system. The obtained numerical solutions were subsequently compared with available experimental data to verify that the model provides a reasonable approximation under typical industrial conditions.

The principal state variables and parameters are defined as follows:

X(t) – grain moisture content, kg moisture/kg dry matter;

Tg(t) – drying-air temperature, °C;

Tz(t) – grain temperature, °C;

h – convective heat transfer coefficient between air and grain, W/(m²·K);

A – effective heat/mass transfer area, m²;

ρg – density of the drying agent (air), kg/m³;

cg – specific heat of air, J/(kg·K);

cz – specific heat of grain, J/(kg·K);

L – latent heat of moisture evaporation, J/kg;

km – mass transfer coefficient, kg/(m²·s);

Wg (t)– absolute humidity of air, kg water/kg dry air;

Wge – equilibrium air humidity under the specified conditions, kg water/kg dry air.

mz – mass of processed grain, kg;

mg - mass of drying air participating in heat exchange (lumped equivalent), kg.

The drying process was described by the following system [6–7]:

1. Moisture balance for grain

$$\frac{dX}{dt} = -k_m \mathrm{A}(\mathrm{W_g} - \mathrm{W_{ge}}), \tag{1}$$

where $(\mathrm{W_g} - \mathrm{W_{ge}})$- represents the driving force for moisture removal in the adopted formulation.

2. Heat balance for grain,

$$\frac{dTz}{dt} = \frac{A}{m_z c_z}(T_g - T_z) - \frac{L}{c_z}\frac{dX}{dt}. \tag{2}$$

3. Heat balance for air

$$\frac{dT_g}{dt} = -\frac{A}{m_g c_g}(T_g - T_z). \quad (3)$$

4. Humidity balance for air

$$\frac{dW_g}{dt} = \frac{k_m A}{\rho_g}(X - W_g). \quad (4)$$

Equations (1)-(4) jointly couple moisture loss, phase-change effects, and heat exchange between the grain and the drying agent. Their combined analysis enables tracking the interdependence of grain moisture content, grain temperature, air temperature, and air humidity throughout the drying interval.

The Cauchy problem is completed by the following initial conditions:

$$X(0) = X_0, \quad (5)$$
$$T_z(0) = T_{z0}, \quad (6)$$
$$T_g(0) = T_{g0}, \quad (7)$$
$$W_g(0) = W_{g0}, \quad (8)$$

The coefficients h, km and A depend on the drying regime, airflow velocity, and grain size. If required, the framework can be extended by introducing additional relations for airflow dynamics; in the present study, averaged values typical for industrial grain drying were used:

h=30 W/(m²K);
A=5 m²;
ρg =1.2 kg/m³;
cg=1005 J/(kg K);
cz=2000 J/(kgK);
L=2.25·106 J/kg;
km=0.02 kg/(m²);
Wg = 0.015 kg of water/kg of dry air;
Wge = 0.012 kg of water/kg of dry air.

The ODE system (1)-(8) was solved numerically using the classical fourth-order Runge-Kutta method with adaptive step-size control to ensure stable integration and adequate accuracy across regimes with different initial moisture contents and transfer coefficients.

Let the system (1)-(4) be written in vector form:

$$y'(t) = F(t,y),\ y(0) = y0, \quad (9)$$

where $y = (w,Tg,Ta,Y)^T$, and the model parameters (h, k, A, ρa, ca, cg, L, …) are positive finite constants. If F is continuous in t and locally Lipschitz in y on a domain $D \subset R4$ containing y0, then by the Picard-Lindelof theorem, there exists a unique local solution y(t) on [0, t*). If, in addition, F satisfies a linear growth bound

$$|F(t,y)| \le C(1+|y|) \quad (10)$$

For all $y \in D$ and some $C > 0$, the solution extends to any finite interval [0,T]. Moreover, for physically admissible initial data $X_0 \ge 0$ and $W_{g0} \ge 0$, the corresponding components remain non-negative throughout the interval of existence, consistent with the physical meaning of moisture-related state variables.

Research results. The numerical integration of the coupled heat and mass-transfer model yields time-dependent trajectories for grain moisture content and related state variables. The predicted

moisture decay curves are summarized in Figure 1, where three initial moisture levels (X0=35%, 32%, and 27%) are compared. In all cases, the moisture content decreases monotonically and approaches the target technological range. However, the time required to reach the commonly specified residual moisture (approximately 8%) varies substantially with the initial condition.

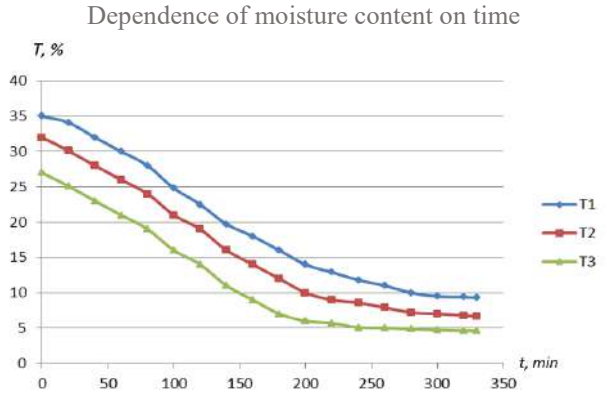


Figure 1. Dependence of moisture content on time for initial moisture content of 35%, 32%, and 27%

A sensitivity assessment was performed to clarify how the principal parameters influence dehydration kinetics. Figure 2 illustrates the effect of initial grain moisture on the drying curve, confirming that higher X0 leads to a longer dehydration period under the same external regime.

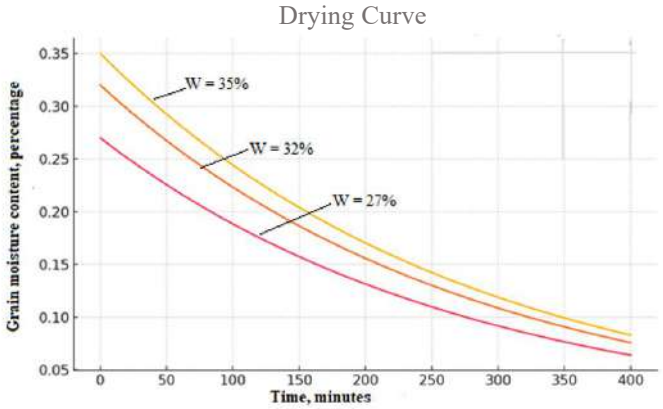


Figure 2. Effect of initial moisture content on drying kinetics

The influence of convective heat exchange is shown in Figure 3: increasing the heat transfer coefficient intensifies heat supply to the grain, accelerates phase change, and shortens the time needed to reduce moisture.

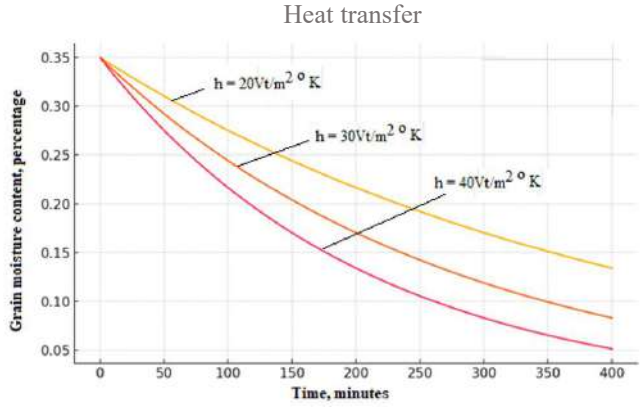


Figure 3. Effect of heat transfer coefficient on drying kinetics

Similarly, Figure 4 demonstrates that larger mass transfer coefficients increase the moisture-removal rate by strengthening the vapor moisture exchange between the grain surface and the drying agent.

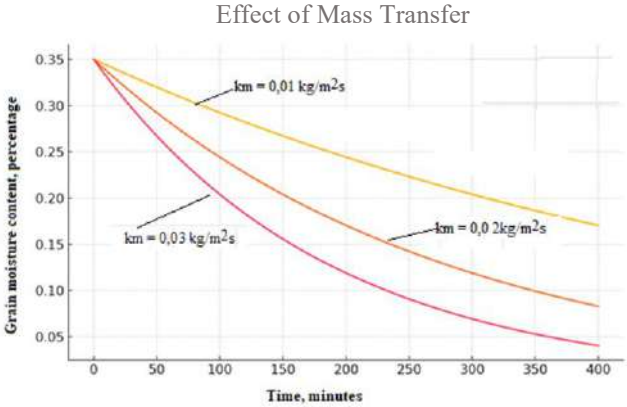


Figure 4. Effect of mass transfer coefficient on drying kinetics

To evaluate the agreement between numerical predictions and experimental observations, the adequacy of the model was tested using a paired Student's t-test in accordance with standard procedures for statistical validation of mathematical models [16,17]. Let X1(ti) denote the model-predicted moisture content and X2(ti) the experimentally measured value at the same sampling time ti. The paired differences are computed as

$$d_i = X_1\,(t_i) - X_2(t_i). \tag{11}$$

The main difference is:

$$\bar{d} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i\,\alpha. \tag{12}$$

and the sample standard deviation of differences is

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(d_i - \bar{d}\right)^2}. \tag{13}$$

The test statistic is then

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \tag{14}$$

For the considered dataset (n = 8), the degrees of freedom are f = n−1=7. Under the conditions of this study, the calculated statistic is t =2.00, which corresponds to a two-sided probability value of approximately p ≈ 0.085. Since p > 0.05 at the significance level α=0.05, the null hypothesis of zero mean difference cannot be rejected. Therefore, the discrepancies between the modeled and experimental moisture contents are not statistically significant at the 5% level, and the model may be regarded as adequate for approximate engineering estimates within the studied regime. The paired-samples test was performed for the case X0=35%. The experimental and simulated values, as well as the difference calculations, are provided in Tables 1-2.

For this dataset, $\bar{d} = 0.017004, n = 8$, and the computed statistic is t =2.002 with p = 0.085. Consequently, at α = 0.05, the model experiment differences are statistically insignificant, supporting the adequacy of the proposed model for preliminary drying-time calculations and regime comparison.

Table 1. Initial data

№	Time, min	Model moisture (X1)	Experimental moisture (X2)
1	0	0.350	0.341
2	50	0.290	0.301
3	100	0.240	0.231
4	150	0.190	0.181
5	200	0.140	0.145
6	250	0.110	0.072
7	300	0.080	0.046
8	350	0.080	0.069

Table 2. Differences between paired values

№	Difference ($d_i = X1 - X_2$)	$(d_i - \bar{y})^2$
1	0.0094	0.000007
2	-0.0109	0.000524
3	0.0093	0.000008
4	0.0093	0.000007
5	-0.0048	0.000285
6	0.0383	0.000688
7	0.0345	0.000505
8	0.0112	0.000001

Discussion

The performed simulations make it possible to distinguish the parameters that most strongly govern grain dehydration under the adopted drying regime. In the proposed lumped formulation, the drying duration is controlled primarily by the initial grain moisture content and by the intensities of heat and mass exchange between the grain and the drying agent, represented through the corresponding transfer coefficients. The parametric trends obtained from the numerical solution are physically consistent: higher initial moisture content increases the amount of water to be removed and therefore prolongs the process, whereas increases in the heat and mass transfer coefficients accelerate moisture removal by enhancing energy delivery for evaporation and strengthening the moisture-vapor exchange with the air stream.

The model predicts that the conventional target moisture range for milling preparation (approximately 8-10%) is reached at markedly different times depending on the initial condition. For the considered parameter set, the required moisture level is achieved after about 300 min for X0=35%, 250 min for X0=32%, and 170 min for X0=27%. These estimates provide a practical, first-order characterization of dehydration kinetics and offer a basis for comparison with experimental drying curves and for rapid evaluation of alternative operating regimes.

From an engineering standpoint, the developed ODE-based model is therefore suitable for preliminary calculations of drying time and for sensitivity analysis aimed at identifying the most influential process parameters. At the same time, the simplifying assumptions imply that spatial non-uniformities in temperature and moisture are not represented. A natural direction for further development is the transition to distributed formulations based on partial differential equations that account for moisture gradients within the grain layer (and, if necessary, within the kernel), as well as more detailed initial and boundary conditions reflecting specific dryer geometry, airflow patterns, and nonstationary operating modes.

Conclusion

Grain conditioning prior to milling remains an energy-intensive stage of post-harvest processing, and its rational design requires an explicit understanding of the coupled heat and mass transfer mechanisms that govern moisture removal. In this work, a systems-based framework was developed in which the drying process is represented by a set of coupled ordinary differential equations describing the exchange of heat and moisture between the grain and the drying agent. The combination of model-based simulation and statistical adequacy assessment provides a practical tool for evaluating how operating and material parameters affect dehydration dynamics.

The numerical experiments confirm three key outcomes. First, the time required to reach the target technological moisture level exhibits pronounced sensitivity to the initial moisture content of the grain. Second, increases in the heat and mass transfer coefficients systematically intensify dehydration and shorten the drying period, reflecting enhanced energy delivery for evaporation and stronger moisture exchange with the air stream. Third, the formulation is readily adaptable to specific industrial conditions through parameter identification and by specifying appropriate initial states, which supports its use for preliminary engineering estimates.

A three-factor parametric analysis (initial moisture content, heat transfer coefficient, and mass transfer coefficient) demonstrates the dominant role of these parameters in shaping the drying kinetics; the resulting curves provide a clear visualization of the solution behavior and its sensitivity to regime changes. Comparison of simulated and experimental moisture data using a paired Student's t-test indicates that the observed discrepancies are not statistically significant at the 5% significance level ($\alpha=0.05$, $p>0.05$), which supports the adequacy of the model for analyzing drying dynamics within the investigated range. The results also emphasize the inherently nonlinear nature of grain dehydration, where the evolution of moisture removal depends on both the initial moisture content and the thermal conditions of the process.

Further development of the presented approach is naturally associated with moving from a lumped description to distributed models formulated in two- and three-dimensional domains. Such an extension is motivated by the presence of spatial gradients of temperature and moisture in real dryers and by the influence of chamber geometry and airflow organization on local transfer rates. As reported in prior studies, multidimensional heat and mass transfer models provide a more realistic representation of moisture and temperature fields and improve the predictive accuracy of drying regimes [18-20]. Implementing these distributed formulations would therefore broaden the applicability of the proposed modeling framework for the analysis, design, and optimization of industrial grain drying systems.

Список использованных источников

[1] Яруллина Г.Р. Управление энергосбережением на промышленном предприятии. – Казань: КГФЭИ, 2003. -111 с.

[2] M. K. Bezrodny, V. V. Vovk. Energy efficiency of heat pump continuous flow grain dryers. Energy and Automation. – 2025. – No.3. https://doi.org/10.31548/energiya3(79).2025.125.

[3] Гончаренко В. М., Попов В. Ю. Методы оптимальных решений в экономике и финансах. – М.: КНОРУС, 2014. – 400 с.

[4] Al Momani D., Al Turk Y., Abuashour M.I., Khalid H.M., et al. Energy saving potential analysis applying factory scale energy audit – A case study of food production. Heliyon, 2023. Vol. 9, No.3. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14216.

[5] Уринбоев А.А., Исмаилов Б.Р. О проблемах разработки АСУ подготовки зерна на мукомольных комбинатах // Тр.межд.научн.-практ.конференции «Ауэзовские чтения - 22: Академик К. Сатпаев основоположник казахстанской науки». Шымкент: ЮКУ им. М.Ауэзова. – 2024. – Т. 5. – С. 209-213.

[6] Solaja O.A., Abiodun J.A., Abioro M., & Ekpudu J. E. Application of linear programming techniques in production planning. International Journal of Applied Operational Research. Computers and Industrial Engineering, 2019. Vol. 9, No.3, pp.11-19.

[7] Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – СПб.: Лань. 2011. – 352 с. http://e.lanbook.com/view/book/2027/.

[8] Аттетков А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С. Методы оптимизации. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 439 с.

[9] Атаназевич В.И. Сушка зерна. – М.: ДеЛи принт.2007. – 480 с.

[10] Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. – М.: Колос-С, 2004. – 240 с.

[11] S. Wei, Z. Wang, F. Wang, W. Xie, P. Chen, D. Yang. Simulation and experimental studies of heat and mass transfer in corn kernel during hot air drying. Food and Bioproducts Processing. 2019. Vol. 117, pp. 360-372. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.006.

[12] Li X., Yang K., Wang Y., & Du X. Simulation study on coupled heat and moisture transfer in grain drying process based on discrete element and finite element method. Drying Technology. 2023. Vol. 41, No. 12, pp. 2027-2041. https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2213767.

[13] Azmir J., Hou Q., & Yu A. CFD-DEM simulation of drying of food grains with particle shrinkage. Powder Technology. 2019. Vol. 343, pp. 792–802. https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2018.11.097.

[14] Liu X., Chen X., & Wu W. A neural network for predicting moisture content of grain drying process using genetic algorithm. Food Control. 2007. Vol. 18, No. 8, pp. 928-933. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.05.010.

[15] B. Ismailov, Kh. Ismailov, A.Shambilova, Zh. Iztaev, G. Tileuov. Simulation of Hydrodynamics and Mass Transfer in Separated Flows Past Packings in Technological Apparatuses. Chemical Engineering Transactions. 2023. Vol. 100, pp.349-354. https://doi.org/10.3303/CET23100059.

[16] Montgomery D. C., Peck E. A., & Vining G. G. Introduction to linear regression analysis. Wiley. 2012.

[17] Draper N. R., & Smith H. Applied regression analysis. Wiley. 1998. https://doi.org/10.1002/9781118625590.

[18] Datta A. K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. Journal of Food Engineering. 2007. Vol. 80, No. 1, pp. 80-95. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013.

[19] Białobrzewski I., Zielińska M., Mujumdar A. S., & Markowski M. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 51, No. 19-20, pp. 4704-4716. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.031.

[20] Ranjan R., Irudayaraj J., Jun S. A three-dimensional control volume approach to modeling heat and mass transfer in foods materials. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 2001. Vol. 44, No. 6, pp. 1975-1982. https://doi.org/10.13031/2013.6996.

References

[1] Yarullina G.R. (2003) Upravlenie energosberezheniem na promyshlennom predprijatii [Energy saving management at an industrial enterprise]. Kazan: Kazan State Institute of Finance and Economics. 111 p. (in Russian)

[2] M. K. Bezrodny, V. V. Vovk. Energy efficiency of heat pump continuous flow grain dryers. Energy and Automation. – 2025. – No. 3. https://doi.org/10.31548/energiya3(79).2025.125.

[3] Goncharenko V.M., Popov V.Yu. (2014) Metody optimal'nyh reshenij v jekonomike i finansah [Methods of optimal decision-making in economics and finance]. Moscow: KNORUS. 400 p. (in Russian)

[4] Al Momani D., Al Turk Y., Abuashour M.I., Khalid H.M., et al. Energy saving potential analysis applying factory scale energy audit – A case study of food production. Heliyon. – 2023. – Vol. 9, No. 3. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14216.

[5] Urinboev A.A., Ismailov B.R. O problemah razrabotki ASU podgotovki zerna na mukomol'nyh kombinatakh [On the problems of developing automated control systems for grain preparation at flour mills]. Tr. mezhd. nauchn.-prakt. konf. «Aujezovskie chtenija – 22». Shymkent: M. Auezov South Kazakhstan University. – 2024. – Vol. 5. – Pp. 209-213. (in Russian)

[6] Solaja O.A., Abiodun J.A., Abioro M., Ekpudu J.E. Application of linear programming techniques in production planning. International Journal of Applied Operational Research. Computers and Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 9, No. 3. – Pp. 11-19.

[7] Akulich I.L. (2011) Matematicheskoe programmirovanie v primerah i zadachah [Mathematical programming: examples and problems]. Saint Petersburg: Lan Publishing House. 352 p. http://e.lanbook.com/view/book/2027/. (in Russian)

[8] Attetkov A.V., Galkin S.V., Zarubin V.S. (2001) Metody optimizacii [Optimization methods]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 439 p. (in Russian)

[9] Atanazevich V.I. (2007) Sushka zerna [Grain drying]. Moscow: DeLi Print. 480 p. (in Russian)

[10] Malin N.I. (2004) Energosberegajushhaja sushka zerna [Energy-saving grain drying]. Moscow: Kolos-S. 240 p. (in Russian)

[11] S. Wei, Z. Wang, F. Wang, W. Xie, P. Chen, D. Yang. Simulation and experimental studies of heat and mass transfer in corn kernel during hot air drying. Food and Bioproducts Processing. – 2019. – Vol. 117. – Pp. 360-372. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.006.

[12] Li X., Yang K., Wang Y., Du X. Simulation study on coupled heat and moisture transfer in grain drying process based on discrete element and finite element method. Drying Technology. – 2023. – Vol. 41, No. 12. – Pp. 2027-2041. https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2213767.

[13] Azmir J., Hou Q., Yu A. CFD–DEM simulation of drying of food grains with particle shrinkage. Powder Technology. – 2019. – Vol. 343. – Pp. 792–802. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.097.

[14] Liu X., Chen X., Wu W. A neural network for predicting moisture content of grain drying process using genetic algorithm. Food Control. – 2007. – Vol. 18, No. 8. – Pp. 928-933. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.05.010.

[15] Ismailov B., Ismailov Kh., Shambilova A., Iztaev Zh., Tileuov G. Simulation of hydrodynamics and mass transfer in separated flows past packings in technological apparatuses. Chemical Engineering Transactions. – 2023. – Vol. 100. – Pp. 349-354. https://doi.org/10.3303/CET23100059.

[16] Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. (2012) Introduction to linear regression analysis. Wiley.

[17] Draper N.R., Smith H. (1998) Applied regression analysis. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118625590.

[18] Datta A.K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. Journal of Food Engineering. – 2007. – Vol. 80, No. 1. – Pp. 80-95. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013.

[19] Białobrzewski I., Zielińska M., Mujumdar A.S., Markowski M. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51, No. 19–20. – Pp. 4704-4716. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.031.

[20] Ranjan R., Irudayaraj J., Jun S. A three-dimensional control volume approach to modeling heat and mass transfer in food materials. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. – 2001. – Vol. 44, No. 6. – Pp. 1975-1982. https://doi.org/10.13031/2013.6996.

ҒТАХР 29.05.15

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.002

Т.Б. Қоштыбаев[1], Е.С. Үмбетов[1]*, М.Е. Алиева[2], Г.Т. Тугелбаева[1], К.Қ. Жантлеуов[2]

[1] Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[2]Абай атындағы Казақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
**e-mail: umbetov.e@qyzpu.edu.kz*

ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ ТЕОРИЯДАҒЫ ЭКВИВАЛЕНТТІК ПРИНЦИПІ МЕН САҚТАЛУ ЗАҢДАРЫН АФФИНДІК СИММЕТРИЯ ТҰРҒЫСЫНДА ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Мақалада жалпыламалы салыстырмалылық теориясының ковариаттылық постулаты, эквиваленттілік принципі, координаталар жүйесі және сақталу заңдарының ерекшеліктері мен маңызына қатысты есептеулер жүргізілген. Бөлшектің еркін қозғалысы кеңістік–уақыт геометриясы тұрғысында және аффиндік симметрия тұтастық шеңберінде қарастырылды. Евклидтік кеңістіктің метрлік тензоры, гипербеттер және аффиндік тұтастықтар арасындағы байланыстарды реттейтін дифференциялдық теңдеулер арқылы еркін қозғалыстың заңдылықтары бағаланды. Жазық аффиндік тұтастық теңдеуінің гравитациялық өрістегі ньютондық қозғалыс заңдылық кейпіне ауысуы мен қозғалыс теңдеуінің Галилей топтары бойынша түрлену жағдайлары келтірілген. Нётер теоремасы бойынша физикалық жүйенің симметриялары, теңдеулері мен сақталу заңдары арасындағы байланыстар жүйеленді. Симметрия Ли топтары мен алгебралары арқылы сипатталды және әлсіз сақталу заңдары күшті сақталу заңдарына түрлендірілді. Гравитациялық теориядағы сақталу заңдары гравитациялық әсер арқылы беріліп, өрістің теңдеуі энергия–импульс тығыздығының симметриялық тензоры арқылы жазылды. Гравитацияны ескеретін және ескермейтін жалпыламалы және арнайы салыстырмалылық теорияларының принциптік байланыстары кеңістік метрикасы мен сақталу заңдары тұрғысында қарастырылды. Аффиндік жазық тұтастылық, абсолют уақыт, евклидтік кеңістіктің метрлік тензоры және ньютондық потенциал гипербеттегі декарттық координаталарды қолдана отырып жан–жақты ашылып көрсетілді. Мақаладағы барлық есептеулер дифференциалды геометрияның математикалық аппараты, тензорлық, вариациялық және интегралдық есептеулер арқылы іске асырылды.

Түйін сөздер: эквиваленттілік принципі, сақталу заңдары, симметрия, ковариантты лық, кеңістік–уақыт, гравитация, санақ жүйесі.

Т.Б. Коштыбаев[1], Е.С. Умбетов[1*], М.Е. Алиева[2], Г.Т. Тугелбаева[1], К.Қ. Жантлеуов[2]
[1] Казахский национальный женский педагогичесий университет, г. Алматы, Казахстан
[2] Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстаны

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ И ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ В ТЕОРИИ ГРАВИТАЦИИ НА ОСНОВЕ АФФИННОЙ СИММЕТРИИ

Аннотация

В статье представлены расчеты, связанные с особенностями и значением постулата ковариантности, принципа эквивалентности, системы координат и законов сохранения общей теории относительности. Свободное движение частицы рассматривалось в контексте геометрии пространства-времени и в рамках аффинной симметрии. Законы свободного движения оценивались с помощью дифференциальных уравнений, регулирующих соотношения между метрическим тензором евклидова пространства, гиперповерхностями и аффинной связанностью. Приведены переход уравнения плоской аффинной связанности в ньютоновскую форму закона движения в гравитационном поле и преобразование уравнения движения с помощью групп Галилея. Систематизированы связи между симметриями, уравнениями и законами сохранения физической системы по теореме Нётера. Симметрия была описана с помощью групп и алгебр Ли, а слабые законы сохранения были преобразованы в сильные. Законы сохранения в теории гравитации заданы гравитационным

действием, а уравнение поля выражено через симметричный тензор плотности энергии-импульса. Принципиальные связи между общей и специальной теорий относительности, учитывающие и не учитывающие гравитацию, были рассмотрены в контексте пространственной метрики и законов сохранения. Аффинная плоская связанность, абсолютное время, метрический тензор евклидова пространства и ньютоновский потенциал были всесторонно раскрыты с использованием декартовых координат на гиперповерхности. Все расчеты в статье выполнены с использованием математического аппарата дифференциальной геометрии, тензорного, вариационного и интегрального исчисления.

Ключевые слова: принцип эквивалентности, законы сохранения, симметрия, ковариантность, пространство–время, гравитация, система отсчета.

T.B. Koshtybayev[1], Y.S. Umbetov[1]*, M.E. Aliyeva[2], Tugelbaeva G.T.[1], K.K. Zhantleuov[2]
[1] Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan
[2]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

STUDY OF THE EQUIVALENCE PRINCIPLE AND CONSERVATION LAWS IN THE THEORY OF GRAVITY BASED ON AFFINE SYMMETRY

Abstract

This article presents calculations related to the covariance postulate, the equivalence principle, coordinate systems, and the conservation laws within the general theory of relativity. The free motion of a particle is analysed in the framework of space-time geometry and affine symmetry principles. The laws of free motion were evaluated using differential equations governing the relationships between the metric tensor of Euclidean space, hypersurfaces, and affine connections. The transformation of the equation of flat affine connection into the Newtonian form of the law of motion in a gravitational field is presented, along with the transformation of the equation of motion under Galilean groups. The relationships between symmetries, equations, and conservation laws of a physical system are systematized according to Noether's theorem. Symmetry is described using Lie groups and Lie algebras, while weak conservation laws are converted into strong ones. The conservation laws in the theory of gravitation are defined by the gravitational action, and the field equation is expressed through the symmetric energy-momentum density tensor. Fundamental connections between the general and special theories of relativity, both accounting for and neglecting gravitation, are examined in the context of spatial metrics and conservation laws. The affine flat connection, absolute time, Euclidean space metric tensor, and Newtonian potential are analysed comprehensively using Cartesian coordinates on a hypersurface. All calculations are performed using the mathematical apparatus of differential geometry, tensor calculus, variational methods, and integral calculus.

Keywords: equivalence principle, conservation laws, symmetry, covariance, space-time, gravitation, reference frame.

Кіріспе

Негізгі ережелер. Ньютон теориясы мардымсыз жылдамдықтар мен әлсіз гравитациялық өрістерге арналған, ал жалпылама салыстырмалалық теориясы (ЖСТ) гравитацияны анағұрлым дәл, әрі кең ауқымды шарттарға сәйкес сипаттап бере алады. Эйнштейннің пікірінше гравитация–күш емес, ол–планеталардың, жұлдыздар мен қара құрдымдардың әсерінен кеңістік–уақыттың майысуы (қисаюы). Өрістердің кванттық теориясы түрғысынан эквиваленттілік принципті лоренц–инварианттылықтың талаптары ретінде қабылдауға болады. Олай болса, осы принципке негізделген ЖСТ гравитацияның классикалық релятивистік теориясы болып табылады, яғни гравитациялық өріс инерциялды емес санақ жүйесі арқылы сипатталса, онда санақ жүйесін инерциялды деп санай беруге әбден болады. Бұдан: инерция мен гравитация өзара эквивалент ұғымдар деген қорытынды шығады.

И. Ньютон ұсынған классикалық тартылыс теориясында қашықтық маңызды емес, яғни ол кез–келген қашықтықта орындала береді немесе гравитациялық әсерлер кеңістіктің барлық нүктелері мен барлық уақыт мезеттерінде жұмыс істей береді. Осы тұжырымдамалар тартылыстың кеңістікте таралу (берілу) жылдамдығының соншалықты үлкен екендігін білдірсе керек. Алайда, бұл жылдамдық жарықтың вакуумдегі жылдамдығынан асып кетпесі анық. Мәселенің түйткілі дененің потенциалдық энергиясында болып отыр, өйткені Ньютондық тартылысты математикалық жолмен осы энергиядан шығарып алуға болады. Ал

гравитация потенциалы немесе потенциалдық энергия скаляр шама болмағандықтан, Лоренц түрлендірулері кезінде бір бейнелі қалпын сақтап қалады және ол 4–вектордың уақыттық құраушысы ретінде теріс мәнді болып табылады. Максвеллдің электромагниттік теориясындағы әр аттас зарядтардың өзара тартылу қағидасы гравитация жағдайына тура келмейді [1,2], сондықтан да арнайы салыстырмалылық теория (АСТ) Ньютонның гравитация теориясымен үйлеспейді деген қорытындыға келеміз. Эйнштейн табиғат заңдарының инварианттылық принципімен үйлесетін және барлық санақ жүйелерінде орындала беретін гравитация теориясын тапқысы келді. Осы бағыттағы атқарылған ауқымды зерттеу жұмыстарының нәтижесінде 1915 жылы дүниеге ЖСТ келді. Бұл теория гравитациялық және инерттілік массалар бір мағыналы немесе гравитациялық және инерциялық күштердің табиғаты бірдей деген постулаттарға негізделген және материя мен кеңістік–уақыт қисығы арасындағы байланыстарды іске асыратын Эйнштейн теңдеуін басшылыққа алады. Аталған постулаттардың мәнісі мынадай: кеңістік–уақыттағы гравитациялық құбылыстар денелер арасындағы әсерлесу күштері мен өрістерге негізделмейді, масса–бұл энергия және кеңістік–уақыттың деформациялану нәтижесі. Десек те, ЖСТ кванттық теорияның классикалық шегі деп қабылдауға болмайды. Шын мәнісінде, АСТ–ЖСТ–ның, ал Ньютон механикасы–АСТ–ның дербес жағдайы. Басқа сөзбен айтсақ, классикалық механиканы АСТ–ның жарық жылдамдығынан едәуір аз жылдамдықтар жағдайындағы бөлімі деп есептесек, АСТ–ны ЖСТ–ның жалпыламалы жорамалдарынан шығарып алуға болады, яғни ЖСТ–тартылыстың геометриялық теориясы кейпіндегі АСТ–ның жетілдірілген нұсқасы. Аталған физикалық теориялар жарық жылдамдығына жақын немесе одан әлде қайда аз жылдамдықтар жағдайындағы табиғат (механика, электродинамика, термодинамика және т.б.) заңдарының орындалу шарттарын сипаттап беруге қауқарлы дүниелер. Олардың басты ерекшеліктері: ЖСТ гравитацияны ескереді, ал АСТ оны қажет етпейді.

Альберт Эйнштейннің 1905 жылғы «Қозғалыстағы орталардың электродинамикасына» атты АСТ мақаласының бірінші бөлімі классикалық механиканы релятивистік жағдайларға бейімдеуге арналып, гравитацияның сыртқы әсер түсінігіндегі есептері қарастырылған. Қазіргі кезде ЖСТ–ның көптеген болжамдары бақылаулар мен тәжірибелер арқылы расталып отыр, солардың ішінде уақыттың гравитациялық баяулауы, сигналдардың гравитациялық өрісте кідіруі және гравитациялық сәуле шығаруды атап өтуге болады. Бүгінгі күнгі ақиқатқа айналып отырған қара құрдымдарды да ЖСТ болжамдарының бірі болатын. ЖСТ ғаламды төрт өлшемді сипатта қарастырады: кеңістіктік үш өлшем және уақыт. Сондықтан, бұл теорияда екі нысанның кеңістіктік ара–қашықтығы емес, керісінше екі оқиғаның кеңістікті–уақыттық аралығы маңызды. Бір сөзбен айтқанда, кеңістік пен уақыт төрт өлшемді кеңістік–уақыт континуум құрайды. Бұл континуумде өзара салыстырмалы қозғалыстағы екі бақылаушының екі оқиғаның болғаны жайындағы пікірлері сәйкес келмегенімен, олардың себеп–салдарлы байланыстары үзілмейді (ұқсас).

ЖСТ эквиваленттілік принципін келтірейік: дененің гравитациялық өрістегі еркін түсу үдеуі дененің массасы мен оның құрылымына (құрамына) тәуелсіз және бұл үдеу барлық денелер үшін бірдей. Бұл жағдай кеңістік–уақыт геометрисының қасиеттері арқылы ғана түсіндіріледі. Сонымен бірге, инертті масса мен ауырлық масса бір ұғым ретінде қарастырылады, яғни біртекті гравитациялық өрістегі қозғалыс пен тартылыс өрісі жоқ жүйедегі үдемелі қозғалыстың бір–бірінен айырмашылығы жоқ. Физик–ғалымдар ЖСТ–нан не күтеді? Олардың бір тобы ЖСТ кванттық теориямен сәйкестендіре отырып элементар бөлшектер теориясының негізін қалауға болады десе, басқалары оның геометриялық қыры мен тәсілдерін физиканың басқа да бөлімдеріне пайдалануды көздейді. Ал, кейбір теориялық физика өкілдері элементар бөлшектердің симметриясын гравитациялық өрістердің асимптотикалық симметриясымен байланыстырғылары келеді.

Ұсынылып отырған мақалада негізінен жалпы ковариаттылық постулатына, эквиваленттілік принципіне, координаталар жүйесіне және сақталу заңдарына ерекше көңіл

бөлініп, олардың табиғаты теориялық есептеулер арқылы жан–жақты ашылып, талқыланып көрсетілетінін айтып өткіміз келеді.

Зерттеудің өзектілігі

ЖСТ негізгі мәні–жаратылыстағы барлық оқиғалардың төрт өлшемді координаталар жүйесінде өтетіндігі: олардың үшеуі–кеңістіктік, ал төртіншісі–уақыт (кеңістік–уақыт конти́нуумы). Денелер өздерінің массасы арқылы осы төрт өлшемді эйнштейндік кеңістіктің өлшемін майыстыратын болғандықтан, кейде ЖСТ–ын гравитацияның метрлік теориясы деп те атайды. Ол кеңістік–уақыт геометриясы мен энергия, импульс, кернеу үлестірімдері арасындағы байланыстарды айқындап бере алатын қуатты математикалық аппаратпен қамтамасыз етілген. Дененің үдеуі мен траекториясы осы дененің массасы мен оның құрылымына байланысты емес. Кеңістіктің бір нүктесінде бірнеше дене бірдей үдеумен қозғалған болса, онда бұл жағдайды дененің осы нүктедегі қасиеттерімен емес, керісінші кеңістіктің аталған нүктедегі қасиеттерімен байланыстыру қажет. ЖСТ арқылы ғалымдар көптеген тұрақтыларды енгізіп, шешілмеген құбылыстарға бақылаулар жасады, нәтижеде олар қара құрдым, қараңғы материя, қараңғы энергия, ғаламның ұлғаюы және үлкен жарылыс секілді дүниелерді ойлап тапты. Келтірілген бұл мәліметтердің барлығы да адамзаттың жаратылыс құпияларын зерттеп білуде ЖСТ–ның өзектілігін растаса керек. Қазіргі заманғы зерттеушілер Максвелл теңдеулері арқылы гравитациялық толқындар мен қара құрдымдардың әсерлесулерін модельдейтін тәсілдер ұсынуды, яғни зерттеушілер гравитацияға электромагниттік өріс ретінде қарай бастады, бұл ретте электрлік және магниттік сызықтардың рөлін гравитэлектрлік, гравитмагниттік өрістер атқарады деген тұжырымдар жасалған.

Материалдар мен әдістер. ЖСТ маңызды әдістеріне эквиваленттілік принципінің қолданылуын, кеңістік–уақыттың қисайған (майысқан) төрт өлшемді бейнесін (кейпін), дененің майысқан кеңістік–уақыт геодезиялық сызықтары бойымен қозғалысын және дифференциалды геометрияның гравитациялық құбылыстарды талдауға қолданылуын жатқызуға болады. Теорияның негізгі «материалдары»: кеңістік–уақыт қисықтығын масса мен энергияның үлестірімімен байланыстыратын Эйнштейн теңдеулері, тензорлық теңдеулер және күштік әсермен емес, масса–энергия арқылы деформацияланатын кеңістік–уақыт [3]. ЖСТ–дағы кеңістік–уақыттың АСТ–дағы кеңістік–уақыттан айырмашылығы тензор арқылы өрнектелетін қисықтықта болып отыр. Екінші көрсетілген теориядағы кеңістік–уақыт үшін бұл тензор нөлге тең, сондықтан да бұл кеңістік–уақыт жазық пішінді болып келеді.

Негізгі ойлар. ЖСТ–ның негізгі постулаты бойынша тартылыс өрісін үдетуші инерциялдық емес санақ жүйесі деп санауға болады, сонымен бірге дененің гравитациялық және инертті массаларына, кеңістік пен уақытқа бірдей (эквивалент) физикалық ұғымдар ретінде қарау керек. Бұл жағдай физикалық процестерді математикалық тұрғыдан сипаттауға қолайлы. Олай болса, кеңістік–уақыт пен гравитациялық өріс те бір ұғым (гравитация–күш (әсер) емес, ол–нысандардың кеңістік–уақыттағы қозғалысын растаушы). Космологияда «қараңғы энергия»” мәселесі жоқ, өйткені бұл мәселе Әлемнің ұлғаю жылдамдығымен анықталатын Хаббл тұрақтысының материя тығыздығымен байланыста болуынан басталған еді. ЖСТ–да белгілі бір санақ жүйесінсіз жылдамдықтар мен үдеудің физикалық мағыналарын ашу мүмкін емес. Бір сөзбен айтқанда, ЖСТ басты қағидасы: кеңістік–уақыттың қисаюы материяны қозғалысқа келтірсе, өз кезегінде материя кеңістік–уақыттың қисаюына себепші болады.

Зерттеудің әдіснамасы

Кеңістік (Евклид, Лобачевский және Риман) геометриялары, метрлік өлшем мен метрлік тензор ЖСТ–ның негізгі математикалық зерттеу әдістерінің жүйесін құрайды. Осылар арқылы теорияның негізгі деген принциптері мен постулаттарының мән–мағынасы кеңінен ашылып, төрт өлшемдік кеңістік–уақыт ұғымындағы есептер қарапайым сипатта шешілетін болады. Әрине, бұл шешімдер теориядағы барлық тұжырымдамаларды жан–жақты әрі дәл бағалауға және олардың теориядағы алатын ауқымын анықтауға мүмкіндік береді. Осылармен бірге,

аффиндік симметрияларды Ли топтары мен алгебралары бойынша сипаттау әдісі де сақталу заңдарының түрлену тетіктеріне тереңінен үңілуге жағдай жасайды.

Зерттеу нәтижелері

Мақалада қол жеткізілген теориялық нәтижелер тізбегі төмендегідей:

– бөлшектің еркін қозғалысы кеңістік–уақыт геометриясы мен аффиндік симметрия тұтастығы тұрғысында сипатталды;

– евклидтік кеңістіктің метрлік тензоры, гипербеттер және аффиндік тұтастықтар арасындағы байланыстарды реттейтін дифференциялдық теңдеулердің көмегімен бөлшектің еркін қозғалыс заңдылықтары талданды;

– жазық аффиндік тұтастық теңдеуінің гравитациялық өрістегі ньютондық қозғалыс заңдылық кейпіне ауысу тетіктері көрсетілді;

– қозғалыс теңдеуінің Галилей топтары бойынша түрлену жағдайлары келтірілді;

– Нётер теоремасы бойынша физикалық жүйенің симметриялары, теңдеулері мен сақталу заңдары арасындағы байланыстар жүйеленді;

– симметриялар Ли топтары мен алгебралары арқылы сипатталды және әлсіз сақталу заңдарының күшті сақталу заңдарына түрлену ерекшеліктері зерделенді;

– гравитациялық теориядағы сақталу заңдары гравитациялық әсер арқылы өрнектеліп, өрістің теңдеуі энергия–импульс тығыздығының симметриялық тензоры арқылы жазылды;

– гравитацияны ескеретін және ескермейтін жалпыламалы және арнайы салыстырмалылық теориялардың принциптік байланыстары кеңістік метрикасы мен сақталу заңдары тұрғысында қарастырылды.

Негізгі бөлім

Физиктерді қазіргі таңда толғандырып отырған ЖСТ қатысты мәселелердің ішінде маңыздыларына тоқталар болсақ, олар: гравитацияның энергиясын анықтау, алдыңғы қатарлы санақ жүйесін белгілеу, жалпы ковариантты принципінің мәнісін айқындау. Эйнштейн эквиваленттілік принципін гравитациялық теорияның тірегі деп санады [4,5]. Осы принциптің мағынасын білу үшін Ньютон физикасына үңілу жеткілікті. Шындығында, Ньютондық теория жеткілікті дәрежеде айқындалмаған мынадай болжамдардан тұратыны жасырын емес: кеңістік–уақыт төрт өлшемді санқырлылық сипатта; абсолют уақыт деген скаляр шама бар және $t = const$ түрдегі гипербеттер үш өлшемді эвклидтік кеңістіктің рөлін атқарады. Гравитация жоқ кездегі қозғалыс еркін қозғалыс деп аталады және ол 1–ші заңға бойынша барлық әсерлесулер жоқ идеал жағдайда ғана орындалады. Кеңістік–уақыттағы x, y, z координаталарындағы еркін қозғалыстың шарты төмендегідей:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2z}{dt^2} = 0$$

Әрбір $t = const$ гипербеттерді бір рет қиып өтетін қисық сызықты қозғалысқа (дененің еркін түсуі) еркін қозғалыстың геометриялық астары ретінде қарауға болады. Сонымен бірге, еркін түсіп келе жатқан бөлшектер кеңістік–уақыттағы аффиндік симметриялы Γ тұтастықты анықтап бере алады. Төменде тұтастық коэффициенттері көрсетілген:

$$\Phi^i_{ki} = \tilde{\Phi}^i_{kl} - \lambda^{ij}\frac{\partial\varphi}{\partial x^j}t_k t_i \quad (i,...,l = 0,1,2,3) \tag{1}$$

мұндағы $\tilde{\Phi}$ –аффиндік жазық тұтастылық, $t_k = \frac{\partial i}{\partial x^k}$, ал t –абсолют уақыт, λ^{ij} – евклидтік $t = const$ кеңістіктің метрлік тензоры, φ –ньютондық потенциал. Егер, x, y, z –гипербеттегі декарттық координаталар болса, онда

$$\lambda^{ij} = \left(gradx^i\right)\left(gradx^j\right)$$

$$grad = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$$

Айталық, $t_i f_{ki} - t_k f_{ii} = 0$ теңдеуінің шешімі f болса, онда $\tilde{\Phi}^i_{ki} - \lambda^{ij} \frac{\partial f}{\partial x^j} t_k t_i$ өрнегі де жазық аффиндік тұтастылық болып табылады да [6], (1)–теңдеу гравитациялық өрістегі ньютондық қозғалыс заңдылығы кейпіне ауысады:

$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} + \tilde{\Phi}^i_{ki} \frac{dx^i}{dt} = -\lambda^{ij} \frac{\partial \varphi}{\partial x^j}$$

Бұл өрнекте $\tilde{\Phi}$–ге қатысты мүшелер инерциялдық координаттар жүйелерін қолданған кезде пайда болатын кориолистік, центрден тепкіш және басқа да осы тектес күштерге сәйкес келеді. Сонымен бірге, кеңістік–уақыттағы санақ жүйесі $x^0 = t$, $x^1 = x$, $x^2 = y$, $x^3 = z$ және $\tilde{\Phi}^i_{ki} = 0$ болатындай етіп таңдап алынады. Олай болса, қозғалыс теңдеуі де төмендегідей түрде жазылатын болады:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -grad\varphi \tag{2}$$

(2)-ні өзгертпейтін түрлендірулер саны Галилей топтарына қарағанда ауқымдырақ. Егер, $\vec{a}(t)$ векторы тек уақытқа ғана тәуелді болса, онда $\vec{r} \to \left(\vec{r} + \vec{a}\right)$ және $\varphi \to \left(\varphi - \vec{a}\vec{r}\right)$ түрлендірулері да (2)-ні өзгерте алмайды. Осы келтірілген Ньютондық теорияға жасалған осы талдаулар бойынша мынадай тұжырым жасауға болады: кеңістікте еркін түсіп келе жатқан бөлшектің қозғалысы арқылы төрт өлшемді кеңістік–уақыттағы симметриялы аффиндік $\tilde{\Phi}$ тұтастылықтың өрісін анықтайды. Бұл жағдай тек қана классикалық механика шеңберінде ғана орындалып, графитациялық және инертті массаның эквиваленттілігіне негізделеді. Симметрия – жүйедегі қозғалыстың мүмкін болатын күйіне дәл сондай басқа бір күйді сәйкес қою. Кез–келген физикалық теорияда барлық күйлердің E жүйесі мен физикалық күйлердің $F \subset E$ ішкі жүйесін қарастырған кезде F элементтері E элементтерінен іріктелініп алынып, қозғалыс заңдылықтары немесе теңдеулері деп аталатын болады. Олай болса, симметрия деп қозғалыс заңдылықтарына өзгеріс әкелмейтін жүйедегі барлық түрлендірулерді айтуға болады. Нётер теоремасы физикалық жүйенің симметриялары мен сақталу заңдарының арасындағы байланыстарды белгілеп берді. Айталық, Ω–кеңістік–уақыттағы кез–келген бір векторлық өріс, ал $\Omega(J) - j$ өрістің Ли туындысы болсын. Бұл жағдайдағы скаляр тығыздықтың өрнегі [7,8]

$$\Omega L - \frac{\partial}{\partial x^i}\left(L\Omega^i\right) = 0 \tag{3}$$

Қайталанатын индекстер бойынша қосындылап, төмендегі

$$\Omega\left(\frac{\partial j}{\partial x^i}\right) = \frac{\partial}{\partial x^i}\left(\Omega j\right)$$

теңдігін қолданып, (3)-өрнекті мына түрге келтіруге болады:

$$\frac{\delta W}{\delta \psi}\Omega\psi + \frac{\delta W}{\delta f}\Omega f + \frac{\partial t^i}{\partial x^i} = 0 \tag{4}$$

мұндағы

$$t^i = \frac{\delta L}{\delta f_i}\Omega f + \frac{\delta L}{\delta \psi_i}\Omega\psi - L\Omega^i$$

Кез-келген көп бейнелі (үлгілі) векторлық өріс бір параметрлік топты жасай алады. Ω өріске сәйкес келетін топ f–ті инвариантылықта қалдыратын симметриялық топ [9]. болып табылады. Бұл жағдайдың орындалуына қажетті және жеткілікті шарт мынадай:

$$\Omega f = 0 \tag{5}$$

Сонымен, симметрия, өріс теңдеулері және сақталу заңдарының арасындағы байланыстарды төмендегіше жазып көрсетсек болады:

$$\Omega f = 0\,,\ \frac{\delta W}{\delta \psi} = 0\,,\ \frac{\partial t^i}{\partial x^i} = 0 \tag{6}$$

(5)-теңдеуді қанағаттандыратын өзара сызықты тәуелсіз векторлық өрістердің саны шектеулі болғандықтан, симметрияны Ли топтарымен сипатталады және (5)–теңдеудің шешімдері Ли алгебралары арқылы табылатын болады. Лидің ψ туындысы

$$\Omega\psi = \Omega^i\psi_i + F_i^j\psi\frac{\partial\Omega^i}{\partial x^j}$$

мұндағы F_i^j–тұрақты матрица. ЖСТ абсолюттік элементтер мүлдем жоқтың қасы. Соған байланысты, (4)–теңдеу Ω–ға қатысты тепе–теңділік болып табылады, яғни сақталу заңдарының саны–шексіз. Бұл теңдеуді жоғарыда келтірілген тұрақты матрица арқылы жазайық:

$$\frac{\delta W}{\delta \psi}\psi_i + \frac{\partial}{\partial x^j}\left(\frac{\delta W}{\delta \psi}F_i^j\psi\right) = 0 \tag{7}$$

Ал, (6)–теңдеулер болса кез–келген Ω өріс үшін әлсіз сақталу заңдарын береді. Алайда, осы сақталу заңдарын (7) арқылы күшті сақталу заңдарына түрлендіруге болады. Сақталу заңының дифференциялдық түрі болып табылатын (6)–қатынастар төмендегі

$$U^{ij} \to U^{ij} + \Gamma^{ij} \tag{8}$$

түрлендіруі кезінде өзгеріссіз қалатын болғандықтан, толық сақаталатын шама

$$\int t^i dS_i = \frac{1}{2}\int U^{ij} dJ^*_{ij}$$

(8) өрнектегі Γ^{ij}–антисимметриялық тензор, U^{ij}–тығыздықтың (суперпотенциалдың) антисимметриялық тензоры. Айта кету керек, үлкен қашықтықтарда Γ^{ij} нөлге өте тез ұмтылып кетеді.

Гравитация теориясындағы сақталу заңдарын көрсету үшін алдымен гравитациялық әсердің (W) өрнегін жазып алуымыз қажет [10–13]:

$$W = -\frac{1}{16\pi}\int \sqrt{-g}RdY$$

Бұл өрнекте

$$Y^{ik} = -16\pi \frac{\delta W}{\delta g_{ik}}$$

деп алып, төмендегі гравитациялық өрістің теңдеуіне қол жеткіземіз:

$$Y^{ik} = -8\pi T^{ik}$$

мұндағы T^{ik} –энергия–импульс тығыздығының симметриялық тензоры:

$$T^{ik} = -2\frac{\delta W}{\delta g_{ik}} = -2\frac{\partial L}{\partial g_{ik}}$$

(4)–түрдегі негізгі тепе–теңділік мына түрді қабылдайтын болады:

$$-\frac{1}{16\pi}Y^{ik}\Omega g_{ik} + \frac{\partial \tau^i}{\partial x^i} = 0$$

Көп жағдайда гравитациялық өріс оқшауланған, шектеулі материалдық жүйелерден пайда болады. Жүйеден алыс жатқан жерлерде өрістің шамасы–әлсіздеу, ал метрикасы–жазық пішіндес. Толық сақталатын шамалар беттік интегралдар арқылы өрнектелетін болғандықтан, бұл шамалардың мәндері асимптоттық симметрия арқылы анықталады және де U^{ij} және τ^i шамалары тензорлық қасиеттер көрсете алады

Дискуссия

ЖСТ-дағы координаталар жүйесіне, сақталу заңдарына, ковариаттылық постулатына, эквиваленттілік принципіне қатысты теориялық талдаулар жасалып, осылардың көрнекілігі ретінде бірқатар талдамалы есептеулер жүргізілді. Бөлшектің еркін қозғалысы кеңістік–уақыт геометриясы сипатында анықталып, аффиндік симметрияны тұтастық қағидасында беру үлгісі ұсынылды. Метрлік тензордың, гипербеттер және аффиндік тұтастықтардың евклидтік кеңістікпен байланысын анықтап беретін дифференциялдық теңдеулер арқылы еркін қозғалыстарды зерттеу іске асырылды. Метрикалық тензор кеңістіктегі қисықтардың үзындығын, қисықтар арасындағы бұрыштарды және евклид кеңістігіндегі көлемдерді анықтауға мүмкіндік береді. Гравитациялық өрістің қасиеттері гравитациялық әсердің таралу жылдамдығымен анықталады, әрине бұл жылдамдық жарық жылдамдығына тең және координаталар мен уақытқа байланысты екендігі даусыз. Мақалада қол жеткізілген нәтижелердің қатарына жазық аффиндік тұтастық теңдеуінің гравитациялық өрістегі ньютондық қозғалыс заңдылық кейпіне ауысуы мен қозғалыс теңдеуінің Галилей топтары бойынша түрлену жағдайларын қосуға болады. Классикалық механикалық қозғалыс теңдеулерін ЖСТ–ға түрлендіру классикалық теңдеулерді майысқан кеңістіктегі геодезиялық теңдеулерге ауыстыру арқылы іске асады. ЖСТ–да инерциялдық санақ жүйесі инерциалды емес санақ жүйесімен ауыстырылады да, қозғалыс теңдеулері Ньютон заңдарынан емес ең аз әсер принципінен шығарылып алынады, себебі аталған принцип гравитацияны кеңістік–уақыттың майысуы деп қабылдайды. Нётер теоремасы бойынша физикалық жүйенің

симметриялары, теңдеулері мен сақталу заңдары арасындағы байланыстар орнатылып, симметрия Ли топтары мен алгебралары арқылы сипатталды. Әлсіз сақталу заңдары күшті сақталу заңдарына түрлендірілді. Гравитациялық теориядағы сақталу заңдары гравитациялық әсер арқылы берілді, өрістің теңдеуі энергия–импульс тығыздығының симметриялық тензоры арқылы жазылды.

Қорытынды

Мақалада жүргізілген математикалық есептеулерден байқағанымыздай, ЖСТ гравитациялық өрістің кеңістік–уақыт геометриясын анықтайтын метрикалық тензордың маңызы зор екен. Гравитация–күш емес, тек аталған геометрияның қолданысы (қашықтық пен уақыт аралықтарын өлшеу әдістері), сондықтан да метрикалық тензор материя мен энергияның үлестірімімен тығыз байланыста болуы тиіс. Бұл шаманың симметрия қасиетін сипаттау барысындағы ерекшелігі–физикалық жүйенің симметриялары мен сақталу заңдарының арасындағы байланыстарды белгілеп беруінде. Бұл жағдай (1)–(5) өрнектері арқылы айқындалды. Әрине, әлсіз және күшті реттегі сақталу заңдарының өзара түрлену заңдылықтары да ЖСТ дифференциялдық түрде берілетіндігі дәлелденді. Гравитациялық және инерциалдық күштердің өзара эквиваленттігі гравитациялық және инерттік массалардың да бірдей ұғымда екендігін айғақтайды. Еркін түсетін бөлшектер жағдайындағы кеңістік–уақытты аффиндік симметрия арқылы тұтастылық коэффициенттерін инерциялық координаталар жүйесінде жан–жақты сипаттап көрсетуге болатындығы да дәлелденді. Сақталу заңдарын эквиваленттілік принцип негізінде талқылауға арналған бұл мақала өз мақсатына жетті деп санауға болады және оған тензорлық есептеулер мен Ли алгебрасын қолдану арқылы қол жеткізілгенін айтып өтуіміз қажет.

Пайдаланылған дереккөздер тізімі

[1] Бурланков Д. Е. Анализ общей теории относительности. – Нижний Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2011. – 239 с.

[2] Цой В. И. Необратимость времени в общей теории относительности. // Известия Саратовского университета. Серия: Физика. 2022. Т. 22, № 4. С. 374–379. https://doi.org/0.18500/1817-3020-2022-22-4-374-379

[3] Тельнов В. И. Механика и теория относительности. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. –283 с.

[4] Уолд Р. М. Общая теория относительности. – Москва: РУДН, 2008. – 694 с.

[5] Вергелес, С. Н. Теоретическая физика. Общая теория относительности. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 190 с.

[6] Новиков И. Д. Новый этап развития общей теории относительности. // Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. 2020. № 4. С. 22–26. https://doi.org/10.7868/S0044394820040027

[7] Abdel Nasser Tawfik, Fady T. Farouk, F. Salah Tarabia, and Muhammad Maher. 2024. "Quantum-Induced Revisiting Space-Time Curvature in Relativistic Regime." International Journal of Modern Physics A 39 (35): 223–242. https://doi.org/10.1142/S0217751X24430164

[8] Dadhich, Naresh. 2022. "On Space-Time Structure and the Universe: Some Issues of Concept and Principle." Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 380 (20210405). https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0405

[9] Mancini, Christian, Guglielmo Maria Tino, and Salvatore Capozziello. 2025. "Equivalent Gravities and Equivalence Principle: Foundations and Experimental Implications." Foundations of Physics 55 (69): 191–220. https://doi.org/10.1007/s10701-025-00882-x

[10] Galvagni, Lisa, Guido Magnano, and Matteo Luca Ruggiero. 2025. "Einstein's Elevator and the Principle of Equivalence." Physics Education 60 (5): 177–190. https://doi.org/10.1088/1361-6552/aded61

[11] Jyoti, Divya, and Sachin Kumar. 2023. "General Form of Axially Symmetric Stationary Metric: Exact Solutions and Conservation Laws in Vacuum Fields." Classical and Quantum Gravity 40 (14): 252–265. https://doi.org/10.1088/1361-6382/acdb3e

[12] Penrose, Roger. 2024. "From Conformal Infinity to Equations of Motion: Conserved Quantities in General Relativity." Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 382: 111–128. https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0041

[13] Cotsakis, Spiros. 2025. "Structural Stability and General Relativity." Universe 11 (7): 209, 222–265. https://doi.org/10.3390/universe11070209

References

[1] Burlankov D. E. (2011) Analiz obshhej teorii otnositel'nosti [Analysis of the general theory of relativity], Nizhnij Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gosuniversiteta, 239 p. (In Russian)

[2] Coj V. I. (2022) Neobratimost' vremeni v obshhej teorii otnositel'nosti [The irreversibility of time in general relativity]. Izvestija Saratovskogo universiteta. Serija: Fizika. V. 22, № 4, 374–379. (In Russian) https://doi.org/0.18500/1817-3020-2022-22-4-374-379

[3] Tel'nov V. I. (2015) Mehanika i teorija otnositel'nosti [Mechanics and theory of relativity], Novosibirsk: RIC NGU, 283 p. (In Russian)

[4] Uold R. M. (2008) Obshhaja teorija otnositel'nosti [General theory of relativity], Moskva: RUDN, 694 p. (In Russian)

[5] Vergeles, S. N. (2025) Teoreticheskaja fizika. Obshhaja teorija otnositel'nosti [Theoretical physics. General theory of relativity], Moskva: Izdatel'stvo Jurajt, 190 p. (In Russian)

[6] Novikov I. D. (2020) Novyj jetap razvitija obshhej teorii otnositel'nosti [A new stage in the development of the general theory of relativity]. Astrokosmicheskij centr Fizicheskogo instituta im. P.N. Lebedeva RAN, № 4. 22–26. (In Russian) https://doi.org/10.7868/S0044394820040027

[7] Abdel Nasser Tawfik, Fady T. Farouk, F. Salah Tarabia, and Muhammad Maher. 2024. "Quantum-Induced Revisiting Space-Time Curvature in Relativistic Regime." International Journal of Modern Physics A 39 (35): 223–242. https://doi.org/10.1142/S0217751X24430164

[8] Dadhich, Naresh. 2022. "On Space-Time Structure and the Universe: Some Issues of Concept and Principle." Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 380 (20210405). https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0405

[9] Mancini, Christian, Guglielmo Maria Tino, and Salvatore Capozziello. 2025. "Equivalent Gravities and Equivalence Principle: Foundations and Experimental Implications." Foundations of Physics 55 (69): 191–220. https://doi.org/10.1007/s10701-025-00882-x

[10] Galvagni, Lisa, Guido Magnano, and Matteo Luca Ruggiero. 2025. "Einstein's Elevator and the Principle of Equivalence." Physics Education 60 (5): 177–190. https://doi.org/10.1088/1361-6552/aded61

[11] Jyoti, Divya, and Sachin Kumar. 2023. "General Form of Axially Symmetric Stationary Metric: Exact Solutions and Conservation Laws in Vacuum Fields." Classical and Quantum Gravity 40 (14): 252–265. https://doi.org/10.1088/1361-6382/acdb3e

[12] Penrose, Roger. 2024. "From Conformal Infinity to Equations of Motion: Conserved Quantities in General Relativity." Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 382: 111–128. https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0041

[13] Cotsakis, Spiros. 2025. "Structural Stability and General Relativity." Universe 11 (7): 209, 222–265. https://doi.org/10.3390/universe11070209

ҒТАХР 27.23.21

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.003

Б.Ж. Сағындықов[1], Ж. Бимұрат[2*]

[1]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы қ., Қазақстан
[2] Д.А. Қонаев атындағы Тау-кен ісі институты, Алматы қ., Қазақстан
[*]*e-mail: bimuratzhanar@gmail.com*

ЭЛЬЗАКИ ТҮРЛЕНДІРУІ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҚОЛДАНЫЛУЫ

Аңдатпа

Мақалада Лаплас түрлендіруіне ұқсас интегралдық түрлендірулердің бірі болып табылатын Эльзаки түрлендіруінің теориялық негіздері және оны дифференциалдық теңдеулерді шешуде қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Зерттеу тақырыбы қазіргі қолданбалы математикадағы интегралдық түрлендірулер әдісінің маңыздылығымен байланысты, себебі мұндай түрлендірулер инженерлік және физикалық есептерді тиімді талдауға мүмкіндік береді. Жұмыстың негізгі мақсаты Эльзаки түрлендіруінің негізгі қасиеттері мен теоремаларын жүйелеп, олардың көмегімен тұрақты және айнымалы коэффициентті сызықтық дифференциалдық теңдеулерді шешу жолдарын көрсету болып табылады. Сонымен қатар зерттеуде түпнұсқалар мен кескіндер арасындағы сәйкестіктерді анықтау, жалпылама ығысу теоремаларын тұжырымдау және Эльзаки, Лаплас, Сумуду түрлендірулерінің өзара байланысын салыстырмалы тұрғыда талдау міндеттері қойылған. Зерттеудің ғылыми және практикалық маңыздылығы Эльзаки түрлендіруінің қазақ тіліндегі ғылыми айналымда әлі де жеткілікті деңгейде таныстырылмағанына қарамастан, оның математикалық аппарат ретінде кең мүмкіндіктерге ие екендігін ашып көрсетуінде жатыр. Жұмыста теориялық талдау, салыстыру, жалпылау және математикалық түрлендіру әдістері қолданылды. Зерттеу барысында Эльзаки түрлендіруінің негізгі қасиеттері жүйеленіп, функциялар мен олардың кескіндерінің сәйкестік кестесі жасалды, сондай-ақ бұл түрлендіруді дифференциалдық теңдеулерді шешуге қолданудың тиімділігі көрсетілді. Нәтижелер Эльзаки түрлендіруінің жаңа жиілік аймағына көшпей-ақ есептерді шешуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Зерттеудің құндылығы оның интегралдық түрлендірулер теориясын толықтыра отырып, осы бағыттағы білім қорын кеңейтуінде және Эльзаки түрлендіруінің қолданылу аясын нақтылауында көрінеді. Алынған нәтижелер жоғары оқу орындарында қолданбалы математика, математикалық физика және дифференциалдық теңдеулер курстарында, сондай-ақ инженерлік және физикалық есептерді шешуде практикалық құрал ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: Лаплас түрлендіруі, Сумуду түрлендіруі, Эльзаки түрлендіруі, дифференциалдық теңдеу, дуалдық қатынастар, түпнұсқа функция, кескін.

Б.Ж. Сагиндыков[1], Ж. Бимурат[2*]
[1]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
г. Алматы, Казахстан
[2]Институт горного дела имени Д.А. Кунаева, г. Алматы, Казахстан

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЬЗАКИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Аннотация

В статье рассматриваются теоретические основы преобразования Эльзаки, являющегося одним из интегральных преобразований, сходных с преобразованием Лапласа, а также возможности его применения при решении дифференциальных уравнений. Актуальность темы исследования связана с важной ролью методов интегральных преобразований в современной прикладной математике, поскольку такие преобразования позволяют эффективно анализировать инженерные и физические задачи. Основной целью работы является изложение основных свойств и теорем преобразования Эльзаки, а также демонстрация способов его применения для решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными и переменными коэффициентами. Наряду с этим в исследовании ставятся задачи установления соответствий между оригиналами и их изображениями, формулирования обобщенных теорем сдвига и сравнительного анализа взаимосвязей преобразований Эльзаки, Лапласа

и Сумуду. Научная и практическая значимость исследования заключается в раскрытии широких возможностей преобразования Эльзаки как математического аппарата, несмотря на то, что в казахскоязычном научном пространстве оно пока недостаточно широко представлено. В работе использованы методы теоретического анализа, сравнения, обобщения и математического преобразования. В ходе исследования систематизированы основные свойства преобразования Эльзаки, составлена таблица соответствий между функциями и их изображениями, а также показана эффективность применения данного преобразования при решении дифференциальных уравнений. Полученные результаты показали, что преобразование Эльзаки позволяет решать задачи без перехода к новой частотной области. Ценность исследования состоит в дополнении теории интегральных преобразований, расширении базы знаний в данном направлении и уточнении области применения преобразования Эльзаки. Полученные результаты могут быть использованы в курсах прикладной математики, математической физики и дифференциальных уравнений в высших учебных заведениях, а также в качестве практического инструмента при решении инженерных и физических задач.

Ключевые слова: преобразование Лапласа, преобразование Сумуду, преобразование Эльзаки, дифференциальное уравнение, соотношения дуальности, оригинал-функция, изображение.

*B. Sagindykov[1], Zh. Bimurat[2]**
[1]Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev (Satbayev University), Almaty, Kazakhstan,
[2]Institute of Mining named after D.A. Kunaev, Almaty, Kazakhstan

ELZAKI TRANSFORM AND ITS APPLICATIONS

Abstract

This article examines the theoretical foundations of the Elzaki transform, which is one of the integral transforms similar to the Laplace transform, as well as its applications to solving differential equations. The relevance of the research topic is associated with the important role of integral transform methods in modern applied mathematics, since such transforms make it possible to analyze engineering and physical problems effectively. The main purpose of the study is to present the principal properties and theorems of the Elzaki transform and to demonstrate its use in solving linear differential equations with constant and variable coefficients. In addition, the study aims to establish correspondences between original functions and their images, formulate generalized shifting theorems, and carry out a comparative analysis of the relationships among the Elzaki, Laplace, and Sumudu transforms. The scientific and practical significance of the study lies in revealing the broad capabilities of the Elzaki transform as a mathematical tool, although it has not yet been widely introduced in the Kazakh-language scientific community. The work employs methods of theoretical analysis, comparison, generalization, and mathematical transformation. During the study, the main properties of the Elzaki transform were systematized, a correspondence table between functions and their images was compiled, and the effectiveness of applying this transform to the solution of differential equations was demonstrated. The obtained results showed that the Elzaki transform makes it possible to solve problems without introducing a new frequency domain. The value of the research lies in supplementing the theory of integral transforms, expanding the knowledge base in this field, and clarifying the scope of application of the Elzaki transform. The results obtained can be used in university courses on applied mathematics, mathematical physics, and differential equations, as well as a practical tool for solving engineering and physical problems.

Keywords: Laplace transform, Sumudu transform, Elzaki transform, differential equation, duality relations, original function, image.

Кіріспе

Эльзаки түрлендіруі Лаплас және Сумуду түрлендірулерімен тығыз байланысты интегралдық түрлендірулердің бірі болып табылады. Оны алғаш рет 2011 жылы Tarig M. Elzaki енгізіп, сызықтық дифференциалдық теңдеулерді шешуде тиімді құрал ретінде ұсынды [1, 57-64 бб.].

Эльзаки түрлендіруінің негізгі қасиеттері мен теоремалары кейінгі еңбектерде кеңінен қарастырылды. Tarig M. Elzaki және Salih M. Elzaki [2, 65-70 бб.] бұл түрлендіруді кейбір қарапайым және дербес туындылы дифференциалдық теңдеулерді шешуге қолданды. Ал [3, 1-11 бб.] жұмысында Лаплас және Эльзаки түрлендірулерінің байланыстары зерттеліп,

олардың арасындағы дуалдық қатынастар көрсетілді. Сонымен қатар [4, 13-18 бб.] еңбегінде айнымалы коэффициентті сызықтық дифференциалдық теңдеулерді шешу мәселелері қарастырылды, ал [5, 113-119 бб.] жұмысында Эльзаки түрлендіруі қарапайым дифференциалық теңдеулер жүйелерін шешуге қолданылды.

Қазіргі таңда Эльзаки түрлендіруі қолданбалы математиканың әртүрлі салаларында зерттеліп келеді. Әсіресе айнымалы коэффициентті және кейбір сызықтық емес теңдеулерді талдауда оның тиімділігі артып отыр. Осыған байланысты мақалада Эльзаки түрлендіруінің теориялық аппараты жүйеленіп, оның Лаплас және Сумуду түрлендірулерімен салыстырғанда ерекшеліктері қарастырылады.

Лаплас түрлендіруі дифференциалдық теңдеулерді алгебралық теңдеулерге келтіру арқылы олардың шешімін табуды жеңілдетеді [6, 182441-182450 бб.; 7, 5-72 бб.]. сонымен бірге ол динамикалық жүйелерді талдауда кеңінен қолданылады [8, 2083-2095 бб.]. Сумуду түрлендіруін алғаш рет G.K. Watugala ұсынған [9, 319-329 бб.]. Кейбір айнымалы коэффициентті дифференциалдық теңдеулер үшін Эльзаки түрлендіруінің артықшылықтары Bulut пен Evans, сондай-ақ Mohamed пен Elzaki еңбектерінде қарастырылған [10, 103-109 бб.; 11, 27-33 бб.]. Осыған байланысты мақалада Эльзаки түрлендіруінің анықтамасы, негізгі қасиеттері, бірнеше маңызды теоремалары және оларды дифференциалдық теңдеулерді шешуге қолдану жолдары қарастырылды.

Зерттеу әдіснамасы

Дифференциалдық теңдеулер қолданбалы математиканың барлық салаларында маңызды рөл атқарады. Компьютерлік технологиялардың дамуы бұл теңдеулерді зерттеудің маңызын одан әрі арттырды. Дәстүрлі әдістер кейбір сызықтық емес және айнымалы коэффициентті дифференциалдық теңдеулерді шешуде күрделі есептеулерді талап етеді. Осы тұрғыдан алғанда, Эльзаки түрлендіруі зерттеушілер назарын аударған тиімді аналитикалық әдістердің бірі болып табылады. Бұл жұмыста теориялық талдау, салыстыру, жалпылау және интегралдық түрлендірулер әдістері қолданылды. Зерттеудің негізін Эльзаки түрлендіруінің анықтамасы, оның негізгі қасиеттері, Лаплас және Сумуду түрлендірулерімен байланысы, сондай-ақ оларды дифференциалдық теңдеулерді шешуде пайдалану құрайды.

Эльзаки түрлендіруінің анықтамасы

Қайсыбір

$$A = \left\{ f(t): \exists M, k_1, k_2 > 0, |f(t)| < M^{|t|/k_j}, t \in (-1)^j \times [0, \infty) \right\} \tag{1.1}$$

жиыны берілсін. Бұл жиынға экспоненциалдық ретті функциялар жатады. Онда A жиынына тиесілі $f(t)$ функциясы үшін Эльзаки түрлендіруі

$$\mathrm{E}[f(t)] = T(v) = v\int_0^\infty f(t)e^{-t/v}dt,\ t \geq 0,\ k_1 \leq v \leq k_2 \tag{1.2}$$

интегралдық қатынасы арқылы анықталады [1; 12].

Эльзаки түрлендіруі дифференциалдық және интегралдық теңдеулерді шешуді жеңілдету үшін қолданылады және Лаплас, Сумуду, Фурье түрлендірулерімен терең байланыста болады.

Қарапайым функциялардың Эльзаки түрлендіруі

1. Егер $f(t) = 1$ болса, онда

$$\mathrm{E}[1] = v\int_0^\infty e^{-t/v}dt = v^2. \tag{1.3}$$

2. Егер $f(t) = t$ болса, онда

$$\mathrm{E}[t] = v\int_0^\infty te^{-t/v}dt = v^3. \tag{1.4}$$

3. Жалпы жағдайда, егер $n \geq 0$ бүтін сан болса, онда

$$\mathrm{E}[t^n] = n!\, v^{n+2}. \tag{1.5}$$

4. Көрсеткіштік функция үшін

$$\mathrm{E}[e^{at}] = v\int_0^\infty e^{at}\cdot e^{-t/v}dt = \frac{v^2}{1-av},\ av < 1. \tag{1.6}$$

5. Комплекстік параметрді пайдаланып,

$$a = \alpha + i\beta,\ i^2 = -1,$$

деп алсақ, онда

$$\mathrm{E}\left[e^{(\alpha+i\beta)t}\right] = \frac{v^2}{1-(\alpha+i\beta)v}.$$

Осыдан

$$\mathrm{E}[e^{\alpha t}\cos\beta t] = \frac{v^2(1-\alpha v)}{(1-av)^2+\beta^2v^2}, \tag{1.7}$$

$$\mathrm{E}[e^{\alpha t}\sin\beta t] = \frac{\beta v^3}{(1-av)^2+\beta^2v^2}. \tag{1.8}$$

Дербес жағдайда $\alpha = 0$, $\beta = \omega$ болса,

$$\mathrm{E}[\cos\omega t] = \frac{v^2}{1+\omega^2v^2},\ \mathrm{E}[\sin\omega t] = \frac{\omega v^3}{1+\omega^2v^2}. \tag{1.9}$$

Ал $\omega \mapsto i\omega$ алмастыруы арқылы

$$\mathrm{E}[\cosh\omega t] = \frac{v^2}{1-\omega^2v^2},\ \mathrm{E}[\sinh\omega t] = \frac{\omega v^3}{1-\omega^2v^2}. \tag{1.10}$$

Эльзаки түрлендіруінің негізгі қасиеттері және теоремалары

Жалғыздық теоремасы

Егер $f(t)$ және $g(t)$ түпнұсқа функциялары үшін

$$\mathrm{E}[f(t)] = \mathrm{E}[g(t)]$$

теңдігі орындалса, онда

$$f(t) \equiv g(t)$$

теңдігі де орындалады.

Дәлелдеуі. Эльзаки және Лаплас түрлендірулерінің арасындағы байланыс бойынша [12]:

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = vL[f(t)]\left(\frac{1}{v}\right),\ \mathrm{E}[g(t)](v) = vL[g(t)]\left(\frac{1}{v}\right).$$

Егер

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = \mathrm{E}[g(t)](v)$$

болса, онда

$$vL[f(t)]\left(\frac{1}{v}\right) = vL[g(t)]\left(\frac{1}{v}\right).$$

$v \neq 0$ болғандықтан,

$$L[f(t)]\left(\frac{1}{v}\right) = L[g(t)]\left(\frac{1}{v}\right).$$

$s = 1/v$ деп белгілесек,

$$L[f(t)](s) = L[g(t)](s).$$

Лаплас түрлендіруінің жалғыздық теоремасы бойынша [13, 276-324 бб.; 14, 20-25 бб.]

$$f(t) \equiv g(t).$$

Теорема дәлелденді

Сызықтық қасиет

Егер $f(t)$ және $g(t)$ түпнұсқалары берілсе, онда кез келген $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ үшін

$$\mathrm{E}[\alpha f(t) + \beta g(t)] = \alpha \mathrm{E}[f(t)] + \beta \mathrm{E}[g(t)].$$

Ұқсастық теоремасы

Егер

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = T(v)$$

болса, онда $a > 0$ үшін

$$\mathrm{E}[f(at)](v) = \frac{1}{a^2} T(av) \tag{1.11}$$

теңдігі орындалады [1; 12].

Дәлелдеуі. Эльзаки түрлендіруінің анықтамасы бойынша

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = v \int_0^\infty f(t) e^{-1/v} dt.$$

Осыдан

$$\mathrm{E}[f(at)](v) = v \int_0^\infty f(at) e^{-1/v} dt.$$

$x = at$ деп алмастырайық. Онда

$$t = \frac{x}{a}, \; dt = \frac{dx}{a}.$$

Бұдан

$$\mathrm{E}[f(at)](v) = \frac{v}{a} \int_0^\infty f(x) e^{-x/(av)} dx.$$

Ал анықтама бойынша

$$T(av) = av \int_0^\infty f(x) e^{-x/(av)} dx.$$

Демек,

$$\int_0^\infty f(x) e^{-x/(av)} dx = \frac{T(av)}{av}.$$

Осыны алдыңғы теңдікке қойсақ,

$$\mathrm{E}[f(at)](v) = \frac{1}{a^2} T(av).$$

Теорема дәлелденді.

Кешігу теоремасы

Кешігу теоремасы функция белгілі бір уақытқа кешіктірілгенде оның Эльзаки кескінінің қалай өзгеретінін сипаттайды. Төменде берілген дәлелдеуде Эльзаки түрлендіруінің Лапластиптес жазылымы әдейі қолданылды, себебі бұл нәтиже Лаплас түрлендіруінің ығысу теоремасымен тікелей байланысты [3; 13; 14].

Егер $f(t)$ функциясының

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = T(v)$$

түріндегі Эльзаки түрлендіруі белгілі болса, онда $\tau > 0$ үшін $f(t-\tau)\eta(t-\tau)$ функциясының түрлендіруі

$$\mathrm{E}[f(t-\tau)\eta(t-\tau)](v) = e^{-v\tau} T(v) \tag{1.12}$$

формуласы арқылы анықталады. Мұндағы $\eta(t-\tau)$ – Хевисайдтың бірлік функциясы.

Дәлелдеуі. Қарастырылып отырған жағдайда Эльзаки түрлендіруі

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = \int_0^\infty f(t) e^{-vt} dt$$

түрінде анықталады [3; 13; 14]. Сондықтан

$$\mathrm{E}[f(t-\tau)\eta(t-\tau)](v) = \int_0^\infty f(t-\tau)\eta(t-\tau) e^{-vt} dt.$$

Хевисайд функциясының қасиеті бойынша:

– егер $t < \tau$ болса, онда $\eta(t-\tau) = 0$,
– егер $t \geq \tau$ болса, онда $\eta(t-\tau) = 1$.

Осыған байланысты интегралды

$$\mathrm{E}[f(t-\tau)\eta(t-\tau)](v) = \int_{\tau}^{\infty} f(t-\tau)e^{-vt}dt.$$

түрінде жазуға болады. Енді

$$x = t-\tau,\ t = x+\tau,\ dt = dx$$

деп алмастыру енгіземіз. Сонда

$$\mathrm{E}[f(t-\tau)\eta(t-\tau)](v) = \int_{0}^{\infty} f(x)e^{-v(x+\tau)}dx.$$

Экспонентаны жіктесек,

$$\mathrm{E}[f(t-\tau)\eta(t-\tau)](v) = e^{-v\tau}\int_{0}^{\infty} f(x)e^{-vx}dx.$$

Соңғы интеграл анықтама бойынша $T(v)$-ге тең. Демек,

$$\mathrm{E}[f(t-\tau)\eta(t-\tau)](v) = e^{-v\tau}T(v)$$

Теорема дәлелденді.

Ескерту. Бұл теорема дифференциалдық теңдеулерде бастапқы шарттарды есептеу үшін маңызды, өйткені уақыт бойынша жылжу жүйенің жауаптарына әсер етеді.

Ілгерілеу теоремасы

Ілгерілеу теоремасы функция уақыт бойынша алға жылжытылғанда оның Эльзаки кескінінің қалай өзгеретінін сипаттайды.

Егер $f(t)$ функциясының

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = T(v)$$

түріндегі Эльзаки түрлендіруі белгілі болса, онда $\tau > 0$ үшін $f(t+\tau)$ функциясының түрлендіруі

$$\mathrm{E}[f(t+\tau)](v) = e^{\tau/v}\left[T(v) - v\int_{0}^{\tau} f(t)e^{-t/v}dt\right] \qquad (1.13)$$

формуласымен анықталады [1; 12].

Дәлелдеуі. Эльзаки түрлендіруінің анықтамасы бойынша

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = v\int_{0}^{\infty} f(t)e^{-t/v}dt$$

болады [1; 12]. Сондықтан

$$\mathrm{E}[f(t+\tau)](v) = v\int_{0}^{\infty} f(t+\tau)e^{-t/v}dt.$$

Енді

$$x = t+\tau,\ t = x-\tau,\ dt = dx$$

деп алмастыру енгіземіз. Онда $t = 0$ болғанда $x = \tau$, ал $t \to \infty$ ұмтылғанда $x \to \infty$. Осыдан

$$\mathrm{E}[f(t+\tau)](v) = v\int_{\tau}^{\infty} f(x)e^{-(x-\tau)/v}dx.$$

Экспонентаны жіктесек,

$$\mathrm{E}[f(t+\tau)](v) = e^{\tau/v}v\int_{\tau}^{\infty} f(x)e^{-x/v}dx.$$

Соңғы итегралды

$$\int_{\tau}^{\infty} f(x)e^{-x/v}dx = \int_{0}^{\infty} f(x)e^{-x/v}dx - \int_{0}^{\tau} f(x)e^{-x/v}dx$$

түрінде жазамыз. Сонда

$$\mathrm{E}[f(t+\tau)](v) = e^{\tau/v}\left[v\int_0^{\infty} f(x)e^{-x/v}dx - v\int_0^{\tau} f(x)e^{-x/v}dx\right].$$

Анықтама бойынша

$$v\int_0^{\infty} f(x)e^{-x/v}dx = T(v).$$

Демек,

$$\mathrm{E}[f(t+\tau)](v) = e^{\tau/v}\left[T(v) - v\int_0^{\tau} f(t)e^{-t/v}dt\right].$$

Теорема дәлелденді.

Ескерту. Интегралдық мүше τ-ға тәуелді. Сондықтан ілгерілеу амалы кешігуге қарағанда күрделірек.

Ығысу теоремасы

Бұл теорема $f(t)$ функциясы экспоненциалды көбейткіш арқылы өзгерген кезде оның Эльзаки кескіні қалай түрленетінін сипаттайды. Төменде берілген дәлелдеуде Эльзаки түрлендіруінің Лаплас-типтес жазылымы әдейі қолданылды. Мұндай тәсіл Лаплас түрлендіруіндегі параметрлік ығысу қасиеті мен Эльзаки түрлендіруі арасындағы байланысты айқынырақ көрсетуге мүмкіндік береді [3; 13; 14].

Егер $f(t)$ функциясының

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = T(v)$$

түріндегі Эльзаки түрлендіруі белгілі болса, онда $a > 0$ үшін $e^{-at}f(t)$ функциясының Эльзаки түрлендіруі

$$\mathrm{E}[e^{-at}f(t)](v) = T(v+a) \qquad (1.14)$$

теңдігі арқылы анықталады [3; 13; 14]. Бұл қасиет дифференциалдық теңдеулерді шешуде, әсіресе коэффициенттері экспоненциалды өзгеретін теңдеулерді зерттеуде маңызды қолданысқа ие.

Дәлелдеуі. Қарастырылып отырған жағдайда Эльзаки түрлендіруі

$$\mathrm{E}[f(t)](v) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-vt}dt$$

түрінде анықталады [3; 13; 14]. Сондықтан

$$\mathrm{E}[e^{-at}f(t)](v) = \int_0^{\infty} e^{-at}f(t)e^{-vt}dt.$$

Экспоненталық көбейткіштерді біріктірсек,

$$\mathrm{E}[e^{-at}f(t)](v) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-(v+a)t}dt.$$

Түрлендіру анықтамасы бойынша

$$T(v+a) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-(v+a)t}dt.$$

Сондықтан

$$\mathrm{E}[e^{-at}f(t)](v) = T(v+a).$$

Теорема дәлелденді.

Ескерту. Егер $a = \alpha + i\beta$ түріндегі комплекс сан болса, онда Эльзаки кескініндегі v айнымалысы да комплекс сандар жазықтығында ығысады.

Параметр бойынша дифференциалдау туралы теорема

Егер x-тің кез келген мәнінде A жиынына тиесілі $f(t,x)$ түпнұсқа функциясының Эльзаки түрлендіруі

$$\mathrm{E}[f(t,x)](v) = T(v,x)$$

түрінде анықталса және $\frac{\partial f(t,x)}{\partial x}$ туындысы бар болып, параметр бойынша дифференциалдауды интеграл таңбасы астына енгізу шарттары орындалса, онда

$$\mathrm{E}\left[\frac{\partial f(t,x)}{\partial x}\right](v) = \frac{\partial T(v,x)}{\partial x} \tag{1.15}$$

теңдігі орындалады [1; 12].

Дәлелдеуі.

$$T(v,x) = v\int_0^\infty f(t,x)e^{-t/v}dt.$$

Параметр бойынша дифференциалдауды интеграл таңбасы астына енгізсек,

$$\frac{\partial T(v,x)}{\partial x} = v\int_0^\infty \frac{\partial f(t,x)}{\partial x}e^{-t/v}dt.$$

Соңғы өрнек анықтама бойынша

$$\mathrm{E}\left[\frac{\partial f(t,x)}{\partial x}\right](v)$$

түріне тең. Теорема дәлелденді.

Көрсеткіштік функция үшін

$$\mathrm{E}[e^{at}](v) = \frac{v^2}{1-av}.$$

Осы теңдіктің екі жағын да *a* параметрі бойынша дифференциалдау арқылы

$$\mathrm{E}[te^{at}](v) = \frac{v^3}{(1-av)^2}$$

теңдігі алынады. Жалпы жағдайда

$$\mathrm{E}[t^n e^{at}] = \frac{n!\,v^{n+2}}{(1-av)^{n+1}} \tag{1.16}$$

болады. Ал $a = 0$ болса,

$$\mathrm{E}[t^n](v) = n!\,v^{n+2} \tag{1.17}$$

Түпнұсқаны дифференциалдау туралы теорема

$\mathrm{E}[f(t)] = T(v)$ болса, онда

$$\mathrm{E}[f'(t)] = \frac{T(v)}{v} - vf(0) \tag{1.18}$$

$$\mathrm{E}[f''(t)] = \frac{T(v)}{v^2} - f(0) - vf'(0). \tag{1.19}$$

Дәлелдеуі. Анықтама бойынша

$$\mathrm{E}[f'(t)] = v\int_0^\infty f'(t)e^{-t/v}dt = v\int_0^\infty e^{-t/v}d[f(t)] = \frac{T(v)}{v} - vf(0).$$

(1.19) теңдікті дәлелдеу үшін $g(t) = f'(t)$ функциясын енгізейік. Сонда

$$\mathrm{E}\left[g'^{(t)}\right] = \frac{1}{v}\mathrm{E}[g(t)] - vg(0) = \frac{1}{v}[f'(t)] - vf'(0) =$$

$$= \frac{1}{v}\left(\frac{T(v)}{v} - vf(0)\right) - vf'(0) = \frac{T(v)}{v^2} - f(0) - vf'(0).$$

Теорема дәлелденді. Жалпы жағдайда

$$\mathrm{E}\left[f^{(n)}(t)\right] = \frac{T(v)}{v^n} - \sum_{k=0}^{n-1} v^{2-n+k} f^{(k)}(0) \tag{1.20}$$

Түпнұсқаны интегралдау туралы теорема
Егер $\mathrm{E}[f(t)] = T(v)$ болса, онда

$$\mathrm{E}\left[\int_0^t f(\tau)d\tau\right] = vT(v). \tag{1.21}$$

Дәлелдеуі.

$$\int_0^t f(\tau)d\tau = g(t)$$

болса, онда

$$g'(t) = f(t)$$

және

$$\mathrm{E}[g'(t)] = \frac{1}{v}\mathrm{E}[g(t)] - vg(0) = \frac{1}{v}\mathrm{E}[g(t)],$$

өйткені $g(0) = 0$. Демек,

$$\mathrm{E}[g(t)] = v\mathrm{E}[g'(t)]$$

немесе

$$\mathrm{E}\left[\int_0^t f(\tau)d\tau\right] = vT(v).$$

Теорема дәлелденді. Жалпы жағдайда *n* рет интегралдау үшін

$$\mathrm{E}\left[\underbrace{\int_0^t \int_0^t \ldots \int_0^t f(\tau)d\tau}_{n}\right] = v^n T(v). \tag{1.22}$$

Кескінді дифференциалдау теоремасы
Егер $\mathrm{E}[f(t)] = T(v)$ болса, онда

$$\mathrm{E}[tf(t)] = v^2 \frac{dT(v)}{dv} - vT(v). \tag{1.23}$$

Дәлелдеуі. Анықтама бойынша

$$T(v) = v\int_0^\infty f(t)e^{-t/v}dt.$$

Бұдан

$$\frac{dT(v)}{dv} = \int_0^\infty f(t)e^{-t/v}dt + \frac{v}{v^2}\int_0^\infty tf(t)e^{-t/v}dt \tag{1.24}$$

немесе

$$\frac{dT(v)}{dv} = \frac{1}{v}T(v) + \frac{1}{v^2}\mathrm{E}[tf(t)].$$

Соңғы теңдіктен (1.22) қасиеттің дәлелдеуі шығады.

Осы үрдісті жалғастыра отырып, $t^2 f(t)$ түпнұсқа функцияның Эльзаки кескінін табайық. Ол үшін (1.24) теңдікті

$$\frac{dT(v)}{dv} = \frac{1}{v}T(v) + \frac{1}{v}\int_0^\infty tf(t)e^{-t/v}dt \tag{1.25}$$

түрде алып, теңдіктің екі жағын бірдей v бойынша дифференциалдаймыз.

$$\frac{d^2T(v)}{dv^2} = -\frac{1}{v^2}T(v) + \frac{1}{v}\frac{dT(v)}{dv} - \frac{1}{v^3}\mathrm{E}[tf(t)] + \frac{1}{v^4}\mathrm{E}[t^2f(t)].$$

Бұдан

$$\mathrm{E}[t^2f(t)] = v^4\frac{d^2T(v)}{dv^2} \tag{1.26}$$

теңдігі алынады. (1.23) және (1.26) теңдіктер дифференциалдық теңдеулерді ықшамдап шешуге және аналитикалық есептеулерді оңайлатуға көмектеседі.

Сәйкес салдар:

1) $\mathrm{E}[tf'(t)] = v^2\frac{d}{dv}\left[\frac{T(v)}{v} - vf(0)\right] - v\left[\frac{T(v)}{v} - vf(0)\right],$ (1.27)

2) $\mathrm{E}[t^2f'(t)] = v^4\frac{d^2}{dv^2}\left[\frac{T(v)}{v} - vf(0)\right],$ (1.28)

3) $\mathrm{E}[tf''(t)] = v^2\frac{d}{dv}\left[\frac{T(v)}{v^2} - f(0) - vf'(0)\right] - v\left[\frac{T(v)}{v^2} - f(0) - vf'(0)\right],$ (1.29)

4) $\mathrm{E}[t^2f''(t)] = v^4\frac{d^2}{dv^2}\left[\frac{T(v)}{v^2} - f(0) - vf'(0)\right].$ (1.30)

Кескінді интегралдау теоремасы

Егер $\mathrm{E}[f(t)] = T(v)$ болса, онда

$$\mathrm{E}\left[\frac{1}{t}f(t)\right] = \int_v^\infty \frac{T(u)}{u^2}du. \tag{1.31}$$

Үйірткі және Борель теоремасы

Егер

$$h(t) = (f * g)(t) = \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau,$$

болса және

$$\mathrm{E}[f(t)] = F(v), \mathrm{E}[g(t)] = G(v),$$

онда

$$\mathrm{E}[(f * g)(t)] = \frac{1}{v}F(v)G(v). \tag{1.32}$$

Зерттеу нәтижелері

Эльзаки түрлендіруінің қолданылуы. Эльзаки түрлендіруі дифференциалдық және интегралдық теңдеулерді шешуде маңызды орын алады. Бұл түрлендіру теңдеуді кескін аймағында қарапайым алгебралық немесе функционалдық қатынасқа келтіруге мүмкіндік береді. Төменде Эльзаки түрлендіруінің қолданылуын сипаттайтын бірнеше мысал қарастырылады.

1-мысал. Эйлер теңдеуі.

$$x^2y''(x) + 4xy'(x) + 2y(x) = 12x^2, y(1) = 0, y'(1) = 0. \tag{2.1}$$

Алдымен теңдеудің аналитикалық шешімін табайық. Ол үшін

$$x = e^t, t = \ln x, x > 0$$

алмастыруын енгізіп, ізделінді функцияны $y(x) \equiv Y\big(t(x)\big)$ түрінде қарастырамыз. Сонда

$$y'(x) = \frac{Y_t'}{x}, y''(x) = \frac{Y''(t) - Y'(t)}{x^2}.$$

Осы өрнектерді (2.1) теңдеуге қойсақ,

$$Y''(t) + 3Y'(t) + 2Y(t) = 12e^{2t} \quad (2.2)$$

түрдегі тұрақты коэффициентті сызықтық дифференциалдық теңдеу аламыз. Бастапқы шарттар да жаңа айнымалыда

$$Y(0) = y(1) = 0, Y'(0) = y'(1) = 0$$

түріне келеді.

Біртекті теңдеудің сипаттамалық теңдеуі

$$k^2 + 3k + 2 = 0$$

түрде жазылады және оның түбірлері $k_1 = -2$, $k_2 = -1$. Сондықтан біртекті теңдеудің жалпы шешімі

$$Y_O(t) = C_1 e^{-2t} + C_2 e^{-t}.$$

Дербес шешімді $Y_*(t) = Ae^{2t}$ түрінде іздейміз. Оны (2.2)-ге қойсақ,

$$(4A + 6A + 2A)e^{2t} = 12e^{2t},$$

бұдан $A = 1$. Демек,

$$Y(t) = Y_O(t) + Y_*(t) = C_1 e^{-2t} + C_2 e^{-t} + e^{2t}.$$

Бастапқы айнымалыға қайта оралсақ,

$$y(x) = \frac{C_1}{x^2} + \frac{C_2}{x} + x^2. \quad (2.3)$$

Бастапқы шарттардан

$$C_1 + C_2 + 1 = 0, -2C_1 - C_2 + 2 = 0$$

жүйесін аламыз. Бұдан

$$C_1 = 3, C_2 = -4.$$

Олай болса, бастапқы есептің шешімі

$$y(x) = \frac{3}{x^2} - \frac{4}{x} + x^2.$$

Бұл есепті Сумуду түрлендіруін қолданып шығарып көрейік. Сумуду түрлендіруі.

$$\mathbb{S}[f(t)] = G(u) = \int_0^\infty f(ut)e^{-t}dt, u \in (-\tau_1, \tau_2)$$

теңдігімен беріледі. Сонда (2.1) теңдеудің Сумуду кескін теңдеуі

$$u^2G''(u) + 4uG'(u) + 2G(u) = 24u^2$$

түрде анықталады. Алынған кескін теңдеуі (2.1) теңдеуімен бірдей. Демек, Сумуду түрлендіруі (2.1) теңдеуді шеше алмайды. Ал Эльзаки түрлендіруін пайдалану үшін алдымен $x = e^t$ алмастыруы жасалып, (2.2) теңдеуге түрлендіру қолданылғаны дұрыс.

(2.2) теңдеуге Эльзаки түрлендіруін қолданамыз. Егер

$$\mathrm{E}[Y(t)](v) = T(v)$$

деп белгілесек, онда Эльзаки түрлендіруінің қасиеттері бойынша [1; 12]

$$\mathrm{E}[Y''(t)](v) = \frac{T(v)}{v^2} - Y(0) - vY'(0) = \frac{T(v)}{v^2},$$

$$\mathrm{E}[Y'(t)](v) = \frac{T(v)}{v} - vY(0) = \frac{T(v)}{v},$$

ал

$$\mathrm{E}[e^{2t}](v) = \frac{v^2}{1-2v}.$$

Сондықтан (2.2) теңдеудің кескін теңдеуі

$$\frac{T(v)}{v^2} + 3\frac{T(v)}{v} + 2T(v) = 12\frac{v^2}{1-2v}$$

түрінде жазылады. Бұдан

$$T(v)\left(\frac{1}{v^2} + 3\frac{1}{v} + 2\right) = 12\frac{v^2}{1-2v}.$$

Осыдан

$$T(v) = \frac{12v^4}{(1-2v)(1+v)(1+2v)}.$$

Табылған өрнекті қарапайым бөлшектерге жіктейміз:

$$T(v) = \frac{v^2}{1-2v} - \frac{4v^2}{1+v} + \frac{3v^2}{1+2v}.$$

Кері Эльзаки түрлендіруінің кестесін пайдалансақ,

$$\mathrm{E}^{-1}\left[\frac{v^2}{1-2v}\right] = e^{2t}, \mathrm{E}^{-1}\left[\frac{v^2}{1+v}\right] = e^{-t}, \mathrm{E}^{-1}\left[\frac{v^2}{1+2v}\right] = e^{-2t}.$$

Бұдан

$$Y(t) = e^{2t} - 4e^{-t} + 3e^{-2t}.$$

Бастапқы айнымалыға қайта оралсақ $(t = \ln x)$, бастапқы аналитикалық әдіспен табылған шешімге сәйкес шешімді аламыз:

$$y(x) = \frac{3}{x^2} - \frac{4}{x} + x^2.$$

2-мысал. Тұрақты коэффициентті біртекті емес теңдеу.

Келесі бастапқы есепті қарастырайық:

$$y'' + 2y' + 2y = xe^{-x}, y(0) = y'(0) = 0. \quad (2.5)$$

Эльзаки түрлендіруін қолдансақ,

$$\mathrm{E}[y''(x)] + 2\mathrm{E}[y'(x)] + 2\mathrm{E}[y(x)] = \mathrm{E}[xe^{-x}].$$

Бастапқы шарттарды ескерсек,

$$\frac{T(v)}{v^2} + 2\frac{T(v)}{v} + 2T(v) = \frac{v^3}{(1+v)^2}.$$

Осыдан

$$T(v) = \frac{v^5}{(2v^2+2v+1)(1+v)^2} = \frac{v^3}{(1+v)^2} - \frac{v^3}{(1+v)^2+v^2}.$$

Кері Эльзаки түрлендіруін қолдансақ,

$$y(x) = xe^{-x} - e^{-x}\sin x = e^{-x}(x - \sin x).$$

Бұл шешім бастапқы шарттарды қанағаттандырады.

3-мысал. Вольтеррдің екінші текті интегралдық теңдеуі.
Келесі теңдеу берілсін:

$$y(x) = \sin x + \int_0^x \sin(x-t)\, y(t)dt. \tag{2.6}$$

Бұл Вольтеррдің екінші текті сызықтық интегралдық теңдеуі.
Үйірткі теоремасын қолдансақ,

$$\mathrm{E}[y(x)] = \mathrm{E}[\sin x] + \mathrm{E}\Big[\int_0^x \sin(x-t)\, y(t)dt\Big].$$

Яғни

$$T(v) = \frac{v^3}{1+v^2} + \frac{1}{v}\cdot\frac{v^3}{1+v^2}T(v).$$

Осыдан

$$T(v) = v^3.$$

Кері Эльзаки түрлендіруі бойынша

$$y(x) = x.$$

Шынында да, бұл функция берілген интегралдық теңдеуді қанағаттандырады.

4-мысал. Интегралдық теңдеу.
Келесі теңдеуді қарастырайық:

$$y(x) = \int_0^x (x-t)y(t)dt + x^2.$$

Үйірткі теоремасы бойынша

$$\mathrm{E}[y(x)] = \mathrm{E}\Big[\int_0^x (x-t)y(t)dt\Big] + \mathrm{E}[x^2].$$

Осыдан

$$T(v) = \frac{1}{v}v^3T(v) + 2v^4.$$

Яғни

$$T(v) = v^2T(v) + 2v^4,\ T(v) = \frac{2v^4}{1-v^2}.$$

Мұны

$$T(v) = 2\left(\frac{v^2}{1-v^2} - v^2\right)$$

түрінде жазуға болады. Кері Эльзаки түрлендіруін қолдансақ,

$$y(x) = 2(chx - 1).$$

Демек, интегралдық теңдеудің шешімі осы функция болады.

5-мысал. Лагерр көпмүшесі бар теңдеу.
Келесі бастапқы есеп берілсін:

$$y'' + 4y = L_2(x),\ y(0) = 0,\ y'(0) = 1, \tag{2.7}$$

мұндағы $L_2(x)$ – екінші ретті Лагерр көпмүшесі.

Математикада Лагерр көпмүшелері

$$xy'' + (1-x)y' + ny = 0$$

түрде берілген екінші ретті сызықтық Лагерр дифференциалдық теңдеуінің канондық шешімдері болып табылады. Лагерр көпмүшелері L_0, L_1, … таңбаларымен белгіленеді және Родриг формуласымен анықталады:

$$L_n(x) = \frac{e^x}{n!}\frac{d^n}{dx^n}(e^{-x}x^n) = \sum_{k=0}^{n}\frac{(-1)^k}{k!}C_n^k x^k.$$

Анықтама бойынша

$$L_2(x) = 1 - 2x + \frac{x^2}{2}.$$

Эльзаки түрлендіруінің сызықтық қасиеті мен $\mathrm{E}[x^n] = n!\,v^{n+2}$ формуласын пайдалансақ, онда

$$\mathrm{E}[L_n(x)] = v^2(1-v)^n.$$

Сонда

$$\mathrm{E}[L_2(x)] = v^2(1-v)^2.$$

Енді (2.7) теңдеуге Эльзаки түрлендіруін қолданамыз:

$$\mathrm{E}[y''(x)] + 4\mathrm{E}[y(x)] = \mathrm{E}[L_2(x)].$$

Бастапқы шарттарды ескерсек,

$$\frac{T(v)}{v^2} - v + 4T(v) = v^2(1-v)^2.$$

Осыдан

$$T(v) = \frac{1}{4}v^4 - \frac{1}{2}v^3 + \frac{3}{16}v^2 + \frac{\frac{3}{2}v^3 - \frac{3}{16}v^2}{1+4v^2}.$$

Кері Эльзаки түрлендіруін қолдансақ, ізделінді шешім

$$y(x) = \frac{x^2}{8} - \frac{x}{2} + \frac{3}{16} - \frac{3}{16}\cos 2x + \frac{3}{4}\sin 2x \qquad (2.8)$$

түрінде табылады.

Дискуссия

Мақалада Эльзаки түрлендіруінің математикалық негіздері мен қолданбалы есептерді шешудегі рөлі талданды. Зерттеу интегралдық түрлендірулер теориясын, әсіресе дифференциалдық теңдеулерді шешудің аналитикалық әдістерін дамытуға бағытталған.

Эльзаки түрлендіруінің қасиеттерін жүйелеу оның Лаплас және Сумуду түрлендірулерімен салыстырғандағы ерекшеліктерін айқындауға мүмкіндік береді. Эльзаки түрлендіруінің басты артықшылықтарының бірі кейбір есептерді жаңа жиілік аймағына толық көшірмей-ақ талдауға мүмкіндік беруінде. Сонымен қатар көрсеткіштік, тригонометриялық және гиперболалық функциялар үшін алынған кескіндер кестесі қолданбалы есептерді шешуде тиімді құрал бола алады. Мақала нәтижелері Elzaki және оның әріптестерінің еңбектерімен [1-5] үйлеседі. Сонымен бірге Эльзаки түрлендіруін инженерлік есептерде, соның ішінде энергетикалық жүйелерді модельдеу мен қорғаныс алгоритмдерін зерттеуде қолданудың болашағы бар [6; 8]. Осыған байланысты болашақ зерттеулерде оны фракталдық және бөлшек ретті дифференциалдық теңдеулерге, сондай-ақ сандық әдістермен біріктірілген гибридтік тәсілдерге қолдану өзекті болып табылады.

Қорытынды

Эльзаки түрлендіруі интегралдық түрлендірулердің тиімді аналитикалық әдістерінің бірі болып табылады. Оның Лаплас және Сумуду түрлендірулерімен байланысы айқын, әрі ол дифференциалдық және интегро-дифференциалдық теңдеулерді шешуде жаңа мүмкіндіктер береді. Жұмыста Эльзаки түрлендіруінің негізгі қасиеттері мен теоремалары жүйеленіп, қарапайым функциялардың кескіндері анықталды. Сонымен қатар оның көмегімен тұрақты және айнымалы коэффициентті сызықтық дифференциалдық теңдеулерді шешуге қолдану мүмкіндіктері көрсетілді. Әдістің маңызды артықшылығы оның аналитикалық сипатында. Осыған байланысты Эльзаки түрлендіруі математикалық физикада, тербелістер теориясында, автоматты басқаруда және басқа да қолданбалы салаларда болашағы зор құрал болып табылады. Жалпы алғанда, мақаланың мақсаты Эльзаки түрлендіруінің қолданылу аясын кеңейту және оны жаңа математикалық әрі инженерлік есептерде пайдаланудың мүмкіндіктерін көрсету болып табылады.

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1] Elzaki T.M. The New Integral Transform "Elzaki Transform" // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2011. – № 1. – P. 57–64. – ISSN 0973-1768.

[2] Elzaki T.M., Elzaki S.M. Application of New Transform "Elzaki Transform" to Partial Differential Equations // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2011. – № 1. – P. 65–70. – ISSN 0973-1768.

[3] Elzaki T.M., Elzaki S.M. On the Connections Between Laplace and Elzaki Transforms // Advances in Theoretical and Applied Mathematics. – 2011. – Vol. 6, № 1. – P. 1–11. – ISSN 0973-4554.

[4] Elzaki T.M., Elzaki S.M. On the Elzaki Transform and Ordinary Differential Equation With Variable Coefficients // Advances in Theoretical and Applied Mathematics. – 2011. – Vol. 6, № 1. – P. 13–18. – ISSN 0973-4554.

[5] Elzaki T.M., Elzaki S.M. On the ELzaki Transform and Systems of Ordinary Differential Equations // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. 2011. Vol. 7, No. 1. P. 113-119.

[6] Liu Y., Sun K., Dong J. A Dynamized Power Flow Method Based on Differential Transformation // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 182441–182450.

[7] Сағындықов Б.Ж. Математиканың арнайы тараулары: Оқу құралы. – Алматы: Лантар Трейд ЖШС, 2022. – 183 б.

[8] Medeiros R.P., Costa F.B., Silva K.M. Power Transformer Differential Protection Using the Boundary Discrete Wavelet Transform // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – Vol. 31, № 5. – P. 2083–2095.

[9] Watulaga G.K. Sumudu Transform – A New Integral Transform to Solve Differential Equations and Control Engineering Problems // Mathematical Engineering in Industry. – 1998. – Vol. 6, № 4. – P. 319–329.

[10] Bulut H., Evans D.J. On the Solution of the Riccati Equation by the Decomposition Method // International Journal of Computational Mathematics. – 2002. – Vol. 79. – P. 103–109.

[11] Mohamed M.Z., Elzaki T.M. Solutions of Fractional Ordinary Differential Equations by Using Elzaki Transform // Applied Mathematics. – 2014. – Vol. 9, № 1. – P. 27–33. – ISSN 0973-4554.

[12] Dobrushkin V. Elzaki and Sumudu transforms [Electronic resource]. URL: https://www.cfm.brown.edu/people/dobrush/am33/Mathematica/ch6/elzaki.html (accessed: 21.03.2026).

[13] Widder D.V. The Laplace Transform. – Princeton: Princeton University Press, 2015. – 418 p.

[14] Doetsch G. Introduction to the Theory and Application of the Laplace Transformation. – Berlin; Heidelberg: Springer, 1974. – 326 p.

ҒТАХР 29.17.43

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.004

А.М. Татенов[1], А.Т. Жавлиева[1], Г.Ж. Жаналиева[1], А.Ә. Қамбаш[1*], А. Файзуллина[1]

[1] Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
*e-mail: kambash2107@gmail.com

КИНЕТИКАЛЫҚ ТЕОРИЯДАҒЫ ТЕПЕ–ТЕҢСІЗДІК ЖҮЙЕЛЕРДІ СТОХАСТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ МОДЕЛДЕР АРҚЫЛЫ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа

Ұсынылып отырған мақала корреляциялы флуктуацияланған газдағы тепе–теңсіздік процестердің кинетикалық теориясының ықтималдылық қырын теориялық тұрғыда зерттеуге арналған. Дәлірек айтқанда, жүйенің фазалық тығыздығына арналған стохастикалық сипаттағы кинетикалық теңдеу, оның үлестірімі мен сипаттамалық функционалға арналған теңдеулер, туындаушы функционалға арналған теңдеу үлестірім функциясы үшін жазылатын қайтымсыз кинетикалық теңдеуге ұқсас (эквивалент) түрде шығарылып көретілген. Бұл теңдеуді шығарып алу кезінде бір атомды газдағы бөлшектердің жұптық соқтығысулары мен жүйедегі ауқымды флуктуацияларды ескерілді. Сонымен бірге, статистикалық жүйедегі динамикалық траекториялар жиыны және бір бөлшекті күй тығыздығының орташаланбаған мәндері Гиббстің фазалық кеңістігінде қарастырылды. Жүйе күйлерінің осы кеңістіктегі үлестірімі (таралымы) арқылы стохастикалық әдіске негіз бола алатын классикалық статистикалық механиканың функционалдылы ықтималдылық келбеті (бет–бейнесі) ашылып көрсетілді. Фазалық тығыздыққа арналған стохастикалық теңдеуді марктік секірмелі процестер моделі бойынша Лиувилл теңдеуінен де шығарып алуға болатындығы дәлелденді. Аталған теңдеу Больцман теңдеуіне ұқсас болғанымен, бұл теңдеуге сызықтық емес «флуктуация көзі» рөліндегі қосымша мүше қосылған. Алынған теңдеудің статистикалық сипаттамалары анықталды. Жүйенің фазалық тығыздығына арналған стохастикалық теңдеу жүйенің диссипативтік және флуктуациялық қасиеттерін тұтастай ескере алады және Больцман–Ланжевен теңдеуінің тепе–теңсіз газдың орнықсыз күйлері үшін жалпыланған түрі болып табылады. Гидродинамикалық айнымалылар мен стохастикалық теңдеулер арқылы корреляциялық жүйенің тұйық гидродинамикалық сипаттамасы берілді. Сипаттауыш функционалдың дербес үлестірім функциялар жүйесіне арналған туындауыш функционалмен байланысы интегралдық теңдеулер арқылы беріліп, олардың бастапқы шарттарға сәйкес келетін дербес шешімдері көрсетілді.

Түйін сөздер: фазалық тығыздық, тепе–теңсіз процестер, флуктуация, стохастика, кинетикалық теңдеу, корреляция, функционалдылық, модель.

А.М. Татенов[1], А.Т. Жавлиева[1], Г.Ж. Жаналиева[1], А.А. Камбаш[1*], А. Файзуллина[1]
[1] Казахский национальный женский педагогичесий университет, г. Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМ В КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКИХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Аннотация

Предлагаемая статья посвящена теоретическому исследованию вероятностного аспекта кинетической теории процессов неравновесных процессов в коррелированном флуктуированном газе. Точнее, кинетическое уравнение стохастической природы для фазовой плотности системы, уравнения для ее распределения и характеристического функционала, уравнение для производного функционала, эквивалентно выводится аналогично необратимому кинетическому уравнению для функции распределения. При выводе этого уравнения учитывались парные столкновения частиц в одноатомном газе и крупномасштабные флуктуации в системе. При этом в фазовом пространстве Гиббса рассматривались множество динамических траекторий в статистической системе и не усредненные значения плотности одночастичного состояния. С помощью этого пространственного распределения состояний системы раскрывает функционально вероятностное представление классической

статистической механики, который служит основой для стохастического метода. Стохастическое уравнение для фазовой плотности выведено из уравнения Лиувилля по модели марковских скачкообразных процессов. Хотя это уравнение эквивалентно уравнению Больцмана, к нему добавлен дополнительный член, называемый нелинейным «источником флуктуации». Определены статистические характеристики полученного уравнения. Стохастическое уравнение для фазовой плотности системы может учитывать диссипативные и флуктуационные свойства системы в целом и является обобщенной формой уравнения Больцмана-Ланжевена для неустойчивых состояний равновесного газа. С помощью гидродинамических переменных и стохастических уравнений была дана замкнутая гидродинамическая характеристика корреляционной системы. Связь характеристического функционала с производящим функционалом для системы частных функций распределений задается интегральными уравнениями и показаны их частные решения, соответствующие начальным условиям.

Ключевые слова: фазовая плотность, неравновесные процессы, флуктуация, стохастика, кинетическое уравнение, корреляция, функциональность, модель.

A.M. Tatenov[1], A.T. Zhavliyeva, G.J. Zhanaliyeva[1], A.A. Kambash[1]*, A. Faizullina[1]
[1] Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

STUDY OF NONEQUILIBRIUM SYSTEMS IN KINETIC THEORY USING STOCHASTIC AND FUNCTIONAL MODELS

Abstract

This paper is devoted to the theoretical investigation of the probabilistic aspect of the kinetic theory of nonequilibrium processes in a correlated fluctuating gas. More specifically, a stochastic kinetic equation for the phase density of the system, together with the corresponding equations for its distribution and characteristic functional, as well as the equation for the generating functional, is consistently derived in a form equivalent to the irreversible kinetic equation for the distribution function. In deriving this equation, pair collisions of particles in a monoatomic gas and large-scale fluctuations in the system are considered. Within the Gibbs phase space, a multitude of dynamical trajectories in the statistical system are considered, along with non-averaged values of the single-particle state density. This spatial representation of system states reveals a functional–probabilistic formulation of classical statistical mechanics that forms the basis of the stochastic approach. The stochastic equation for the phase density is derived from the Liouville equation using a model of Markov jump processes. Although this equation is equivalent to the Boltzmann equation, it includes an additional term referred to as the nonlinear “fluctuation source.” The statistical characteristics of the resulting equation are established. The stochastic equation for the phase density of the system accounts for both dissipative and fluctuation properties and represents a generalized form of the Boltzmann–Langevin equation for unstable states of an equilibrium gas. Using hydrodynamic variables and stochastic equations, a closed hydrodynamic description of the correlation system is obtained. The relationship between the characteristic functional and the generating functional for the hierarchy of partial distribution functions is formulated through integral equations, and particular solutions corresponding to the initial conditions are presented.

Keywords: phase density, nonequilibrium processes, fluctuations, stochasticity, kinetic equation, correlation, functional formulation, model.

Кіріспе

Негізгі ойлар

Стохастикалық процестерді зерттеп, зерделеу үшін тепе–теңсіз жүйелердің кинетикалық теориясы мен ықтималдылықтар теориясының әдістері, сонымен бірге стохастикалық интегралдар мен дифференциалдық теңдеулер секілді арнайы математикалық аппараттарды қолдану қажет болады. Қайтымсыз тепе–теңсіз процестер кезіндегі статистикалық шамалардың уақыт бойынша өзгерісі сыртқы ықпалдарға тәуелді емес, яғни статикалық тепе–теңділік күйлер секілді тұрақтылыққа икемделмеген. Статистикалық физика мен физикалық кинетикадағы функционалдық зерттеу моделдері өте көп бөлшектерден тұратын жүйедегі құбылыстарды сипаттаудың математикалық және концепциялық құралдары болып табылады. Ол үшін бөлшектер арасындағы күрделі әсерлесулерді қарастыратын моделді теңдеулер қолданылады. Тепе–теңсіздік процестерге ұқсас көптеген процестердің ішінен Марковтік

стохастикалық процестерді атап өтуге болады. Бұл процесс жүйенің келесі күйдегі жағдайы оның қазіргі күйінің параметрлеріне тәуелді болуымен ерекшеленеді. Жүйе өзінің күйлерін кездейсоқ түрде өзгертіп отырады (марктік тізбек).

Термодинамикадағы, статистикалық физикадағы және физикалық кинетикадағы ауқымды флуктуациялар бөлшектердің жылулық қозғалыстарына негізделген, яғни әрбір бөлшектің бейберекет тербелістерінің сипаты бүкіл жүйедегі ауқымды макроскопиялық өзгерістерге себепші болады. Флуктуациялар теориясының негізін қалаушылар Альберт Эйнштейн мен Мариан Смолуховскийдің броундық қозғалыс және флуктуациялар теориясына арналған зерттеулерінде термодинамиканың екінші бастамасының статистикалық түсіндірмесі мен бастаманың қолданылу шекарасына қатысты мәтың мәліметтер келтірілген. Аталған еңбектерде флуктуация ұғымы, оны есептеу тәсілдері және олардың термодинамикалық параметрлермен байланысы туралы да баяндалған. Флуктуацияларға заттың атомдық құрылымы мен жылулық қозғалыстардың хаостылық сипатының дәлелі деп қарасақ болады және ол статистикалық физиканың негізгі принциптері болып табылады.

Жалпы жағдайда, жұптылық соқтығысулар жуықтауларында ауқымды флуктуацияларды ескеретін бір атомды газдың эволюциясының кинетикалық дәуірі бөлшектік үлестірім функциясына арналған қайтымсыз кинетикалық теңдеулермен сипатталады:

$$\frac{\partial F_s}{\partial t} = \sum_{j=1}^{s}\Big[H_1\left(x_j\right); F_s \Big] + \sum_{i\le j=1}^{s} I_{x_i x_j}\left[F_s\right] + n\sum_{j=1}^{s}\int dx_{s+1} I_{x_j x_{s+1}}\left[F_{s+1}\right], \tag{1}$$

мұндағы

$$I_{x_j} = \int dx_i I_{x_i x_j} = \int dx_i I_{x_j x_i} \tag{2}$$

Больцмандық соқтығысу интегралы; $x_j \equiv \left(\vec{r}_j, \vec{p}_j\right)$; H_1–бір бөлшектік гамильтониан; N және V–бөлшектер саны мен жүйенің көлемі; $\left[..;..\right]$ – Пуассон жақшасы. (1)–теңдеуде кинетикалық теориядағы маңызы бар уақыт аралығында орташа еркін өту жолының ұзындығынан өте аз болатын радиустағы флуктуациялар өшіп отыратындығы ескерілген [2]. Бұл жағдай больцманның молекулалық хаос болжамын алмастыра алатын корреляцияның бөліктік әлсіреуі шарты болып табылады. Осы түрғыдан алғанда молекулалық хаос шарты тек орнықты тепе–теңсіз күйлер үшін ғана орындалады. Жүйе күйінің бір бөлшектік тығыздығының ($N_i\left(x\right)$) өзгерісі кездейсоқтық сипатта өтетін болғандықтан, флуктуацияларды кеңістіктік–уақытты масштабтарда ескеруге мәжбүр боламыз, яғни $N_t\left(x\right)$–ге арналған Больцманның газдыкинетикалық теңдеуінің орнына (1)-теңдеулер жүйесіне эквивалент болатын бір бөлшекті стахостикалық кинетикалық теңдеу қолданылатын болады. Ал, орнықты тепе–теңсіздік күйлердегі мардымсыз флуктуациялар үшін мұндай теңдеу ретінде $\delta N_t = N_t - \overline{N_t}$ түрдегі гаусстық флуктуацияларға арналған ланжевендік теңдеуді қолданамыз.

Ұсынылып отырған мақала корреляциялы флуктуациялық газдағы тепе–теңсіздік процестердің кинетикалық теориясының ықтималдылық қырына (апекттеріне) арналған. Дәлірек айтқанда, жүйенің $N_t\left(x\right)$ фазалық тығыздығына арналған стохастикалық сипаттағы кинетикалық теңдеуді, оның үлестірімі мен сипаттамалық функционалына арналған теңдеулерді және туындаушы функционалға арналған теңдеулерді (1)-теңдеуге ұқсас (эквивалент) түрде шығарып алу мақсатындағы есептеулер орындалатын болады. Бұл ретте статистикалық жүйедегі фазалық траекториялар жиыны бір бөлшекті күй тығыздығының орташаланбаған мәндерінің J кеңістігінде қарастырылатын болады. Жүйе күйлерінің осы кеңістіктегі үлестірімі (таралымы) арқылы стохастикалық әдістің негізін құрайтын

классикалық статистикалық механиканың функционалдылы ықтималдылық келбеті (бет-бейнесі) ашылатын болады. $N_t(x)$-ге арналған стохастикалық теңдеуді марктік секірмелі процестер моделі бойынша Лиувилл теңдеуінен шығарып алу жағдайлары қарастырылған. Бұл теңдеу Больцман теңдеуіне ұқсас болғанымен, бұл теңдеуге сызықтық емес «флуктуация көзі» болып табылатын қосымша мүше қосылады. Алынған теңдеудің статистикалық сипаттамалары анықталды. Сонымен бірге, жүйенің фазалық тығыздығына арналған стохастикалық теңдеу жүйенің диссипативтік және флуктуациялық қасиеттерін тұтас түрде ескеруге мүмкіндік береді және Больцман–Ланжевен теңдеуінің тепе–теңсіз газдың орнықсыз күйлері үшін жалпыланған түрі болып табылады.

Зерттеу әдіснамасы

Бөлшектері жұптасып соқтығысатын корреляциялы флуктуациялық газдағы тепе–теңсіздік процестердің кинетикалық теориясы стохастикалық әдіске негізделген. Бұл зерттеу әдісі тепе–теңсіздік жүйелердің флуктуациялық және диссипативтік қасиеттерін бірмезгілде тұстастай қарастыра (ескерек) алатын кеңістіктік–уақытты масштабтағы (ауқымдағы) марктік процестерге ұқсас. Сонымен бірге, осы әдіске сүйенетін функционалдық–кинетикалық моделде де тепе–теңсіздік жүйенің аса жоғары флуктуацияланған және күшті корреляцияланған күйлері сызықтық емес стохастикалық теңдеулер арқылы сипатталады [1]. Функционалдық моделде жүйенің жағдайын молекулалық–кинетикалық құрылым тұрғысында қарастыратын математикалық теңдеулер жүйесі кинетикалық–стохастикалық процестерді болжауға және талдауға мүмкіндік береді. Әрине, мұндай теңдеулердің табиғаты кездейсоқтық немес анықталмағандық секілді түсініктерге сәйкес келгенімен, оның грек тіліндегі баламасы мақсат, болжау дегенді білдіреді. Біздің зерттеу жағдайымызға «болжау» нұсқасы сәйкес келетін сияқты. Себебі, жүйедегі стохастикалық сипаттағы процестер шектеулі заңдылықтар шеңберінде қалып қоймайды, яғни жүйенің күйлері болжамды немесе кездейсоқ шамалар арқылы сипатталатын болады.

Зерттеу өзектілігі

Статистикалық жүйелердегі тепе–теңсіздік процестерді зерттеудің өзектілігі ең алдымен Жаратылыстың эволюциясын түбегейлі түсінумен тікелей байланысты. Жүргізіліп жатқан тәжірибелік және теориялық зерттеулер жүйенің реттілік күйден хаосқа және кері бағытта өту тетіктерін, қарапайым элементтерден күрделі құрылымдардың пайда болу себептерін және осы процестердің термаодинамикамен және физиканың басқа да заңдылықтармен байланысын түсіндіруге мүмкіндік береді. Тепе–теңсіздік процестер әсіресе плазма физикасында, гидродинамикада, астрофизикада, биология мен химияда шешуші рөл атқара отырып күрделі жүйелерді басқару, жаңа материалдар жасау, технологиялық үрдісті оңтайландыру секілді қолданбалы мәселелерді де шешуге қауқарлы. Сонымен бірге, моделдеу және талдау тәсілдері арқылы жүйелердегі реттіліктің шегін анықтап бере алады.

Материалдар мен әдістер

Математикадағы ықтималдылықтар теориясы және математикалық статистика секілді бөлімдерде кездейсоқ шамалар мен процестердің заңдылықтары қарастырылып, олардың басқа салаларда әдістемелік аппарат ретінде қолданылу ерекшеліктері көрсетіледі. Мысалы, оңтайландыру әдістері арқылы кездейсоқ процестер мен мәліметтер статистикалық тұрғыдан өңделеді, ал жаратылыстану ғылымында газдың қысымын модельдеуге арналған Винерлік процестер кезінде молекулалар шоғырының қозғалысын есептеп шығаруға және оның сипатын алдын–ала болжауға көмектеседі. Осы секілді математикалы–статистикалық модельдер мен әдістер қазіргі заманға ғылыми зерттеулердің негізін құрайды, мысалы: корреляциялық және регрессиялық модельдер, негізгі компоненттер тәсілі, кластерлік талдау, статистикалық сынақтар (Монте–Карло) әдісі. Стохастикалық теорияны физиканың барлық

бөлімдеріне қолданса болады, әсіресе оның статистикалық физика, конденсрлік күй физикасы, қатты денелер физикасы, элементар бөлшектер физикасы мен стохастық резонанс атты құбылыс үшін маңызы ерекше.

Тепе–теңсіздік процестердің кинетикалық теориясында Больцман теңдеуі мен оның жуықтаулары (мысалы, Чепмен–Энской теңдеуі) секілді әдістер де қолданылады. Олар жүйедегі бөлшектердің қозғалыстары мен соқтығысу сипаттарына қатысты барлық теориялық мәліметтерге талдаулар жасап бере алады. Ал материалдарға физикалық нысандар емес, керісінше концепциялық математикалық құралдар жатады, мысалы: кинетикалық теңдеулер, үлестірім функциялары және статистикалық моменттер (тығыздық, жылдамдық және температура).

Негізгі бөлім. Статистикалық жүйенің микроскопиялық тығыздығы мен оның үлестірімі. Орталық әсерлесу потенциалы $U_{r_i r_j} = U\left(\left|r_i - r_j\right|\right)$ болатын N бөлшекті бір атомды классикалық газды қарастырайық. Жүйенің динамикалық жағдайын анықтау үшін ең алдымен бізге микроскопиялық фазалық тығыздықтың кез–келген уақыт мезетіндегі мәні белгілі болуы қажет [3]:

$$N_t\left(x\right) = N\left(x;\Gamma_i\right) = \sum_{i=1}^{N} \delta\left(x - x_i\left(t\right)\right) \tag{3}$$

$$\Gamma = \left(x_1, ..., x_N\right), \quad x_i = \left(\vec{r}_i, \vec{p}_i\right)$$

мұндағы Γ_i – Гиббстің фазалық кеңістігіндегі динамикалық траектория. Айталық, Ω – үзіліссіз шектелген $\varphi = \varphi\left(x\right)$, $x = \left(\vec{r}, \vec{p}\right)$ функциялар кеңістігі болсын. Жүйенің Ω кеңістіктегі динамикалық траекториясын (N_t) төмендегі теңдеудің $N_0\left(x\right) = N\left(x;\Gamma_0\right)$ шартына сәйкес шешу арқылы табуға болады:

$$\frac{\partial N_t\left(x\right)}{\partial t} = \left[H_1\left(x\right); N_t\left(x\right)\right] + \int d\tilde{x}\left[U_{r\tilde{r}}; N_t\left(x\right) N_t\left(\tilde{x}\right)\right] \equiv Q\left[N_t\right] \tag{4}$$

Жүйенің бастапқы уақыт мезетіндегі кездейсоқ $\Gamma_0\left(\omega\right)$ күйінің $P_N\left(\Gamma\right)$ таралым (үлестірім) тығыздығы Ω кеңістіктегі $N_0\left(x;\omega\right) = N\left(x;\Gamma_0\left(\omega\right)\right)$ шамасы мен оның

$$\rho_0\left[B\right] = \left\langle \Delta_{N_0(\omega)}\left[B\right] \right\rangle = \int d\Gamma P_N\left(\Gamma\right) \Delta_{N(\Gamma)}\left[B\right] \tag{5}$$

таралымын анықтап бере алады. Бұл өрнектегі $B - \Omega$ кеңістіктегі σ алгебралар жиыны; $\Delta_f\left[B\right] - f$ нүктеде шоғырланған (жинақталған) өлшем. Егер $\rho_t\left[B\right] - t$ уақыт мезетінде жүйе фазалық тығыздығы $f\left(x\right) \in B$ күйде болу ықтималдылығы болса [4], онда Лиувилл теңдеуінің орнын баса алатын теңдеу ретінде осы $\rho_t\left[B\right]$–ға арналған теңдеуді қолдануымызға әбден болады:

$$\rho_t\left[B\right] = \int \rho_0\left[df_0\right] P\left[t, B, 0, f_0\right], \quad P\left[t, B, 0, f_0\right] = \Delta_{N_t[f_0]}\left[B\right] \tag{6}$$

Бұл жерде $P\left[t, B, 0, f_0\right] - t$ уақыт мезетіндегі фазалық тығыздықтың $N_0\left(x\right) = f_0\left(x\right)$ шарты бойынша таралымы, ал $N_t\left[x, f_0\right]$ – (4)–теңдеудің $N_0\left[x, f_0\right] = f_0\left(x\right)$ шартына сәйкес келетін

шешімі. $\rho_t[B]$–ға арналған теңдеуді тікелей (4) және (6)–теңдеулерден оңай шығарып алуға болады:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_t[df] = -\int dx \frac{\delta}{\delta f(x)} Q_x[f]\rho[df] \equiv -L_f \rho_t[df] \tag{7}$$

Мұнда $df \in B$, $\frac{\delta}{\delta f(x)} - \Omega$ кеңістіктегі $G[f] = G[f,\varphi]$ түрдегі функционалдар үшін анықталған вариациялық туындылар [5]. Осы жерде төмендегі тұрдегі сипаттауыш функционалды енгізген орынды болмақ:

$$\Phi_t[\varphi] = \int \rho_t[df]\exp[i(f,\varphi)],\ (f,\varphi) = \int dx f(x)\varphi(x) \tag{8}$$

Бұның дербес үлестірім функциялардың $\{F(t)_s\}$ түрдегі жүйесіне арналған туындауыш функционалмен байланысы төмендегідей теңдікпен беріледі:

$$F_s(t,x_1,...,x_s) = V^s \int dx_{s+1...} dx_N P_N(t,\Gamma)$$

$n = \frac{N}{V}$ қатынасын, $1 + \frac{u(x)}{n} = \exp[i\varphi(x)]$ түрлендіруін және

$$L_t[u] = \Phi_i\left[\frac{1}{i}\ln\left(1+\frac{u}{n}\right)\right] \tag{9}$$

белгілеуін пайдалана отырып, (5) пен (8)–ден мынаны аламыз:

$$F_s(t,x_1,...,x_s) = \frac{N^{s-1}}{(N-1)...(N-s+1)} \frac{\delta^* L_t[u]}{\delta u(x_1)...\delta u(x_s)}$$

Егер, төмендегі

$$\frac{\delta}{i\delta\varphi(x)}\Phi_i = n\left[1+\frac{u(x)}{n}\right]\frac{\delta}{\delta u(x)} L_i$$

өрнегін пайдаланар болсақ, онда L_t–ге арналған теңдеуді шығарып алуға болады:

$$\frac{\partial}{\partial t} L_t = \int dx u_x \left[H_1, \frac{\delta L_t}{\delta u_x}\right] + \frac{1}{2}\int dx d\tilde{x}\left(u_x u_{\tilde{x}} + n u_x + n u_{\tilde{x}}\right)\left[\Phi_{\tilde{x}\tilde{r}}, \frac{\delta^2 L_t}{\delta u_x \delta u_{\tilde{x}}}\right]$$

(8) және (9) формулалары $L_t[u]$ – туындаушы функционалды ықтималды $\rho_t[df]$ өлшеммен байланыстырады. (7)–теңдеу уақыт түрлендірулеріне қарағанда инварианттылықты сақтап қалады және ол жүйе қозғалысын $N_t(x)$ траекториялар жиынында қарастыратын болғандықтан бастапқы $\rho_0[df]$ шарттар бойынша анықталатын энтропия уақыт бойынша тұрақты шамаға айналады [6,7]. Осыған байланысты, фазалық траекториялардың стохастикалық сипат алуына байланысты энтропиясы өсетін қайтымсыз процестердің уақыт бойынша эволюциясын қарастыру өте маңызды сипат ала бастайды. Қайтымсыздық–жүйенің

ішкі қасиеті емес, керісінше макроскопиялық өлшемдер мен жүйенің ерекшелігіне байланысты болатын ұғым.

Стохастикалық модель. Әлсіз біртексіз сиретілген газды ұяшықтық құрылымда қарастыру ыңғайлы. Бір координаталық ұяшықтағы жұптық әсерлесулерге түсетін бөлшектерді p_1, p_2 күйлерден $\tilde{p}_1, \tilde{p}_2$ күйлерге өтуін бірлік уақыттағы $W = W\left(p_1, p_2 \mid \tilde{p}_1, \tilde{p}_2\right)$ өту ықтималдылығымен сипаттауға болады, ал ірі құрылымдық фазалық тығыздықты $N_t\left(x, \omega\right)$ түрдегі кездейсоқ марктік процесс деп қарастыру мүмкіндігі бар. Осы жағдайларға сәйкес, ірі құрылымдық фазалық тығыздықтың үлестіріміне арналған теңдеу мына түрде жазылады:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_t\left[df\right] = \int \rho_t\left[df_1\right] R\left[f_1, df\right]$$

$$R\left[f_1, df\right] = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P\left[t + \Delta t, df; t, f_1\right] - \Delta_{f_1}\left[df\right]}{\Delta t}$$

Қазіргі біздің міндетіміз– $P\left[t + \Delta t, df; t, f_1\right]$ өту ықтималдылығын Δt мүшелерге дейінгі дәлдікпен есептеу. Бірбөлшекті күй тығыздығының уақыт бойынша өзгерісі екі түрлі процесс бойынша анықталады: 1) координаталық кеңістіктің әртүрлі ұяшықтарындағы бөлшектердің жүйелі түрдегі қозғалыстыры; 2) кез–келген ұяшыққа келіп түсетін бөлшек күйлерінің импульсті стохастикалық өзгерістері. Бұл жағдайлар жүйе эволюциясының марктік сипатта болуы мүмкін деген болжаммен байланысты екендігі даусыз [8,9]. Осыған сәйкес, өту ықтималдылығын төмендегі бейнеде алатын боламыз:

$$P\left[t + \Delta t, df; t, f_1\right] = \left(1 - \Delta t \nu\left[f_1^{\Delta t}\right]\right)\Delta_{f_1}^{\Delta t}\left[df\right] + \Delta t K\left[f_1^{\Delta t} \mid df\right] + O\left(\Delta t\right)$$

Бұл теңдеудегі бірінші мүше Δt уақыты аралығында барлық бөлшектер әртүрлі координаталық ұяшықтарда болады деген шарттағы өту ықтималдылығына сәйкес келеді. Ал, екінші мүше Δt уақыты аралығында екі бөлшек бір ұяшықта болу ықтималдылығын анықтап береді. $\nu\left[f_1\right]$ – фазалық тығыздығы $f_1\left(x\right)$ жүйедегі соқтығысу жиілігі; $K\left[f_1 \mid df\right]$ – кез–келген екі бөлшектің соқтығысу салдарынан бірлік уақыт ішінде жүйенің фазалық тығыздығы $f_1\left(x\right)$ күйден фазалық тығыздығы $f \in df$ болатын күйге өту ықтималдылығы; $f_1^t\left(x\right)$ – төмендегі Власов теңдеуінің $f_1^0\left(x\right) = f_1\left(x\right)$ шарттардағы шешімі:

$$\frac{\partial}{\partial t} f_1^t\left(x\right) = \tilde{Q}_x\left[f_1^t\right]$$

Бастапқы уақыт мезетінде фазалық тығыздығы $f_1\left(x\right)$ болатын күйдегі жүйе кездейсоқ $\tau\left[f_1; \omega\right]$ уақыты ішінде $f_1^t\left(x\right)$ еркін траекториямен қозалады. Фазалық тығыздығы $f_1\left(x\right)$ күйдегі бөлшектердің соқтығысу жиіліктерін мынадай өрнекпен анықтаймыз:

$$\nu\left[f_1\right] = \frac{1}{2}\int dx_1 dx_2 d\tilde{x}_1 d\tilde{x}_2 W\left(x_1, x_2 \mid \tilde{x}_1, \tilde{x}_2\right) f_1\left(x_1\right) f_1\left(x_2\right)$$

мұндағы

$$W\left(x_1, x_2 \mid \tilde{x}_1, \tilde{x}_2\right) = \delta\left(\vec{r}_1 - \vec{r}_2\right)\delta\left(\vec{r}_1 - \vec{\tilde{r}}_1\right)\delta\left(\vec{r}_2 - \vec{\tilde{r}}_2\right) W\left(\vec{p}_1, \vec{p}_2 \mid \vec{\tilde{p}}_1, \vec{\tilde{p}}_2\right) \qquad (10)$$

Бөлшектер өзара соқтығыса отырып x_1, x_2 күйден $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$ күйге өткен кезде жүйенің $f_1(x)$ фазалық тығыздығы мынадай шамаға өзгереді:

$$\delta_{x_1 x_2 \tilde{x}_1 \tilde{x}_2}(x) = -\delta(x - x_1) - \delta(x - x_2) + \delta(x - \tilde{x}_1) + \delta(x - \tilde{x}_2)$$

Соқтығысулардан кейінгі фазалық тығыздықтың үлестірімі $\Delta_{f_1 + \delta x_1 x_2 \tilde{x}_1 \tilde{x}_2}[df]$ арқылы есептелетін болады. (10)–ды ескеріп $K[f_1 \mid df]$ үшін төмендегідей теңдеуді аламыз:

$$K[f_1 \mid df] = \frac{1}{2} \int dx_1 dx_2 d\tilde{x}_1 d\tilde{x}_2 W f_1(x_1) f_1(x_2) \Delta_{f_1 + \delta x_1 x_2 \tilde{x}_1 \tilde{x}_2}[df]$$

Бұл шамадан алынған интеграл жүйедегі соқтығысулардың жиілігене тең: $\int K[f_1 \mid df] = \nu[f_1]$.

Бір бөлшектік тығыздыққа арналған стохастикалық кинетикалық теңдеу. Тепе–теңсіз жүйенің қозалыстары төмендегі стохастикалық кинетикалық теңдеудің шешімдері арқылы анықталатындығын қарастыратын боламыз:

$$\frac{\partial}{\partial t} N_t(x) - Q_x[N_t] = J_x[N_t] + S_t[N_t; x; \omega] \tag{11}$$

мұндағы $S_t[f; x; \omega]$–нөлдік орташа мәнді пуассондық процесс:

$$\left\langle S_{t_1}[f; x_1] \ldots S_{t_k}[f; x_1] \right\rangle = \frac{1}{k} D_k[f; x_1, \ldots, x_k] \prod_{j=2}^{k} \delta(t_j - t_{j-1}) \tag{12}$$

$S_t[f; x; \omega]$ түрдегі кездейсоқ процестің $\psi_t[\upsilon; f]$ сипаттамалық функционалы мына түрде анықталады:

$$\psi_t[\upsilon; f] = \left\langle \exp\left\{ i \int_0^t d\tilde{t} \int d\tilde{x} \upsilon_{\tilde{t}}(\tilde{x}) S_{\tilde{t}}[f; \tilde{x}; \omega] \right\} \right\rangle = \exp \theta_t[\upsilon; f] \tag{13}$$

$$\theta_t[\upsilon; f] = \int_0^t d\tilde{t} \int K[f \mid df_1] \left(\exp\left\{ i(f_1 - f, \upsilon_{\tilde{t}}) \right\} - 1 - i(f_1 - f, \upsilon_{\tilde{t}}) \right)$$

$N_t(x; \omega)$ процестің марктік қасиеттері S_t кездейсоқ мүшенің (12)–түрдегі уақыт бойынша корреляциалық қасиеттерінен келіп шығады. Сондақтан да, (11)–теңдеудің шешімдерінің үлестіріміне арналған теңдеуді төмендегіше жазуымызға болады:

$$\rho_t[df] = \left\langle \Delta_{N_t(\omega)}[df] \right\rangle \equiv \left\langle \sigma_t[df; \omega] \right\rangle$$

Орташаланбаған үлестірімге арналған кездейсоқ операторы бар теңдеу

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma_t[df; \omega] \equiv \left(l[f] + \tilde{l}[f; \omega] \right) \sigma_t[df; \omega] \tag{14}$$

Мұндағы

$$l[f]=-\int dx\frac{\delta}{\delta f(x)}\left[Q_x[f]+J_x[ff]\right]$$

$$\tilde{l}_t[f;\omega]=-\int dx\frac{\delta}{\delta f(x)}S_t[f;x;\omega]$$

(14)–ші теңдеудің кездейсоқ бастапқы шарттарға сәйкес келетін және S_t–ға тәуелсіз орташаланған шешімі төмендегідей:

$$\rho_t[df]=U_t[df]\exp\left\{\left\langle\exp\left\{\int_0^t d\tilde{t}\,\Lambda_{\tilde{t}}[f;\omega]\right\}-1\right\rangle\right\}\rho_0[df] \tag{15}$$

Бұл өрнекте

$$U_t[f]=\exp\{tl[f]\},\quad \Lambda_t[f;\omega]=U_t^{-1}[f]\tilde{l}[f;\omega]U_t[f]$$

(15)–тің екі жағынан уақыт бойынша туынды алып, $\rho_t[df]$–ке арналған тұйықталған теңдеу аламыз:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}+\tilde{L}_t\right)\rho_t[df]=\left(I_t[f]+L_t[f]\right)\rho_t[df] \tag{16}$$

$$L_t[f]=\rho_t[df]=U_t[f]\left[\frac{\partial}{\partial t}\left\langle\exp\left\{\int_0^t d\tilde{t}\,\Lambda_{\tilde{t}}[f;\omega]\right\}\right\rangle\right]U_t^{-1}[f]$$

(11)–теңдеуде флуктуация көзі жоқ деп санасақ, яғни $S_t=0$, онда ол теңдеу Больцманның газдыкинетикалық теңдеуіне сәйкес келеді. Флуктуация көзінің кез–келген уақыт мезетіндегі ағыны дәл сол уақыттағы фазалық тығыздықтың мәніне тәуелді болады [10].

Кездейсоқ таралымдардың функционалдық моделі. Сиретілген, әлсіз әсерлесулер жүйесіндегі марктік $N_t(x)$ диффузиялық процестердің функционалдық моделінде бөлшектердің жылдамдықтары өте аз ε шамаға өзгереді, яғни $\vartheta_{1,2}=\tilde{\vartheta}_{1,2}-\varepsilon\Delta\vartheta_{1,2}$. Осыған сәйкес, Ω кеңістіктегі $G[f]=G[f,\varphi]$ түрдегі функционалдарды4 (16)–ғы

$$I_f\approx-\int dx\frac{\delta}{\delta f(x)}A_x[f]+\frac{1}{2}\int dxd\tilde{x}\frac{\delta^2}{\delta f(x)\delta f(\tilde{x})}B_{x\tilde{x}}[f] \tag{17}$$

Операторлар арқылы өрнектелуіндегі $D_k[f;x_1,...,x_k;\varepsilon]$

$$D_k[f;x_1,...,x_k;\varepsilon]=\sum_{j=k}^{\infty}\varepsilon^j D_k^l[f;x_1,...,x_k]$$

коэффициенттердің $\tilde{\vartheta}_{1,2}=\vartheta_{1,2}$ нүкте маңында Тейлор қатарына жіктеуі қолданылады. Бұлар (17)–гі A және B мүшелеріне де әсер етеді, яғни $A_x[f]=D_1^{(1)}[f;x]+D_1^{(2)}[f;x]$, $D_2^{(2)}[f;x,\tilde{x}]=B_{x\tilde{x}}[f]$. Жіктеу тек екінші ретті мүшелермен шектеледі:

$$D_1^{(1)}\left[f;x_1\right]=-\frac{\partial}{\partial\vartheta_1}\nu_1\left[f;x_1\right]f\left(x_1\right)$$

$$D_1^{(2)}\left[f;x_1\right]=\frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial\vartheta_1^{\,2}}\nu_2\left[f;x_1\right]f\left(x_1\right)$$

$$D_2^{(2)}\left[f;x_1,x_2\right]=\delta\left(\vec{r}_1-\vec{r}_2\right)\frac{\partial^2}{\partial\vartheta_1\partial\vartheta_2}[\nu_2\left[f;x_1\right]]\delta\left(\vartheta_1-\vartheta_2\right)-\phi\left(\vartheta_1\mid\vartheta_2\right)f\left(x_1\right)f\left(x_2\right)$$

Мұндағы

$$\nu_1\left[f;x_1\right]=\frac{\partial}{\partial\vartheta_1}\nu_2\left[f;x_1\right],\ \nu_2\left[f;x_1\right]=\int d\vartheta_2\phi\left(\vartheta_1\mid\vartheta_2\right)f\left(\vec{r}_1,\vartheta_2\right),\ \phi=\int d\omega\left|\vartheta_1-\vartheta_2\right|\Delta\vartheta_2\Delta\vartheta_2$$

Қарастырылып отырған моделде жүйедегі поляризациялық эффекттер бөлшектердің ұжымдық әсерлесулері үшін L_t операторында ескеріледі. Бұл жағдайда тұйықталған кинетикалық теңдеулер тізбегі поляризациялық жуықтауда шектеліп қалады. Марктік тектес процестердің стахостикалық сипаты тепе–теңсіздік жүйелердегі жұптық әсерлесулер жуықтауында фазалық тығыздықтың үлестіріміне арналған кинетикалық теңдеулер арқылы қарастырылатындығына көз жеткіздік.

Қорытынды

Марктік тектес процестердің стахостикалық сипаты тепе–теңсіздік жүйелердегі жұптық әсерлесулер жуықтауында фазалық тығыздықтың үлестіріміне арналған кинетикалық теңдеулер арқылы қарастырылатындығына көз жеткіздік. Ең бастысы, соқтығысу интегралдарының операторлық көріністе қолданылуы мақала тақырыбында келтірілген функционалдық моделінде өзін жақсы қырынан таныта білді. Сиретілген газдарды координаталық ұяшықтар түрінде моделдеу стохастикалық процестің табиғатын ашуға математикалық тұрғыда жеңілдеді. Әсерлесулерге жасайтын бөлшектердің бір күйден басқа бір күйге ауысуының ықтималдылық сипатты ірі құрылымдық фазалық тығыздықты $N_t\left(x,\omega\right)$ түрдегі кездейсоқ марктік процеспен байланыстыру арқылы іске асатындығына көз жеткізілді. Үлестірімдік функциялардың тепе–теңсіздік жүйеге арналған туындауыш функционалмен байланысы да стохастикалық моделдің кинетикалық қасиеттерді терең айқындауда маңызды рөл атқаратыны көрсетілді. Бұл ретте статистикалық жүйедегі фазалық траекториялар жиыны бір бөлшекті күй тығыздығының орташаланбаған мәндерінің кеңістігінде қарастырылды және жүйе күйлерінің осы кеңістіктегі үлестірімі (таралымы) арқылы стохастикалық әдістің негізін құрайтын классикалық статистикалық механиканың функционалдылы ықтималдылық бет–бейнесі айқындалды.Фазалық тығыздыққа арналған стохастикалық теңдеу марктік секірмелі процестер моделіне сәйкес Лиувилл теңдеуінен шығарып алу жолдары көрсетілді.

Пайдаланылған дереккөздер тізімі

[1] Мартынов Г. А. Фазовые переходы и флуктуации в классической статистической механике // Теплофизика высоких температур. 2017. №4. С. 627-630. https://doi.org/10.7868/S0040364417040123

[2] Narkevich, I. I., and E. V. Farafontova. 2019. "Two-Level Statistical Description of Structure of Homogeneous Macroscopic System and Spherical Crystalline Nanoparticles." Nanoscience and Technology: An International Journal 10 (4): 365–376. https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020032017

[3] Бирюков А. А. Модель стохастического процесса в пространстве случайных совместных событий // Вестник СГТУ. 2021. № 4. С. 787–796. https://doi.org/10.14498/vsgtu 1865

[4] Karachanskaya, E. V. 2020. "Programmed Control with Probability 1 for Stochastic Dynamical Systems." Journal of Mathematical Sciences 248 (1): 67–79. https://doi.org/10.1007/s10958-020-04856-4

[5] Bevia, V. J., S. Blanes, J. C. Cortés, N. Kopylov, and R. J. Villanueva. 2025. "A GPU-Accelerated Lagrangian Method for Solving the Liouville Equation in Random Differential Equation Systems." Applied Numerical Mathematics 208 (B): 231–255. https://doi.org/10.1016/j.apnum.2024.09.021

[6] Tavangar, Tooran, and Nick A. Eaves. 2025. "Evidence of Plasma-Driven Nonequilibrium Chemistry in Graphene Formation from Gas-Phase Kinetic Modeling." Carbon Trends. Published November 17, 2025. https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100592

[7] Wang, Yamei, Haonan Jin, Jiefeng Cao, Rui Yu, Junqin Li, Wei Tong, Junmin Xu, Fangyuan Zhu, Yong Wang, Lei Zhang, and Renzhong Tai. 2025. "Nonequilibrium Spin Dynamics in the Chiral Soliton Lattice Host $YbNi_3Al_9$." Results in Physics 75: 108336. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108336

[8] Tang, Junsong, William Chow, and Bernard Shizgal. 2025. "Nonequilibrium Effects for Reactions with Activation Energy: Convergence of the Expansions of Solutions of the Boltzmann and Lorentz Fokker–Planck Equations with Sonine and Maxwell Polynomials as Basis Functions." Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications 668: 130522. https://doi.org/10.1016/j.physa.2025.130522

[9] Biščević, Helena, and Raffaele D'Ambrosio. 2025. "Time Integration of Dissipative Stochastic PDEs." Applied Numerical Mathematics. Published November 17, 2025. https://doi.org/10.1016/j.apnum.2025.11.005

[10] Charles, Mfano, Sayoki G. Mfinanga, G. A. Lyakurwa, Delfim F. M. Torres, and Verdiana G. Masanja. 2025. "Evaluating the Effectiveness of Stochastic CTMC and Deterministic Models in Correlating Rabies Persistence in Human and Dog Populations." Franklin Open 13: 100397. https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100397

References

[1] Martynov G. A. (2017) Fazovye perehody i fluktuacii v klassicheskoj statisticheskoj mehanike [Phase Transitions and Fluctuations in Classical Statistical Mechanics]. Teplofizika vysokih temperatur. №4, 627-630. (In Russian) https://doi.org/10.7868/S0040364417040123

[2] Narkevich, I. I., and E. V. Farafontova. 2019. "Two-Level Statistical Description of Structure of Homogeneous Macroscopic System and Spherical Crystalline Nanoparticles." Nanoscience and Technology: An International Journal 10 (4): 365–376. https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020032017

[3] Birjukov A. A. (2021) Model' stohasticheskogo processa v prostranstve sluchajnyh sovmestnyh sobytij [A stochastic process model in the space of random joint events]. Vestnik SGTU. № 4, 787–796. (In Russian) https://doi.org/10.14498/vsgtu 1865

[4] Karachanskaya, E. V. 2020. "Programmed Control with Probability 1 for Stochastic Dynamical Systems." Journal of Mathematical Sciences 248 (1): 67–79. https://doi.org/10.1007/s10958-020-04856-4

[5] Bevia, V. J., S. Blanes, J. C. Cortés, N. Kopylov, and R. J. Villanueva. 2025. "A GPU-Accelerated Lagrangian Method for Solving the Liouville Equation in Random Differential Equation Systems." Applied Numerical Mathematics 208 (B): 231–255. https://doi.org/10.1016/j.apnum.2024.09.021

[6] Tavangar, Tooran, and Nick A. Eaves. 2025. "Evidence of Plasma-Driven Nonequilibrium Chemistry in Graphene Formation from Gas-Phase Kinetic Modeling." Carbon Trends. Published November 17, 2025. https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100592

[7] Wang, Yamei, Haonan Jin, Jiefeng Cao, Rui Yu, Junqin Li, Wei Tong, Junmin Xu, Fangyuan Zhu, Yong Wang, Lei Zhang, and Renzhong Tai. 2025. "Nonequilibrium Spin Dynamics in the Chiral Soliton Lattice Host $YbNi_3Al_9$." Results in Physics 75: 108336. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108336

[8] Tang, Junsong, William Chow, and Bernard Shizgal. 2025. "Nonequilibrium Effects for Reactions with Activation Energy: Convergence of the Expansions of Solutions of the Boltzmann and Lorentz Fokker–Planck Equations with Sonine and Maxwell Polynomials as Basis Functions." Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications 668: 130522. https://doi.org/10.1016/j.physa.2025.130522

[9] Biščević, Helena, and Raffaele D'Ambrosio. 2025. "Time Integration of Dissipative Stochastic PDEs." Applied Numerical Mathematics. Published November 17, 2025. https://doi.org/10.1016/j.apnum.2025.11.005

[10] Charles, Mfano, Sayoki G. Mfinanga, G. A. Lyakurwa, Delfim F. M. Torres, and Verdiana G. Masanja. 2025. "Evaluating the Effectiveness of Stochastic CTMC and Deterministic Models in Correlating Rabies Persistence in Human and Dog Populations." Franklin Open 13: 100397. https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100397

МАТЕМАТИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ МАТЕМАТИКИ

METHODS OF TEACHING MATHEMATICS

ҒТАХР 14.35.09

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.005

А.Е. Әбілқасымова[1], Ш.И.Хамраев [1], Б.М. Қосанов[1], Б.Я. Халимбетов[1*]

[1]Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
**e-mail: khalimbet.b@mail.ru*

МІРЖАҚЫП ДУЛАТОВТЫҢ ӘДІСТЕМЕЛІК-МАТЕМАТИКАЛЫҚ МҰРАЛАРЫ ТУРАЛЫ

Аңдатпа

Бұл мақалада XX ғасырдың басындағы аса көрнекті ағартушы-ұстаз, қоғам және мемлекет қайраткері Міржақып Дулатовтың әдістемелік-математикалық мұралары терең әрі жан-жақты талданған. Авторлар М.Дулатовтың «Есеп құралы» атты оқу құралдарының жарыққа шығу тарихын, олардың құрылымдық, мазмұндық, әдістемелік ерекшеліктерін салыстыра қарастырып, қазақ мектебіндегі математикалық білім берудің қалыптасуына қосқан үлесін ашып көрсетеді. Зерттеу барысында 1914-1928 жылдар аралығында бірнеше рет басылған екі түрлі нұсқадағы «Есеп құралының» айырмашылықтары анықталып, олардың концентрлік жүйе негізінде құрылуы, арифметика, геометрия және алгебра элементтерінің бірізді берілуі, қазақ тіліндегі сан атауларының ерекшеліктерін ескеру арқылы әдістемелік тұрғыда тиімді шешімдердің ұсынылуы нақты деректермен дәлелденді. Мақалада М.Дулатовтың қазақ мектептеріне арналған алғашқы математикалық терминдерді қалыптастырудағы еңбегі, оның оқу құралдарының кеңестік кезеңдегі білім беру жүйесіне ықпалы және қазіргі мектеп математикасын оқытудағы маңызы көрсетілген. Зерттеу нәтижелерінде М.Дулатовтың еңбектерінің ұлттық математикалық білім беру тарихындағы өзіндік орны айқындалып, оның ғылыми-әдістемелік идеяларының бүгінгі педагогикалық тәжірибедегі өзектілігі дәлелденді.

Түйін сөздер: Міржақып Дулатов, «Есеп құралы», әдістемелік мұра, математика оқулығы, қазақ мектебі, тарих, арифметика, білім беру.

А.Е. Әбілқасымова[1], Ш.И. Хамраев[1], Б.М. Қосанов[1], Б.Я. Халимбетов[1*]
[1]Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан

О МЕТОДИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОМ НАСЛЕДИИ МИРЖАКЫПА ДУЛАТОВА

Аннотация

В статье представлено всестороннее и глубокое исследование методико-математического наследия выдающегося просветителя, писателя и общественного деятеля начала XX века Миржакыпа Дулатова. Авторы провели не только анализ истории публикаций учебников «Есеп құралы», но и раскрыли их структурные особенности, содержание, методические принципы и педагогическую ценность для казахской школы. В ходе исследования проводился сравнительный анализ двух вариантов учебника, издававшихся в 1914-1928 гг., выявлены их существенные различия, связанные с построением концентрической системы, последовательным изложением элементов арифметики, геометрии и начальной алгебры, а также с учетом специфики казахской языковой системы, в частности, в сфере числительных. В статье определен вклад М.Дулатова в формирование национальной математической терминологии, расширение возможностей обучения математике на родном языке и развитие методики преподавания в условиях становления казахской школы. Результаты исследования показали, что

учебники М.Дулатова сыграли значительную роль в развитии математического образования Казахстана, стали фундаментом национальной методической школы, при этом сохраняют актуальность для современной педагогической практики, ориентированной на культурно-языковые особенности обучающихся.

Ключевые слова: Миржакып Дулатов, «Есеп куралы», методическое наследие, учебник математики, казахская школа, история, арифметика, образование.

A.E. Abylkassymova[1], Sh.I. Khamraev[1], B.M. Kossanov[1], B.Y. Khalimbetov[1*]
[1]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

ABOUT THE METHODOLOGICAL AND MATHEMATICAL INSTRUCTIONS

Abstract

This article presents a comprehensive and in-depth study of the methodological and mathematical legacy of Myrzhakyp Dulatov, a prominent educator, writer, and public figure of the early 20th century. The authors not only analyzed the publication history of the "Esep Quraly" textbooks but also explored their structural features, content, methodological principles, and pedagogical value for the Kazakh school. The study included a comparative analysis of two versions of the textbook, published between 1914 and 1928, identifying significant differences related to the construction of a concentric system, the consistent presentation of elements of arithmetic, geometry, and elementary algebra, and consideration of the specific features of the Kazakh language system, particularly in the area of numerals. The article identifies Dulatov's contribution to the development of national mathematical terminology, the expansion of opportunities for teaching mathematics in the native language, and the development of teaching methods in the context of the development of the Kazakh school. The study results showed that M. Dulatov's textbooks played a significant role in the development of mathematics education in Kazakhstan, becoming the foundation of the national methodological school, while remaining relevant for modern teaching practices focused on the cultural and linguistic characteristics of students.

Keywords: Myrzhakyp Dulatov, «Esep Quraly», methodological legacy, mathematics textbook, Kazakh school, history, arithmetic, education.

Кіріспе

2025 жылдың 25 қарашасында XX ғасырдың басындағы аса көрнекті мемлекет және қоғам қайраткері, еліміздің білім саласы мен ғылымын, әдебиеті мен мәдениетін дамытуға сүбелі үлес қосқан жарық жұлдыздарымыздың ішіндегі шоқтығы биік, ірі тұлғаның бірі – ақын, жазушы, драматург, әрі ағартушы-ұстаз Міржақып Дулатовтың туғанына 140 жыл толды. Бұл айтулы мерейтой елімізде мемлекеттік деңгейде кеңінен атап өтілді. Мерейтой аясында Қостанай қаласында Қазақстан Республикасы Президенті Қ.К.Тоқаевтың арнайы тапсырмасымен Міржақып Дулатовқа ескерткіш орнатылды. Торғай даласында халықаралық «Ұлы дала жорығы» атты ат марафоны өтіп, ұлтымыздың ұлы тұлғасына арналған ғылыми конференция мен республикалық деңгейдегі ақындар айтысы өтті. Сонымен қатар, 2025 жылдың 23 қазанында Қазақстан Республикасы күні аясында Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінде (Математика, физика және информатиканы оқыту әдістемесі кафедрасы аясында) заманауи оқу-әдістемелік құралдармен және М.Дулатовтың өмірбаяны мен шығармашылық қызметін қамтитын көрнекі материалдармен жабдықталған «М.Дулатов атындағы математика кабинеті» ашылды.

Қым-қуыт арпалысқа толы әлеуметтік төңкерістер заманында өмір сүріп, сталиндік зұлматтың құрбаны болған аяулы азамат өзінің артына мол мұра қалдырғаны мәлім. Олардың арасында «Оян, қазақ!», «Азамат» және «Терме» атты жинақтары, «Балқия» пьесасы, «Бақытсыз Жамал» романы ерекше орын алады. Сонымен қатар, М.Дулатов қазақ қауымына ағартушылық-педагогикалық бағыттағы еңбектері мен оқу құралдары арқылы да танымал. Тәуелсіздіктен кейінгі жылдары оның шығармашылығын зерттеу, артында қалған мол мұрасын жинап, түгелдеу және жариялау бағытында бірқатар игі іс-шаралар атқарылғанын атап айту керек. Алайда, туған халқы М.Дулатовтың шығармашылығын барлық қырынан толық танып бола қойған жоқ. Мәселен, оның математика пәнінен қазақ мектебіне арналған

алғашқы оқу құралдарының авторы екендігін бүгінде әркім біле бермейді, өйткені бұл туралы деректер әр жерде там-тұмдап қана кездеседі. Ең өкініштісі, оның осы саладағы атқарған қызметі әлі күнге дейін назардан тыс қалып, өзінің лайықты бағасын ала алмай келеді [6].

Зерттеу әдіснамасы

1912 жылы қазақша сауат ашатын тұңғыш әліппеміз – А.Байтұрсыновтың «Оқу құралының» басылып шыққандығы белгілі. Бұл М.Дулатовтың арифметикадан қазақ мектептеріне арналған оқу құралын дайындау ісін жедел қолға алуына мүмкіндік туғызды. Ол 1914 жылы «Бастауыш мектепте оқылатын есеп құралы» деген атпен Орынбор қаласындағы «Дин уа мағишет» баспасынан екі бөлім болып басылып шықты. Қазақ баласын «математика патшасы – арифметикамен» ана тілінде таныстыруға жасалған алғашқы қадам болғандықтан, мұны қазақ мектебінде математиканы оқыту жөніндегі ғылыми негіздегі әдістемелік ой-пікірдің туып, пайда болуына себепші болған прогрессивтік құбылыс деп бағалауымыз керек [1, 5].

Зерттеу нәтижелері

М.Дулатовтың «Есеп құралының» *ең басты ерекшелігі*, ол есептер мен мысалдар жинағы түрінде шығарылған (I бөлімінде 400 есеп, 128 мысал, ал II бөлімінде 350 есеп, 240 мысал бар). Мұның өзіндік себебі бар. XX ғасыр басында мектепте арифметиканы теория арқылы оқыту әдісі (Грубе-Евтушевский әдісі) педагогтар мен әдіскерлер тарапынан (Л.Толстой, В.Латышев, А.Гольденберг, т.б.) қатаң сынға алынып, оны амалдарды үйрену әдісімен оқыту кең таралған болатын. Сондықтан арифметикадан есептер мен мысалдар жинақтарын шығару кең өріс алған еді [4].

Екінші ерекшелігі, оқу құралында сандар «күншығыс араб цифрлары» деген атауға ие болған мынадай цифрлармен таңбаланған: ٠ ١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ ٨ ٩ (1922 жылғы 3-басылымында ғана олар қазіргі цифрлармен ауыстырылды).

Үшінші ерекшелігі, оқу материалы концентрлік жүйе ыңғайымен орналастырылған. Ол оқу құралының тарауларының атауларынан-ақ бірден байқалады: «Әуелгі онның ішіндегі сан», «Жүздің ішіндегі ондықтардың есебі», «Әуелгі екі ондықтың ішіндегі есеп», «Жүздің ішіндегі барша сандар», «Мыңның ішіндегі сандар».

Төртінші ерекшелігі, концентрлердің саны мен қарастырылу реті қазіргі қазақ мектебінде математиканы оқытудың жүйесіне сәйкес келеді. Әсіресе, «Бірінші ондық» концентрінен кейін дөңгелек ондықтардың оқытылуы ерекше назар аудартады. Бұдан автордың сан есімдердің қазақ тіліндегі аталуы мен жасалуындағы ерекшеліктерді ескергенін және қазақ мектебі үшін концентрлердің қарастырылу реті туралы әдістемелік мәселені дұрыс шешкендігін аңғаруға болады.

Бесінші ерекшелігі, қажет болған жағдайларда, арифметиканың ережелері, сонымен қатар мұғалімге арналған әдістемелік нұсқаулар да беріліп отырады, яғни, онда қазақ мектебінің математика пәні мұғалімдерінің мүдделері де ескерілген. Мысалы, «24×2, 24-ті 2-ге көбейту үшін әуелі ондықтарды 2-ге көбейту керек (20×2=40), одан кейін бірліктерді екіге көбейту керек (4×2=8), ең соңында ондықтарға бірліктерді қосу керек (40+8=48). 24-ті үшке көбейту үшін, әуелі ондықтарды 3-ке көбейту керек (20×3=60), одан кейін бірліктерді 3-ке көбейту керек (4×3=12). Ең соңынан бірліктерді ондықтарға қосу керек. Бірақ 12-нің өзі ондық һәм бірліктерден құралғандықтан, әуелі ондықтарға осы ондықтың өзін қосу керек (60+10=70), сонан кейін бұған 2 бірлік қосылуы тиіс (70+2=72)» [3].

Алтыншы ерекшелігі, оқу материалы сол кезеңдегі озық әдістемелік идеяны басшылыққа ала отырып орналастырылған. Шынында да XX ғасыр басында арифметиканы оқыту барысында есептер мен мысалдарды қарастырудың реті туралы әдістемелік ғылымда әртүрлі пікір қалыптасқан еді. Кейбір әдіскерлер (С.Шохор-Троцкий, Ф.Егоров, т.б.) есеп шығару жағын күшейтіп, арифметиканы оқытуда «мақсатқа сай таңдамалы есептер әдісін»

басшылыққа алуды ұсынды. Ал, көрнекті әдіскер-математик А.Гольденберг болса, алдымен сандарға амалдар қолдануды үйреніп, сонан кейін ғана есептерге көшу керек деп білді. М.Дулатовтың «Есеп құралында» «Қазақ» газетінде атап көрсетілгендей, «ең соңғы жаңа тәртіп» («Қазақ», №80, 1914), яғни, осы екі әдістемелік идеяның үйлестірілген түрі қолданылған.

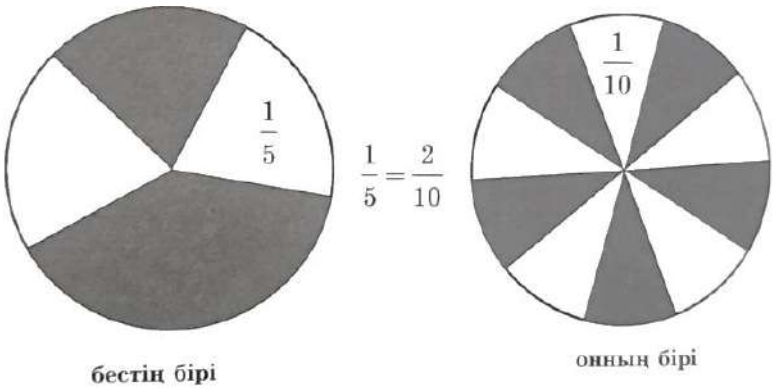
Жетінші ерекшелігі, М.Дулатовтың «Есеп құралы» кеңес үкіметінің алғашқы жылдарында, математикадан оқу құралдары аса тапшы болған кезеңде, Қазанда, Ташкентте және Орынборда екінші (1921 ж.) және үшінші мәрте (1922 ж.) басылып шықты [2].

1923 жылы Ресей Кеңестік Федеративтік Социалистік Республикасы мемлекеттік білім кеңесінің ғылыми-педагогикалық секциясы тарапынан кеңестік мектептер үшін жаңа, комплекстік оқу бағдарламаларының бекітілуіне байланысты 1924-1925 оқу жылынан бастап, Кеңес Одағындағы барлық ұлт мектептерін осы бағдарламаларға көшіру жоспарланды. Ендігі жерде, осыған дейін қазақ мектебіне арналған бірден-бір оқу құралы қызметін атқарып келген М.Дулатовтың есептер мен мысалдар жинағы жарамсыз болып қалды. Сондықтан М.Дулатов 1925 жылы «Есеп құралының» екі бөлімнен тұратын жаңа түрін жарыққа шығарды. Оның сыртында «түзетілді, толықтырылды және төртінші басылуы» деп көрсетілген [4].

«Есеп құралының» бұл жаңа түрінің бұрынғы басылымдардан өзіндік айырмашылығы бар екендігіне көз жеткізу үшін оның негізгі ерекшеліктерін ашып көрсетелік.

Ең басты ерекшелігі, ол комплекстік бағдарлама негізінде жазылған және құрылымы, мазмұны, сондай-ақ, математикалық материалдың баяндалуы жағынан да алғашқы үш басылымнан мүлде өзгеше.

Екінші ерекшелігі, онда тек есептер мен мысалдар ғана қамтылмаған. Арифметикалық материал үлестерге, бөлшектерге және процентке байланысты материалдармен толықтырылған. Мысалы, бөлшек ұғымын қалыптастыруда төмендегідей көрнекі материал жиі қолданылады (сурет 1).



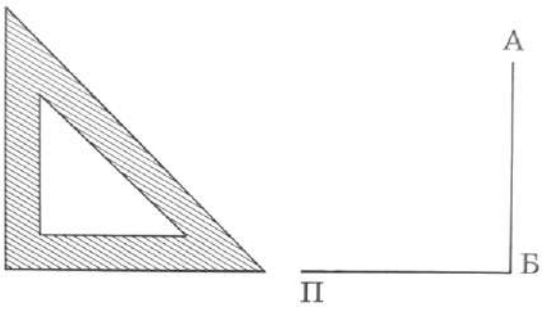
Сурет 1. «Бөлшек» ұғымын қалыптастыруға арналған көрнекі материал

Процент туралы түсініктер қалыптастыру үшін мына сияқты есептер ұсынылады: «Былтырғы қыс 200 күнге созылды. Биыл 192 күн қысқа болды. Биылғы қыс былтырғыдан неше процент қысқа?», «Бақшаның шаршы метрінен 950 шамалы өсімдік табуға болады, мұның 16%-і арам шөп. Бақшаның бір шаршы метрінен қанша арам шөп табуға болады?».

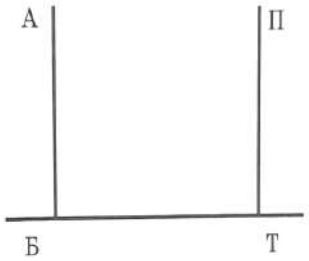
Оқу құралына геометрия мен алгебраның қарапайым элементтері, шамалар және оларды өлшеу мәселелері де енгізілген. Мысалы, перпендикуляр түзулер және параллель түзулер туралы түсініктер былайша қалыптастырылған.

1) «Қатты қағаздан тік бұрышты үшкіл жасаңдар. Осы үшкіл арқылы мынау сызылған АБП бұрыштың дұрыстығын анықтаңдар, бұл бұрышты АБП деп оқимыз» (сурет 2).

2) «Түзу сызық сызыңдар. Бұған кесе екі сызық тартыңдар. АБ мен ПТ қатар сызықтар деп аталады» (сурет 3).



Сурет 2. Тік бұрышты үшкіл арқылы тік бұрышты анықтау.



Сурет 3. АБ мен ПТ - қатар сызықтар.

Үшінші ерекшелігі, оқу материалын баяндауда теориялық материалға айтарлықтай көңіл бөлінген. Мысалы, «Бір белгілі сандарды ойдан (жатқа) былай қосады: үлкен санға онға шейін кіші сан қосылады. $8 + 7 = 8 + (2 + 5) = (8 + 2) + 5 = 10 + 5 = 15$», «Екі белгілі сан (екі белгілімен ойдан былай қосылады: әуелі ондықтары, сонан соң бірліктері». Сонымен қатар, қажет болған жағдайларда мұғалімге қажетті әдістемелік нұсқаулар да беріліп отырады. Мысалы, «Мұғалім балаларға 10-нан бастап 100-ге шейін ондықтарды жатқа санатады: он, жиырма, отыз, ... деп, онан кейін сол сандарды жаздырып үйретеді». Сондықтан оны қазіргі біздің түсінігіміздегі математика оқулығы деп бағалауға болады [1-3].

Төртінші ерекшелігі, есептердің мазмұны бұрынғы басылымдардағыдан өзгертілген және оларда техника мен халық шаруашылығының әралуан салаларына байланысты сандық мәліметтер кеңінен пайдаланылған. Мысалы, «Кооперативке қағаз қапшыққа салған 8 тонна тұз келді. Лау басы 4 қағаз қапшыққа салынған. Егер бір тоннада 10 қағаз қапшық болса, тұз неше лаумен түскені?», «Аэропланның ұшқырлығы сағатына 160 километрге шейін. Жолаушы пойызы 3 сағатта 99 километр жүреді. Пойызбен салыстырғанда аэропланның ұшқырлығы неше километр артық?», «Екібастұз зауытында жұмыскерлер қазақ пен орыс. Қазақ жұмыскерлері 748, орыс жұмыскерлері қазақтан 502-ге кем. Екібастұзда орыс жұмыскерлері қанша?».

Бесінші ерекшелігі, сол кездегі кеңес мектебінің міндеттеріне және комплекстік оқу бағдарламасының талаптарына сәйкес, математиканы оқытуды тұрмыспен және қоршаған ортамен жанастыруға мейлінше күш салынған. Бұл мәтінді есептердің «Айналамыздағы табиғат», «Әлеумет мекемелері», «Айналамыздағы тұрмыс», «Мектебіміздің тұрмысынан» деген сияқты әртүрлі тақырыптармен топтастырылып ұсынылуынан байқалады.

Алтыншы ерекшелігі, «Есеп құралының» жаңа түрі 1928 жылға дейін жыл сайын көп тиражбен басылып тұрған. Тіптен 1927 жылы екі рет басылған және соңғы 1928 жылғы басылымы «8-рет басылуы» деп көрсетілген.

Жетінші ерекшелігі, ол 1927-1928 жылдары «Қырғызмембас» тарапынан қырғыз тіліне аударылып басылған және қырғыз мектептерінде де оқу құралы ретінде пайдаланылған.

Сегізінші ерекшелігі, оның ұғымдық-терминологиялық аппаратында өзгешелік бар. Алғашқы үш басылымында тек арифметикалық ұғымдар ғана қамтылса, «Есеп құралының» жаңа түрінде алгебралық және геометриялық ұғымдарды, шамалар және оларды өлшеу мәселелеріне байланысты ұғымдарды қалыптастыруға мән берілген.

Дискуссия

Қорыта айтқанда, М.Дулатовтың «Есеп құралының» екі түрлі нұсқасының жоғарыда атап көрсетілген өзіндік ерекшеліктері төмендегідей жағдайларды анықтауға мүмкіндік береді. «Есеп құралы» 1914-1928 жж. аралығында Орынбор, Қазан, Ташкент, Қызылорда және Фрунзе (қазіргі Бішкек) қалаларында барлығы 8 рет басылып шыққан. Оның алғашқы үш басылымы (1914 ж., 1921 ж., 1922 ж.) мен соңғы бес басылымының (1925 ж.; 1926 ж.; 1927 ж. екі мәрте басылған; 1928 ж.) үлкен айырмашылықтары бар. Атап айтқанда, оның алғашқы үш басылымы есептер мен мысалдардың жинағы сипатында жазылған, ал соңғы бес басылымын комплекс бағдарлама негізінде жазылған және арифметикалық материалды ғана емес, сонымен қатар, алгебра мен геометрияның элементтерін, шамалар мен оларды өлшеу мәселелерін де қамтитын математика оқулығы деп бағалауға болады. Егер де олардың әрқайсысының екі бөлімнен тұратындығын ескерсек, М.Дулатовтың қазақ балаларының ана тілінде математикалық сауатын ашуына көп күш жұмсай отырып, қазақ мектебіне арналған, бір-бірінен мүлде өзгеше, екі түрлі «Есеп құралын», яғни, барлығы 4 кітап жазғандығы айқындалады [4].

М.Дулатұлының «Есеп құралдарының» басылып шығуы туралы мәліметтер төменгі кестеде көрсетілген.

Кесте 1. М.Дулатұлының «Есеп құралдарының» басылып шығуы

Басылым реті	*1-інші жылдық*	*Көлемі*	*Тиражы*	*2-інші жылдық*	*Көлемі*	*Тиражы*
1-інші басылуы	*Орынбор, 1914*	*белгісіз*	*3000 дана*	*Орынбор, 1914*	*81 бет*	*3000 дана*
2-інші басылуы	*Қазан, 1921*	*белгісіз*	*35000 дана*	*Қазан, 1921*	*55 бет*	*25000 дана*
	Ташкент, 1922	*56 бет*	*50000 дана*	*Ташкент, 1922*	*81 бет*	*33400 дана*
3-інші басылуы	*Орынбор, 1922*	*44 бет*	*15000 дана*	*Орынбор, 1922*	*46 бет*	*белгісіз*
4-інші басылуы	*Орынбор, 1925*	*76 бет*	*15000 дана*	*Орынбор, 1925*	*98 бет*	*10000 дана*
5-інші басылуы	*Қызылорда, 1926*	*76 бет*	*10000 дана*	*Қызылорда-Ташкент, 1926*	*98 бет*	*10000 дана*
6-ыншы басылуы	*Қазмембас, 1927*	*76 бет*	*12000 дана*	*Қызылорда, 1927*	*98 бет*	*20000 дана*
7-інші басылуы	*Қазмембас, 1927*	*76 бет*	*10000 дана*	*Қызылорда, 1927*	*98 бет*	*20000 дана*
	Қырғыз-мембас, 1927 (қырғыз тілінде)	*76 бет*	*4000 дана*	*Қырғыз-мембас, 1927 (қырғыз тілінде)*	*86 бет*	*10000 дана*
8-інші басылуы	*Қызылорда, 1928*	*76 бет*	*50000 дана*	*Қызылорда, 1928*	*98 бет*	*30000 дана*
				Қырғызмембас, 1928 (қырғыз тілінде)	*69 бет*	*белгісіз*

Осы орайда, ерекше атап айтарлық жайт, ол автор ретінде оқулыққа қойылатын міндет-талаптарды дұрыс түсіне алған және оларды үлкен әдістемелік шеберлікпен шеше алған. Алайда, М.Дулатов өзінің кәсіби білімі, мамандығы жағынан математик емес еді. Оны ана тіліндегі алғашқы математика оқулықтарын жазуға алып келген қазақ баласының бұрын-соңды естіп-білмеген математика сияқты пәнді игеруге деген құлшынысын ояту арқылы Алаш

қозғалысы мен партиясы діттеген ағартушылық-демократиялық идеяны жүзеге асыру мақсаты болатын. Қазақ баласына ана тілінде математикалық сауат аштыруды тек жалаң мақсат етіп қана қоймай, оны дүниежүзілік тәжірибе деңгейінен төмендетпей жүзеге асыруға тырысушылық, сол кезде дамудың жоғары сатысына көтеріле бастаған орыс математика әдістемесіндегі озық ой-пікірлерді басшылыққа алу, қазақ мектебінде математиканы оқыту жүйесінің орыс мектебінен ажыратылатын өзіндік ерекшеліктері болуы тиіс екендігін дұрыс бағамдай алу, өзіндік әдістемелік-математикалық идеялармен байлылығы, сөз жоқ, оның авторының аса білімдарлығын байқатады.

Егер 1914-1930 жж. аралығында қазақ мектептерінде математика пәнін оқытуда негізгі оқу құралы болғандығын және бірнеше ұрпақ өкілдерінің олардың көмегімен ана тілінде математикалық сауат ашқандығын ескерер болсақ, М.Дулатовтың «Есеп құралдарының» қазақ халқының мәдени өміріндегі маңызы онан сайын айқындала түсері сөзсіз. Олар Қазақстанда математиканың ұлттық сипаттағы оқу құралдарын дайындау ісінің дамып, өркендеуіне үлкен серпіліс туғызуымен де маңызды болып табылады. Шынында да М.Дулатовтың бұл игі бастамасы «Қазан төңкерісінен» кейін жаңа сипаттағы кеңес мектебі талаптарын қанағаттандыратындай және қазақ мектебінде математиканы оқыту ісінде бұрын-соңды пайдаланылмаған мүмкіндіктерді табудың өзіндік жолдарын іздестіруге жол ашты. Осы ізденістер барысында 1923-1935 жж. математикадан ана тілімізде мына сияқты көптеген оқу құралдары жарық көрді: «Есеп тану жобасы», «Есеп тану.Бөлшек сандар» (К.Жәленұлы); «Есеп тану құралы» (С.Қожанұлы); «Есеп құралы» (Ә.Қасымұлы); «Есеп құралы», «Есеп сабағы», «Үлкендерге бастауыш есеп» (Ғ.Бегалыұлы); «Есеп құралы» (Ә.Хасенұлы, т.б.); «Есеп құралы» (Т.Құралұлы); «Есеп құралы» (З.Қысатайұлы), т.б. Осы оқу құралдарының, сондай-ақ, қазақ тіліндегі алғашқы геометрия (Е.Омарұлы, «Пішіндеме») және жоғары математика (Ә.Ермеков, «Ұлы математике курсы») оқулықтарының жарық көруіне, сөз жоқ, М.Дулатовтың «Есеп құралдарының» шапағаты тигені даусыз [4, 5].

Қоғамдық және жалпыадамзаттық құндылықтарды қайтадан қарап, сұрыптаудан өткізу қызу қолға алынып жатқан қазіргі тарихи кезеңде мектеп математика оқулықтарын жазудың Қазақстандағы классикалық үлгілерін тек жалпылама түгелдеп немесе талдап қана қоймай, олардың еліміздің математикалық білім беру ісі тарихындағы алатын орны мен қазіргі қазақ мектебі үшін маңызын айқындау ерекше маңызға ие болып отыр. Өйткені, қандай да болмасын педагогикалық мұра ұрпақ тәрбиесіндегі өз кезеңінде атқарған рөлі және қалдырған ізімен ғана емес, сонымен қатар педагогикалық ойды онан әрі өркендетуге тигізген әсерімен де бағаланады. М.Дулатовтың «Есеп құралдарының» қазақ халқының рухани-мәдени өміріндегі маңызы осы белгілерімен де ерекшеленеді.

«Есеп құралдарынан» математиканы оқыту әдістемесінің жалпы және дербес мәселелеріне қатысты көптеген құнды идеяларды кездестіруге болады (математикалық білім беруде қазақтың әдет-ғұрпы мен салт-дәстүрін, қазақ баласының ұлттық, психологиялық және т.б. ерекшеліктерін ескеру; оқытуды өмірмен, тұрмыспен және қазақ баласын қоршаған ортамен жанастыру; ауызша және жазбаша есептеулердің ара салмағын анықтау; көбейту кестесін оқыту; геометриялық ұғымдарға анықтама беру; геометриялық фактілерді тағайындаудың тәжірибелік іс-әрекеттерді орындаумен аса шебер ұштастырылуы; геометриялық білім-түсініктерді қалыптастырудың негізгі көзі бақылау мен тәжірибе екендігін ескеру; есептер мазмұнының оқушыға таныс оқиғалармен, оқушы үшін танымдық міндеттермен сабақтасып жатуы; есеп материалдары ретінде Қазақстан географиясына, тарихына, экономикасына, демографиясына және т.б. байланысты сандық мәліметтердің кеңінен пайдаланылуы, т.с.с).

М.Дулатовтың «Есеп құралдарының» маңызын қазақ оқушы қауымына математика ұғымдарын мейлінше түсінікті етіп жеткізу мақсатының көзделуі тұрғысынан ерекше бағалау керек. Ол үшін автор қазақ тілінің өз мүмкіндіктеріне иек артуға, оның тілдік байлығын мүмкіндігінше сарқа пайдалануға тырысқан және термин ретінде «пішін» (фигура), «үшкіл» (үшбұрыш), «төрткіл» (төртбұрыш), «кесе сызықтар» (перпендикуляр түзулер), «қатар сызықтар» (параллель түзулер) сияқты қазақтың төл сөздерін алған. Сонымен қатар, «Есеп

құралдарында» «амал», «аудан», «есеп», «бөлшек», «бұрыш», «жұп сан», «тақ сан», «сүйір бұрыш», «доғал бұрыш», «тік бұрыш», «үлес» және т.б. көптеген математикалық терминдер ұшырасады. Бұл қазіргі күнгі қолданылып жүрген осы сияқты бірқатар математика терминдерінің тікелей М.Дулатовтың қаламынан туғандығын аңғартады.

М.Дулатовтың оқу құралдарында математиканы оқытуда пәнаралық байланысты жүзеге асыруға айрықша көңіл бөлінген. Автордың белгілі бір тақырыптар үшін оқу материалын іріктеп алу мен орналастыруды сауат ашумен байланысты мәселелердің қарастырылу жүйесіне сай етіп орайластырғаны байқалады. Оқу материалының жалпы орналастырылу ретінде сан есімдердің қазақ тіліндегі аталу және жасалу ерекшеліктері жан-жақты ескерілген. Есеп шығаруға байланысты біліктерді қалыптастыру кезеңдеріне сәйкес орындалатын іс-әрекеттер оқушының сөздік қорын байыта түсуге бағындырылған. Осы айтылғандар математиканың әліппемен, ана тілімен және қазақ тілімен пәнаралық байланысының біршама сәтті шешілгенін көрсетеді. Жалпы алғанда, оқу құралдарында математика мен табиғаттанудың, географияның, тарихтың пәнаралық байланысына қатысты айтарлықтай ерекшеліктер де баршылық. Атап айтқанда, есептер құрастыруда Қазақстанның елді мекендеріне, өзен-көлдеріне, тауларына және т.б. байланысты сандық мәліметтер молынан пайдаланылған.

Аталмыш оқулықтарда оқушылардың еңбекке деген көзқарасын қалыптастыруға, олардың санасына әртүрлі шаруашылық салаларына байланысты еңбектің мән-мағынасы мен маңызын жеткізуге, оларды адам еңбегін бағалай білуге үйретуге де лайықты көңіл бөлінген. Мәселен, кейбір математикалық материал тәжірибелік жұмыстар орындау барысында игертіледі. Сол сияқты кейбір тақырыптарда математикалық мағынадағы әртүрлі суреттерді, тұрмыстық мәселелерге байланысты әралуан геометриялық фигуралардың сызбаларын салумен байланысты жаттығулар жиі ұсынылып отырады. Мұның бәрі математиканы еңбекке баулу, сурет және сызу пәндерімен байланыстыра оқытудың мүмкіндіктерін көрсетеді. «Есеп құралдарында» биология, экономика, статистика сияқты білім салаларына да қатысты біршама есептердің қамтылғанын атап айту керек.

М.Дулатовтың мұраларында әдістемелік тұрғыда ерекше назар аударарлық тағы бір аса маңызды түйін – қазақ мектебі үшін арифметикадан берілуге тиісті білім мазмұнын анықтауда концентрлер саны мен олардың қарастырылу ретін тағайындау туралы мәселе. Автор мұның орыс мектебіндегіден өзгеше, тиімді жолын ұсынған, атап айтқанда, оқу материалы мынадай әдістемелік ретпен орналастырылған: 1) бірінші ондық; 2) дөңгелек ондықтар; 3) екінші ондық; 4) бірінші жүздік; 5) бірінші мыңдық. Бұл жерде автор тарапынан бірінші ондықтан кейін іле, дөңгелек ондықтарды оқытудың ұсынылуы жайдан-жай емес. Ол сандар аймағының біртіндеп кеңейтіле түсу ретін қазақ тіліндегі сан есімдердің жасалу ерекшеліктеріне орайластырып дұрыс шешкен.

Шынында да сан есімдердің қазақ тіліндегі жасалуының орыс тіліндегіге қарағанда біршама өзгеше, өзіндік ерекшеліктері бар. «Дөңгелек ондықтардың» (40 пен 90-нан басқаларының) орыс тіліндегі атауларынан олардың қанша ондықтан тұратынын бірден аңғаруға болады. Мысалы, 50 – пятьдесят - пять десяток - бес ондық. Ал, қазақ тіліндегі атауларынан олардың неше ондықтан құралғаны жайында мағлұмат алу мүмкін емес. Мысалы, «елу» сөзі ол санның бес ондықтан тұратынын білдірмейді. Сондықтан «дөңгелек ондықтардың» атауларын меңгеру және берік есте сақтау қазақ баласы үшін қиындық тудырады. Шынында да қазақ мектебінің табалдырығын енді аттаған бүлдіршіндердің көпшілігі, 21-ден бастап 29-ды қоса кідіріссіз санап келіп, кілт тоқтап қалады. Егер «отыз» деп айтып жіберсек, бала әрі қарай 39-ды қоса мүдірмей айтып шығып, тағы тоқталады. Бұл қазақ баласының «дөңгелек ондықтардың» атауларын игеруде қиналатынын, ал «дөңгелек ондықтар» арасындағы сандарды атау ол үшін күрделі мәселе болып табылмайтындығын байқатады [1].

Орыс тілінде 10 мен 20 арасындағы сандардың аталуы басқа «дөңгелек ондықтар» арасындағы сандардың аталуынан өзгеше. Мысалы, 12 – двенадцать («два на десять» деген сөз

тіркесінен келіп шыққан), яғни, мұнда алдымен бірлік, содан кейін ондық айтылады. Ал басқа «дөңгелек ондықтар» арасындағы сандардың аталуы мұнан өзгеше. Мәселен, 21 – двадцать один, 34 – тридцать четыре, т.с.с., яғни, бұларда алдымен ондық, онан кейін бірлік аталады. Міне, осы себепті орыс мектебінде бірінші ондықтан кейін іле, «екінші ондық» арнайы, бөлек оқытылады. Ал, бұл қазақ мектебі үшін тиімді емес, өйткені барлық «дөңгелек ондықтар» арасындағы сан есімдердің қазақ тіліндегі жасалуында бірыңғай ортақ заңдылық бар, мұнда алдымен ондық, одан кейін бірлік аталады [3, 8].

Қорыта келгенде, қазақ мектебі үшін «екінші ондық» концентрін арнайы, бөлек оқытудың қажеттігі жоқ және «бірінші ондықтан» кейін іле, «дөңгелек ондықтардың» оқытылуы әдістемелік тұрғыдан тиімді болып табылады. Бұл мәселеге, өкінішке орай, кеңестік дәуірде мән берілмей келді. Ол тек тәуелсіздіктен кейінгі жылдары жарық көрген төл оқулықтарымызда ғана өз шешімін тапты.

М.Дулатовтың еліміздің қоғамдық-саяси өміріне, білім және ғылым салаларына, әдебиеті мен мәдениетіне сіңірген еңбегі ұшан-теңіз екендігі белгілі. Бұл оның ана тіліміздегі алғашқы математика оқулықтарының авторы ретінде атқарған әдістемелік-математикалық қызметімен толықтырылуы және осы тұрғыдан да өзіндік бағасын алуы тиіс. Мәселен, орыс тіліндегі алғашқы арифметика оқулығының авторы ретіндегі Л.Магницкийдің қызметі М.Ломоносовтың «ғылымилықтың қақпасы» («врата учености») деп орынды атап көрсеткеніндей, әлі күнге дейін жоғары дәрежеде бағаланады. Біздің ойымызша, М.Дулатовтың да қызметі Л.Магницкийдің орыс мектебінде математиканы оқыту әдістемесі ғылымына сіңірген еңбегіндей дәрежеде бағалануы тиіс.

Бүгінгі таңда ұлттың ұлы тұлғасының қазақ математика әдістемесі ғылымына сіңірген ерен еңбегін ұлықтау мен насихаттауда Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің «Математика, физика және информатиканы оқыту әдістемесі» кафедрасында бірқатар игілікті іс-шаралар атқарылуда. Атап айтқанда, кафедра меңгерушісі, ҚР ҰҒА-ның академигі А.Е.Әбілқасымова мен кафедраның профессоры Б.М.Қосановтың авторлығымен үш тілде (қазақ, орыс, ағылшын) жарық көрген «Қазақстанда математиканы оқыту сабақтастығының қалыптасу тарихы» атты оқу құралында М.Дулатовтың мұраларына қатысты материалдарға мол орын берілген.

Аталмыш оқу құралының «6В01501 – Математика» мамандығының білім беру бағдарламасындағы «Математика тарихы» пәнін оқытуда негізгі оқу құралы ретінде пайдаланылуы білім алушылардың М.Дулатовтың математика оқулықтары туралы терең білім алуларына және оның әдістемелік-математикалық идеяларын қазіргі мектеп тәжірибесінде математиканы оқыту үдерісінде пайдалана алуларына мол мүмкіндік туғызылып отырғандығының айғағы болып табылады [5-7].

Сонымен қатар, «Математика, физика және информатиканы оқыту әдістемесі» кафедрасының 2 курс докторанты Б.Халимбетов «М.Дулатовтың әдістемелік-математикалық мұралары және олардың қазіргі қазақ мектебі үшін маңызы» тақырыбында диссертациялық зерттеу жұмысын жүргізуде.

Қорытынды

Қазақ халқының ұлы перзенті Міржақып Дулатовтың тыңнан түрен сала отырып, математиканың алғашқы оқу құралдарын жазуды жүзеге асыруда атқарған ерен еңбегіне лайықты баға беру біздің университетіміздің ғана емес, барша қазақ халқының алдындағы маңызды міндет демекпіз.

Жалпы алғанда, М.Дулатов көптеген аса құнды әдістемелік-математикалық пікірлер мен идеяларды әдістемелік мұра ретінде қалдырды. Оларды математиканы оқытудың жалпы мәселелеріне қатысты таратып айтсақ:

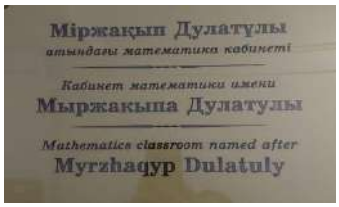
- математиканы оқыту мазмұны деңгейінің сол кезеңдегі дамыған елдер мектептері үшін анықталған мөлшер мен деңгейден төмен болмауына күш салу;

- өз заманындағы озық әдістемелік-математикалық идеяларды пайдалануға ұмтылу;

- басқа ұлт мектептеріндегі, әсіресе, орыс мектептеріндегі математиканы оқытуға қатысты озат тәжірибелерді қазақ мектебінің ерекшеліктеріне ыңғайлай отырып пайдалану;
- математиканы оқытуда ғылым негіздерінің мазмұн бірлігін сақтау үшін пәнаралық байланысты нығайту;
- қазақ халқының математикалық білім беру жөніндегі дәстүрлік тәжірибесін ескеру;
- математиканы оқытуды өмірмен және тұрмыспен, сондай-ақ қазақ баласын қоршаған ортаның ерекшеліктерімен жанастыруға тырысу;
- математиканы оқытуды қазақ баласының ұлттық, жас ерекшеліктеріне сай психологиялық мүмкіндіктерімен, қазақ халқының әдет-ғұрпымен және салт-дәстүрімен үйлестіруге ұмтылу;
- математиканы география, тарих, экономика және т.с.с. ғылым салаларымен ұштастыра оқытуға мән беру және т.б.

М.Дулатовтың әдістемелік-математикалық мұраларында математиканы оқытудың дербес мәселелеріне қатысты да құнды идеялар баршылық, олар:
- математикалық материалдың оқушылардың тілін дамыту мәселесімен барынша үйлесімді болуының ескерілуі;
- арифметикалық материалды оқытуда сандар аймағын кеңейтудің өзіндік әдістемелік жүйесінің ұсынылуы;
- ауызша және жазбаша есептеулерді оқытудың тиімді ара қатынасының сақталуы;
- көбейту кестесін оқытудың өзіндік әдістемелік жүйесінің ұсынылуы;
- есеп материалдары ретінде еліміздің елді мекендеріне, өзен-көлдеріне, халық және мал санағына және т.б. байланысты сандық мәліметтердің кеңінен пайдаланылуы;
- геометриялық ұғымдарды қалыптастырудың негізгі көзі ретінде бақылау мен тәжірибеге баса мән берілуі;
- геометриялық фактілер мен тұжырымдарды тағайындаудың практикалық іс-әрекеттермен шебер ұштастырылуы;
- есеп мазмұнының оқушыға таныс, күнделікті өмір мен тұрмыстағы оқиғалармен сабақтастырылуы;
- оқушылардың жер бетіндегі өлшеу жұмыстарын жүргізе білу дағдыларын қалыптастыруға мән берілуі;
- математикалық терминдер жасауда қазақ тілінің өз мүмкіндіктеріне иек артушылық, оның тілдік байлығын мүмкіндігінше, сарқа пайдалануға тырысушылық;
- бастауыш сыныптарда алгебралық материалды пропедевтикалық мақсатта оқытуды жүзеге асыруға ұмтылушылық және т.б.

Қазіргі таңда болашақ математика пәні мұғалімдерін М.Дулатов мұраларындағы құнды әдістемелік-математикалық идеялармен таныстыру және оларды жаңа сипаттағы қазақ мектебінде математиканы оқыту ісінде тиімді пайдалана білуге оқытып-үйрету ерекше орын алып отыр. Осы орайда, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінде «М.Дулатов атындағы математика кабинетінің» ашылуы осы мәселені жүзеге асырудың жарқын көрінісі деп атап айтуға болады. Аталмыш кабинетті университеттің Басқарма төрағасы-Ректоры Б.Тілеп салтанатты түрде ашып, М.Дулатовтың ғылыми-әдістемелік мұраларының математика пәні мұғалімдерін дайындаудағы маңызын ашып көрсетті (сурет 4).



Сурет 4. «М.Дулатов атындағы математика кабинетінің» ашылу салтанатынан көріністер

Бұл мерекелік іс-шараға еліміздің көрнекті ғалымдары мен академиктері М.Өтелбаев, М.Жұрынов, М.Қойгелдиев, А.Әбілқасымова, А.Жарменов, М.Садыбеков, сондай-ақ Алматы қаласы Мәдениет басқармасының басшысы Д.Әлиев, М.Дулатовтың немересі Е.Ә.Сатыбалды және т.б. педагог-әдіскерлер қатысты.

Пайдаланылған дереккөздер тізімі

[1] Дулатов М. Есеп құралы. Екінші жылдық. Орынбор, 1914 // Дулатова Г., Иманбаева С. Міржақып Дулатұлы. Алты томдық шығармалар жинағы. – 4-том: Ағартушылық бағыттағы еңбектері мен оқу құралдары. – Алматы: Мектеп, 2013. – 344 б. ISBN 978-601-293-963-7.

[2] Дулатов М. Есеп құралы. Бірінші жылдық. Орынбор, 1922 //Дулатова Г., Иманбаева С. Міржақып Дулатұлы. Алты томдық шығармалар жинағы. – 4-том: Ағартушылық бағыттағы еңбектері мен оқу құралдары. – Алматы: Мектеп, 2013. – 344 б. ISBN 978-601-293-957-6.

[3] Дулатов М. Есеп құралы. Екінші жылдық. Қызылорда, 1927 // Дулатова Г., Иманбаева С. Міржақып Дулатұлы. Алты томдық шығармалар жинағы. – 4-том: Ағартушылық бағыттағы еңбектері мен оқу құралдары. – Алматы: Мектеп, 2013. – 344 б. ISBN 978-601-293-961-3.

[4] Қосанов Б.М. Ана тіліндегі алғашқы математика оқулықтары: монография. –Алматы: Мерей, 2015. – 500 б. ISBN 978-601-06-3418-2.

[5] Абылкасымова А.Е., Косанов Б.М. История становления и развитие методики преподавания математики: Учебное пособие.-Алматы: Мектеп, 2020. – 336 с. ISBN 978-601-07-1464-9.

[6] Әбілқасымова А.Е., Қосанов Б.М. Қазақстандағы математиканы оқыту сабақтастығының қалыптасу тарихы. Оқу құралы. – Алматы: Мектеп, 2023. – 332с. ISBN 978-601-07-1644-5.

[7] Abylkassymova A.E., Kossanov B.M. The continuity of mathematics teaching in Kazakhstan from historical perspective. Textbook. – Almaty: Mektep, 2025. – 368p. ISBN 978-601-07-1816-6.

[8] Әбілқасымова А.Е., Қосанов Б.М., Халимбетов Б.Я. Қазан төңкерісіне дейінгі Қазақстандағы математикалық білім берудің жағдайына тарихи шолу. Абай атындағы ҚазҰПУ-нің Хабаршысы, «Физика-математика ғылымдары» сериясы, №3(91),2025. – 102-110 бб. DOI: 10.51889/2959-5894.2025.91.3.009.

References

[1] Dulatov M. (1914) Calculation tool. Second year. Orenburg. //Dulatova G., Imanbayeva S. Mirzhakyp Dulatuly. Six-volume collection of works. – Volume 4: Enlightenment-oriented works and teaching aids. – Almaty: Mektep. – 344 p. ISBN 978-601-293-963-7.

[2] Dulatov M. (1922) Calculation tool. First year. Orenburg. //Dulatova G., Imanbayeva S. Mirzhakyp Dulatuly. Six-volume collection of works. – Volume 4: Enlightenment-oriented works and teaching aids. – Almaty: Mektep. – 344 p. ISBN 978-601-293-957-6.

[3] Dulatov M. (1927) Calculation tool. Second year. Kyzylorda. //Dulatova G., Imanbayeva S. Mirzhakyp Dulatuly. Six-volume collection of works. – Volume 4: Enlightenment-oriented works and teaching aids. – Almaty: Mektep. – 344 p. ISBN 978-601-293-961-3.

[4] Kossanov B.M. (2015) The first mathematics textbooks in the native language: monograph. – Almaty: Merey. – 500 p. ISBN 978-601-06-3418-2.

[5] Abylkassymova A.E., Kossanov B.M. (2020) The history of formation and development of mathematics teaching methods: Teaching manual.-Almaty: Mektep. - 336 p. ISBN 978-601-07-1464-9.

[6] Abylkassymova A.E., Kossanov B.M. (2023) The history of the formation of the continuity of mathematics teaching in Kazakhstan. Textbook. – Almaty:Mektep. – 332p.ISBN 978-601-07-1644-5

[7] Abylkassymova A.E., Kossanov B.M. (2025) The continuity of mathematics teaching in Kazakhstan from historical perspective. Textbook. – Almaty: Mektep. – 368p. ISBN 978-601-07-1816-6.

[8] Abilkassymova A.E., Kossanov B.M., Khalimbetov B.Ya. Historical review of the state of mathematical education in Kazakhstan before the October Revolution. Bulletin of the Abai Kazakh National University of Physical Education, series "Physical and Mathematical Sciences", No. 3(91), 2025. – pp. 102-110. DOI: 10.51889/2959-5894.2025.91.3.009.

ҒТАХР 14.25.09

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.006

Г.Е. Берикханова[1], Д.С. Құдайбергенов[1], М.Т. Искакова[2]

[1]Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан
[2]Абай атындағы Казақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
**e-mail: makpalsemey@mail.ru*

СТАНДАРТТЫ ЕМЕС ТРАНСЦЕНДЕНТТІ ТЕҢДЕУЛЕРДІ ШЕШУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа

Оқушыда математикалық сауаттылық, зерттеушілік және шығармашылық құзіреттілік қалыптастыру – математиканы оқытудың негізгі мақсаттарының бірі. Оқушылардың шығармашылық және ойлау қабілеттерін дамытудың бір жолы – қиындығы жоғары және стандартты емес есептерді шығара білуге жаттықтыру мұғалімнің шеберлігі мен еңбекқорлығының нәтижесінде жүзеге асады. Стандартты емес трансцендентті есептер, сондай-ақ стандартты емес әдістермен шығарылатын есептер конкурстық, олимпиадалық тапсырмаларда жиі кездеседі. Мақалада стандартты емес трансцендентті теңдеулерді шешуде дәстүрлі әдістерден тыс жаңа стратегиялық әдістерді қолдануды қарастырады. Функцияның монотондылығын, шенелгендігін, жұптылығын, мүмкін мәндер жиынын қолдану, теңдеуді функцияға көбейту және сан аралықтарында зерттеу сияқты тәсілдер қарастырылады. Олардың қолданылуы мен тиімділігі мысалдар арқылы көрсетіледі. Стандартты емес теңдеулерді шешудің барлық тәсілдерін қарастырып шығу мүмкін емес. Қарастырылған мысалдардан стандартты емес трансцендентті теңдеулерді шешу оқушылардың меңгерген материалдарын шығармашылықпен ұғынуына, ойлау қабілетін дамытуға септігін тигізеді. Осындай мысалдар математикалық үйірмеде, сыныптан тыс сабақтарда, олимпиадаға дайындауда сондай-ақ қорытынды - қайталау сабақтарында қолдану арқылы стандартты емес тәсілдермен шешілетін теңдеулерді дәстүрлі емес әдістермен шығаруға, тиімді тәсілдерді іздеуге оқушыларды баулиды. Жұмыс қазіргі контексте теңдеулерді шешуге бірегей көзқарас ұсына отырып, жаңа перспективаларды ашады және оқушыда математика пәніне шығармашылық көзқарасты шабыттандырады.

Түйін сөздер: стандартты емес теңдеулер, шешу әдістері, монотондылық, шенелгендік, жұптық, мүмкін мәндер жиыны, функцияны зерттеу.

Г.Е. Берикханова[1], Д.С. Кудайбергенов[1], М.Т. Искакова[2*]
Шакарим университет, г. Семей, Казахстан
[2] Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстаны

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ НЕСТАНДАРТНЫХ ТРАНСЦЕНДЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ

Аннотация

Формирование у ученика математической грамотности, исследовательской и творческой компетентности – одна из основных целей обучения математике. Один из способов развития творческих способностей и способностей мышления учащихся - обучение умению решать задач повышенной трудности и нестандартные задачи достигается в результате мастерства и трудолюбия учителя. Нестандартные трансцендентные задачи, а также задачи, решаемые нестандартными методами, часто встречаются в конкурсных, олимпийских заданиях. В статье рассматривается решение нестандартных трансцендентных уравнений с использованием новых стратегических методов, выходящих за рамки традиционных. Рассматриваются такие методы, как использование монотонности, ограниченности, четности функции, области допустимых значений, умножение уравнения на функцию и исследование на числовых интервалах. Их применение и эффективность демонстрируются на примерах. Рассмотреть все способы решения нестандартных уравнений невозможно. Решение нестандартных трансцендентных уравнений на рассмотренных примерах способствует творческому осмыслению учащимися усвоенного материала, развитию мышления. Используя подобные примеры в математическом кружке, на внеклассных занятиях, в подготовке к олимпиаде, а также на итогово-повторных занятиях, учащиеся вовлекаются в поиск эффективных методов решения нестандартных уравнений, решаемые нестандартными, нетрадиционными

способами. Работа открывает новые перспективы, предлагая уникальный подход к решению уравнений в современном контексте, и вдохновляет учащегося на творческий подход к математике.

Ключевые слова: нестандартные уравнения, методы решения, монотонность, ограниченность, четность, область допустимых значений, исследование функции.

G.E. Berikkhanova[1], D.S. Kudaibergenov[2], M.T. Iskakova[3]
Shakarim University, Semey, Kazakhstan
[2]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

METHODS FOR SOLVING TRANSCENDENTAL NON-STANDARD EQUATIONS

Abstract

Formation of mathematical literacy, research, and creative competence in students is one of the main goals of mathematics education. One way to develop creative thinking skills among students is through teaching them how to solve challenging and non-standard problems, achieved through the mastery and diligence of the teacher. Non-standard transcendental problems, as well as problems solved using non-traditional methods, are often encountered in competitive and Olympiad tasks. The article considers the solution of non-standard transcendental equations using new strategic methods that go beyond traditional ones.Methods such as utilizing monotonicity, boundedness, function parity, domain of admissible values, multiplying equations by functions, and exploring numerical intervals are considered. Their application and effectiveness are demonstrated through examples. It is impossible to consider all methods for solving non-standard equations. Solving non-standard transcendental equations using the examples considered promotes students' creative understanding of the material they have learned and the development of their thinking. By using such examples in math clubs, extracurricular activities, olympiad preparation, as well as in final review sessions, students are engaged in finding effective methods for solving non-standard equations using non-traditional approaches. The work opens up new perspectives, offering a unique approach to solving equations in a modern context, and inspires students to take a creative approach to mathematics.

Keywords: Non-standard equations, solution methods, monotonicity, boundedness, parity, domain of admissible values, function exploration.

Кіріспе

Еліміздің тәуелсіздігі білім беру жүйесінде де жаңару мен жаңғыртудың қажеттілігін айқындады. Еліміздегі білім беру көптеген өзгерістерге ұшырап, дамып келеді. Білім алушылар жаңа ақпараттық коммуникациялық технологияларды жетік меңгерген, бәсекеге қабілетті, нақты қабілеттері мен дағдылары қалыптасқан азамат болуы басты міндет.

Білімалушы оқу мен тәжірибенің теориялық негізделген тәсілін меңгеріп, оны өмірлік практикада қолдануды немесе қойылған мәселені шешуге жаңа тәсілдерді өз бетінше таба алуды қалыптастыруы қажет. Осы мақсатта оқушыда математикалық сауаттылық, зерттеушілік және шығармашылық құзіреттілік қалыптастырылады.

Оқушылардың шығармашылық ойлау қабілеттерін дамыту – білім саласының негізгі міндеттерінің бірі. Бұл міндетті орындау барысында мектептің математика курсын оқытудың маңызы зор. Әр тақырыпты түсіндіріп, оқулықтағы есептерді шығартумен қатар, алған білімнің өмірмен байланысын, күрделі ситуацияларда қолданылуын, қиындығы жоғары және стандартты емес есептерді шығара білуге жаттықтыру мұғалімнен үлкен шеберлік пен еңбекқорлықты талап етеді.

Қиындығы жоғары, стандартты емес трансцендентті есептерді шығара білу – оқушылардың математикалық ой-өрісінің дамығандығының анық көрсеткіші. Мектеп бағдарламасындағы математика курсы білім алушылардың ой-өрісі мен білім деңгейін арттыруда және азамат етіп тәрбиелеуде маңызы ерекше [1].

Демек, оқушылардың математикалық ойлау қабілеттерін дамыту үшін ең алдымен олардың ынтасы мен қабілетіне қарай қызығып шығаратын есептерді мұқияттылықпен іріктеп алу керек. Егер есептің күрделілігі оқушылардың оқу бағдарламасына, қабілетіне сай болмаса немесе тым күрделі болса, оқушыда пәнге деген ынта төмендейтіні анық.

Есеп шешімін болжау байқампаздық пен ой ептілігін қажет етеді, яғни негізгі қасиеттерін, ерекшеліктерін, ұқсастық белгілерін ажыратып, салыстыра білуі керек. Оқушылардың ойлау қабілеттерін арттырудың ең ұтымды әдісі – салыстыру және ұқсату, анализ және синтез болып саналады. Сондай тәсілдердің бірі – стандартты және стандартты емес есептерді салыстыра отырып шешуде өте маңызды.

Оқушылардың есепті шығара білуге үйрету процесі шығармашылық сипатта болуы керек. Ал шығармашылық қабілет оқушылардың жалпы дамуының құрамдас бөлігі бола отырып, зерттеушілік қызметтің бір формасы болып табылады.

Мектеп математика курсын оқытуда оқушыларда зерттеушілік құзіреттілікті қалыптастыру пән мұғалімінің негізгі міндеті. Мектептің оқулықтарында «зерттеуге» берілген есептер жиыны бар. Дегенмен, «зерттеу» ұғымы формальді болып, оқушыда ешқандай зерттеушілік іс-әрекет байқалмайтын жағдайлар кездеседі.

Зеттеушілік қызметті көп талап ететін есептер – *стандартты емес трансценденттті есептер*. Стандартты емес трансцендентті есептердің қиындығы өте жоғары болады. Осындай тапсырмаларды орындау білім алушылардан терең ізденісті, шығармашылықты, жүйелі логикалық ойлауды және үлкен еңбекті қажет етеді. Бұлар оқушы тәрбиесінде ең керекті, әрі ең маңызды қасиеттердің бірі болып саналады.

Оқушылардың математикалық қабілеттерін арттыру және математика пәніне деген құлшынысын тәрбиелеуде қызықты есептер мен логикалық күрделі есептерді қолдану тиімді. Егер оқушы есепті шығара алатындығына сенімді болса, оның білім алудағы табысқа жетуі айқын болады. Есеп өте күрделі болса, оқушының амалы болмай, шығармашылық қабілеті төмендейді де, оның дамуына бөгет жасайды. Мұғалім тапсырмаларды мұқияттылықпен таңдай отырып, оқушыларының сенімі мен жігерін, қызығушылығын, оның есепті шешуге ұмтылуын, жетістікке жетуін қамтамасыз етеді. Тапсырманы орындау барысында мына алгоритмді білген жөн:

1) тапсырманың берілгенін түсіну;
2) тапсырманы орындау қадамын анықтау;
3) құрылған қадамды іске асыру;
4) табылған шешімді корытындылап үйрену.

Есеп шығаруда осы алгоритмнің қалыптасуы білім алушының шығармашылық құзіреттілігін дамытуға, тақырыпты меңгерудегі қиындықтар мен олқылықтарды жеңуге мүмкіндік беретіні белгілі. Ұстаздың міндеті – оқушының бойында ойлау және шығармашылық құзіреттіліктерін қалыптастыра білуі. Ал оның кілті – шығармашылық, логикалық есептерді шығарту. Білім алушылардың шығармашылық, логикалық тапсырмаларды көбірек орындауы олардың білік және білім дағдысын қалыптастыра отырып жүзеге асады. Сонымен, білім алушыны шығармашылыққа бейімдейтін, ой-өрісін кеңейтетін құрал ретінде логикалық және стандартты емес есептерді айтуға болады.

Қандай математикалық есепті стандартты емес деп атауға болады? Ш.Б.Жиенбаев аударған Г.А.Козловтың «Стандартты емес есептерді шешуді үйрен» атты кітабында стандартты емес есеп ұғымына жақсы анықтама берілген:

Стандартты емес есептер деп математика курсында оларды шешудің нақты бағдарламасын анықтайтын жалпы ережелер мен түсініктері жоқ мәселелерді айтамыз. Оларды қиындығы жоғары есептермен шатастыруға болмайды [2].

Стандартты емес есептерді шешкенде, әдетте, ереже болып табылмайтын нұсқауларды қолданамыз. Шешім әр кезде өзгеше болып табылады, ол есеп шартына және оқушының есептерді шешу тәжірибесі мен біліктілігімен тығыз байланысты.

Стандартты емес тапсырмаларды шешу процесі мынадай екі негізгі әрекетті орындаудан тұрады:

1) Түрлендіру немесе орын ауыстыру арқылы берілген стандартты емес есепке ұқсас болатын стандартты есептің шығару жолы туралы ақпаратты алу.
2) Стандартты емес есептерді бірнеше стандартты есептерге бөлу.

Стандартты емес есеп сипатына байланысты осы операциялардың біреуін қолдану қажет. Ал күрделі стандартты емес есептерді шешкенде бұл операциялар бірнеше рет қолданылады.

Стандартты емес есептерді шешу үшін осы екі операцияны қолдану туралы нұсқауларды әдетте эвристикалық ереже немесе эвристиктер деп атайды. Ол міндетті емес кеңес болғандықтан, ұсыныс сипатын қабылдайды, оның салдары есепті шешуге әкелеуі де әкелмеуі де мүмкін.

Сонымен, есепті шешу шығармашылық қызмет түрі, ал шешімді іздеу тапқырлықтың процесі. Осы жерде маңыздысы әр түрлі шығару жолдарын табу болып табылады. Оны іздеу кезінде танымдық, қызығушылық қалыптасады, шығармашылық қабілет дамиды, зерттегіштік дағды пайда болады. Сонымен қатар есепті шешу кезіндегі индивидуалдық ерекшеліктер әр түрлі шешу жолдарынан неғұрлым қарапайым, рационалды және әдемісін таңдауға мүмкіндік береді [3].

Математикалық аппараттардың негізгі құралдарының бірі – физикадан экономикаға дейінгі әртүрлі салаларда қолданылатын теңдеулер. Алайда, теңдеулерді шешудің стандартты әдістері жеткіліксіз немесе тиімсіз болатын есептер класы бар.

Теңдеулерді шешудің стандартты емес әдістері теңдеулерді терең зерттеуге және олардың қасиеттерін инновациялық тәсілдермен қолдана білуге негізделген. Әр түрлі типтегі теңдеулерді мұқият талдаудың нәтижелерін ұсына отырып, бұл әдістер математикалық есептердің белгілі бір кластарына тән ерекше заңдылықтар мен құрылымдарды анықтауға негізделген. Теңдеулердің қасиеттерін пайдалану классикалық әдістердің шектеулеріне қарамай, ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында қолданудың жаңа перспективаларын ашу арқылы оларды шешудің арнайы тәсілдерін жасауға мүмкіндік береді [4].

А.Я. Канель-Беловтың еңбектерінде стандартты емес есептерді шешудің мынандай әдістері келтіріледі: ұқсас есептерді іздеу, кері жорып дәлелдеу, сәйкестік, графтар, инварианттылық, Дирихле принципі, математикалық индукция, Евклид алгоритмі [5].

Стандартты емес есептерді шығару оқушының математикалық сауаттылығын қалыптастыруда және дамытуда маңызы зор [6].

Зерттеу әдіснамасы

Зерттеудің мақсатына жету үшін, яғни стандартты емес теңдеуді шешу үшін, ғылыми математикалық танымдардың әртүрлі әдістерін қамтитын *кешенді әдістер* қолданылды. Теңдеулерді шешудің стандартты емес әдістерін қолдануды қарастырамыз.

Түрлендірулер нәтижесінде немесе айнымалыны сәтті ауыстыру арқылы кез-келген $f(x)+g(x)=0$ теңдеуін белгілі бір шешу алгоритмі бар стандарт түрге келтіруге бола бермейді. Мұндай жағдайларда $f(x)$ және $g(x)$ *функцияларының қасиеттерін қолдану әдісі* өте тиімді.

Ол үшін осы функциялардың анықталу облыстарының қиылысуын табамыз. Сол облыста осы *функциялардың монотондылығын* анықтап, сан аралығында үзіліссіз, монотонды функциялардың алгебралық қосындысының қасиеттерін қолданамыз.

Стандартты емес теңдеудің құрамында трансценденттті функциялар бар болса, олардың *шенелгендігі* берілген теңдеудің түбірлерінің санын анықтауға мүмкіндік береді. Бұл ақпарат теңдеудің түбірінің мүмкін мәндер жиынындағы қандай да бір аралыққа тиісті екенін көрсетеді. Осы аралықта ғана теңдеуге зерттеу жүргізу есепті шешу процесін тиімді ықшамдайды.

$f(x)=c$ түріндегі стандартты емес теңдеуді шешуде $f(x)$ функциясының *тақ, жұптылығын* қолданып, оның түбірлерінің санын табуды жеңілдетуге болады. Атап айтсақ, егер теңдеудің бір x_0 түбірін табу оның екінші $-x_0$ түбірінің болатындығын қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, теңдеудің берілген аралықтағы түбірлер санын алдын ала анықтауға

мүмкіндік туғызады. Теңдеудің берілуіне байланысты функцияның басқа да қасиеттерін пайдалану қажет.

Функцияның қасиеттерін пайдаланудан басқа теңдеулерді шешудің басқа стандартты емес әдістері бар. Бұл әдістер *жасанды тәсілдер* деп аталады. Кейде алгебралық теңдеудің шешімін табу оның екі бөлігін де белгілі бір функцияға немесе көпмүшеге көбейту арқылы айтарлықтай жеңілдейді. Бұл жағдайда артық түбірлердің пайда болуы мүмкін екендігін есте ұстаған жөн. Сондықтан бастапқы теңдеуге эквивалент теңдеу алу үшін түбірі жоқ көпмүшеге көбейту керек. Ал егер түбірі бар көпмүшеге көбейтсек, бұл түбірлердің әрқайсысын бастапқы теңдеуге қойып, көпмүшенің түбірі теңдеудің түбірі болып табылатынын не табылмайтындығын тексеру қажет.

Стандартты емес трансценденттi теңдеуді шешуде *функцияның туындысын қолдану әдісі* өте кең пайдаланылатын әдістердің бірі. Функцияның өсуі мен кемуін, экстремумдарын қолдану жиі пайдаланылады [7]. Мұндай есептерді шешудің нақты әдістері болмағандақтан, есептің берілуіне байланысты аталған әдіс-тәсілді сәтті таңдауға тура келеді. Кейбір теңдеулерді шешу барысында осы аталған әдістердің бірнеше түрін кешенді қолдануға болады. Сондықтан оқушыға сан-алуан әдістерді меңгерту мұғалімнің өзінен де, қызметінен де үлкен білім мен іскерлікті талап етеді.

Сонымен қатар стандартты емес трансценденттi теңдеулерді шешуде математикалық анализдің басқа да элементтерін қолдану өте тиімді [8].

Зерттеу нәтижелері

Стандартты емес трансценденттi есепті шешуде оқушы бұл есепті шешудің тәсілін де, қандай оқу материалына сүйенетінін де алдын-ала білмейді. Стандартты емес есептер әр түрлі формада болады. Олардың біреулерінің сыртқы формасы әдеттегідей көрінгенмен, оған қандай амал жасау керек екендігі түсініксіз және белгісіз. Ал, енді біреулері алдамшы: есептің түріне қарасаң, үйреншікті стандартты есеп сияқты, бірақ стандартты тәсілмен ол шешілмейді. Үшінші біреулері әрі шебер, әрі нақты логикалық ойлауды өте қажет етеді [9].

Теңдеулерді терең деңгейде зерттеу жаңа заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік береді, бұл күрделі есептерді шешудің жалпы және әмбебап әдістерін жасауға әкеледі. Теңдеулерді шешудің стандартты емес әдістерін қолдануды қарастырамыз. Сонымен қатар трансцендент теңдеуді алгебралық теңдеуге келтіру әдісіне де мысал қарастырылады.

Стандартты емес теңдеудің берілуіне байланысты әдіс-тәсілді таңдауға тура келеді. Сондықтан оқушыға сан-алуан әдістерді меңгерту мұғалімнен үлкен еңбекті талап етеді.

Стандартты емес теңдеулерді шешуде жоғарыда айтылған әдістерді қолдануға мысалдар келтірейік.

Мысал – 1. $x \cdot 2^{x^2+2x+2} = 32$ теңдеуін шешу керек.

Шешуі. $x \le 0$ берілген теңдеудің шешімі болуы мүмкін емес, себебі $g(x) = 2^{x^2+2x+2}$ көрсеткіштік функциясы үнемі оң мән қабылдайтындықтан $x \cdot 2^{x^2+2x+3} < 0$ болады. Ал есептің шарты бойынша бұл көбейтінді $32-$ге тең, яғни оң шама. Сондықтан берілген теңдеудің түбірін бірінші көбейткіш $x > 0$ болатын жиыннан іздейміз. $f(x) = x$ және $g(x) = 2^{x^2+2x+2}$ үзіліссіз және қатаң өспелі функциялар болғандықтан, олардың көбейтіндісі де үзіліссіз және қатаң өспелі функция болады. Сондықтан $x > 0$ болғанда $y = x \cdot 2^{x^2+2x+2}$ функциясы үзіліссіз және қатаң өспелі. Сонымен, $x > 0$ облысында функцияның әрбір мәні бір ғана нүктеге тиісті болады. Бұдан $x = 1$ берілген теңдеудің шешімі екенін көру оңай, яғни бұл оның жалғыз шешімі.

Мысал – 2. $\sqrt[5]{38-x}-\sqrt[10]{x-5}=2$ теңдеуін шешу керек.

Шешуі. Теңдеуінің мүмкін мәндерінің жиынын табамыз. Теңдеудегі түбір көрсеткіштері жұп болғандықтан, түбір астындағы өрнек оң мәндер қабылдауы тиіс. Сондықтан мынандай теңсіздіктер жүйесін құрамыз:

$$\begin{cases}38-x\ge 0\\ x-5\ge 0\end{cases},\quad \begin{cases}-x\ge -38\\ x\ge 5\end{cases},\quad \begin{cases}x\le 38\\ x\ge 5\end{cases}.$$

Сонымен теңдеудің мүмкін мәндер жиыны $[5;38]$ сегменті болады. Мүмкін мәндер жиынында $f(x)=\sqrt[5]{38-x}$ кемімелі ал $g(x)=\sqrt[10]{x-5}$ функциясы өспелі, сондықтан олардың айырмасы болатын $y(x)=\sqrt[5]{38-x}-\sqrt[10]{x-5}$ функциясыда үзіліссіз және қатаң кемімелі болады. Сондықтан $y(x)$ функциясының әрбір мәні үшін $x-$тің бір ғана мәні табылады. $x=5$ теңдеудің жалғыз түбірі болып табылады.

Мысал – 3. $\sin\left(x^3+2x^2+3\right)=x^2+2x+3$ теңдеуін шешу керек.

Шешуі. Кез келген x нақты саны үшін синус функциясының шенелген екенін білеміз, яғни $\left|\sin\left(x^3+2x^2+3\right)\right|\le 1$ немесе $\sin\left(x^3+2x^2+3\right)\le 1$ деп жаза аламыз. Ал берілген теңдеудің оң жағын қысқаша көбейту формуласы бойынша $x^2+2x+3=(x+1)^2+2$ деп жазсақ, ол кез келген x нақты саны үшін $1-$ден үлкен оң мән қабылдайды, яғни $x^2+2x+3=(x+1)^2+2>1$. Сонда кез-келген $x-$тің мәні үшін теңдеудің сол жағы $1-$ден артық емес, ал оң жағы 1-ден артық болды. Бұлай болуы мүмкін емес. Сондықтан бұл теңдеудің түбірі жоқ.

Мысал – 4. $x^3-x-\sin\pi x=0$ теңдеуін шешу керек.

Шешуі. Таңдау әдісімен $x=0$, $x=1$, $x=-1$ мәндерінің берілген теңдеудің шешімдері болып табылатынын көруге болады. $f(x)=x^3-x-\sin\pi x$ функциясы үш тақ функцияның алгебралық қосындысы болғандықтан, ол тақ функция болады. Теңдеудің басқа нақты шешімдерін табу үшін оларды $x>0$, $x\ne 1$ жиынында табу жеткілікті, өйткені егер $x_0>0$ оның шешімі болса, онда оған қарама-қарсы $-x_0$ мәні де оның шешімі болып табылады.

Біз $x>0$, $x\ne 1$ жиынын екі аралыққа бөлеміз: $(0;1)$ және $(1;+\infty)$.

Берілген теңдеуді $x^3-x=\sin\pi x$ түрінде жазамыз. $(0;1)$ аралықта $g(x)=x^3-x$ функциясы тек теріс мәндерді қабылдайды, ал $h(x)=\sin\pi x$ функциясы тек оң мәндерді қабылдайды. Демек, бұл аралықта теңдеудің шешімдері жоқ.

Енді $(1;+\infty)$ аралығын қарастырайық. Бұл аралықта кез келген x үшін $g(x)=x^3-x$ функциясы оң мәндерді қабылдайды, ал $h(x)=\sin\pi x$ функциясы оң да, теріс те мәндерді қабылдайды, ал $(1;2]$ аралығында $h(x)=\sin\pi x$ функциясы оң емес. Демек, $(1;2]$ аралығында теңдеудің шешімі жоқ.

Егер $x>2$ болса, онда $|\sin\pi x|\le 1$, яғни оң да, теріс те мәндер қабылдайды. Бұл аралықта $x^3-x>6$ болатындығы белгілі. Бұдан $(1;+\infty)$ аралығында да теңдеудің шешімдері жоқ екенін көреміз.

Сонымен, тек $x=0$, $x=1$, $x=-1$ теңдеудің шешімдері болып табылады.

Мысал – 5. a параметрінің қандай да бір мәнінде $8x^8-6ax^6+4x^4-2ax^2=7$ теңдеуінің 7 түбірі болуы мүмкін бе?

Шешуі. $f(x)=8x^8-6ax^6+4x^4-2ax^2$ деп белгілейміз. $f(x)$ жұп функция, сондықтан егер x_0 берілген теңдеудің түбірі болса, онда $-x_0$ де түбірі болады, яғни түбірлері симметриялы болады. $x=0$ берілген теңдеудің түбірі емес, себебі $f(0)\neq 7$. Демек, бұл теңдеудің кез-келген нақты a параметрінің мәніндегі түбірлерінің саны жұп болады, сондықтан берілген теңдеудің 7 түбірі болуы мүмкін емес.

Мысал – 6. $x^8-x^6+x^4-x^2+1=0$ теңдеуін шешу керек.

Шешуі. Берілген теңдеудің мүмкін мәндер жиыны барлық нақты сандар жиыны, яғни $(-\infty;+\infty)$. Теңдеудің екі жағын да x^2+1 көпмүшесіне көбейтеміз. Оның нақты сандар жиынында шешімі жоқ. Сонда берілген теңдеуге эквивалентті теңдеу аламыз:

$$\left(x^2+1\right)\left(x^8-x^6+x^4-x^2+1\right)=0.$$

Жақшаны ашсақ, $x^{10}-x^8+x^6-x^4+x^2+x^8-x^6+x^4-x^2+1=0$ немесе $x^{10}+1=0$ теңдеуін аламыз. Бұл теңдеуінің нақты түбірі жоқ екені анық, сондықтан берілген теңдеудің де түбірі болмайды.

Мысал – 7. $2x^3-12x^2-30x+4=0$ теңдеуін шешу керек.

Шешуі. Теңдеудің екі жағын да $x+\frac{1}{2}$ көпмүшеге көбейтеміз. Сонда $2x^4-11x^3-36x^2-11x+2=0$ теңдеуін аламыз. Бұл теңдеудің $x=-\frac{1}{2}$ түбірі берілген теңдеудің түбірі болмайды. Бұл теңдеу төртінші дәрежелі симметриялық теңдеу. Осы теңдеудің екі жағын да x^2 – қа бөліп, топтастырып, оған эквивалентті теңдеу аламыз:

$$2x^2-11x-36-\frac{11}{x}+\frac{2}{x^2}=0 \text{ немесе } 2x^2+\frac{2}{x^2}+4-4-11x-\frac{11}{x}-36=0,$$

$$2\left(x+\frac{1}{x}\right)^2-11\left(x+\frac{1}{x}\right)-40=0.$$

Мынандай белгілеу енгіземіз: $y=x+\frac{1}{x}$. Сонда $2y^2-11y-40=0$ квадрат теңдеуін аламыз. Оның түбірлері $y_1=-\frac{5}{2}$, $y_2=8$. Бұдан $x+\frac{1}{x}=-\frac{5}{2}$ және $x+\frac{1}{x}=8$ теңдеулерінің жиынын аламыз. Бұл теңдеулердің түбірлері $x_1=4-\sqrt{15}$, $x_2=4+\sqrt{15}$, $x_3=-2$, $x_4=-\frac{1}{2}$ болады.

$x_4=-\frac{1}{2}$ түбірі берілген теңдеу үшін бөгде түбір болғандықтан, берілген теңдеудің үш түбірі болады: $x_1=4-\sqrt{15}$, $x_2=4+\sqrt{15}$, $x_3=-2$.

Кейбір жағдайларда теңдеудің шешімдерін әртүрлі сан аралықтарында зерттеу арқылы табуға болады.

Дискуссия

Стандартты емес трансцендентті теңдеулерді шешудің стандартты емес әдістері нақты шешімдерді табудың тиімді құралдарын ұсынып қана қоймайды, сонымен қатар математикалық ұғымдар туралы түсінігімізді байытуға ықпал ететінін байқадық.

Түрлендірулер нәтижесінде немесе айнымалыны сәтті ауыстыру арқылы кез-келген $f(x)=g(x)$ теңдеуін белгілі бір шешу алгоритмі бар стандарт түрге келтіруге бола бермейді. Мұндай жағдайларда функцияның анықталу облысын, монотондылығын, шенелгендігін, тақ, жұптылығын және т. б. қасиеттерін пайдаланудың дұрыс болатыны мысалдардан көрінеді.

Функцияның монотондылығын пайдалану барысында теңдеудің құрамындағы $f(x)$, $g(x)$ функцияларының аргументтің қандай да бір аралығында өспелі немесе кемімелі екендігін анықтап, олардың қосындысының, айырмасының монотондылығы анықталады. Егер функция монотонды болса, онда функцияның әрбір мәні үшін аргументтің бір ғана мәні сәйкес келеді. Осы тұжырымды ескеріп, қарастырылып отырған аралықта теңдеудің шешімін табуға мүмкіндік туады.

Функцияның шенелгендігін стандартты емес теңдеулерді шешуде тиімді қолдануға болады. $f(x)=g(x)$ теңдеуінде $|f(x)|\le a$ болса,аргументтің қандай мәндерінде $|g(x)|\le a$ шартының орындалатындығын зерттейміз.

$f(x)=g(x)$ теңдеуінің құрамындағы $f(x)$, $g(x)$ функциялары тақ немесе жұп болып, қандай да бір сан аралығындағы x_0 саны теңдеудіңтүбірі болса, $-x_0$ саны да түбірі болатындығын ескеру қажет, яғни теңдеудің бір түбірінің бар болуы оның екінші түбірінің табылуын қамтамасыз етеді.

Функцияның қасиеттерін пайдаланудан басқа теңдеулерді шешудің басқа стандартты емес әдістері бар. Кейде алгебралық теңдеудің шешімі оның екі бөлігін де белгілі бір функцияға көбейту арқылы айтарлықтай жеңілдейді. Бұл жағдайда көбейтілген көбейткіштің түбірлеріне байланысты артық түбірлердің пайда болуы мүмкін екендігін есте ұстаған жөн. Сондықтан бастапқы теңдеуге эквивалент теңдеу алу үшін теңдеуді оның мүмкін мәндер жиынында шешімі болмайтын көбейткішке көбейту керек. Ал егер берілген теңдеудің мүмкін мәндер жиынында шешімі бар болатын көбейткішке көбейтсек, алынған түбірлердің әрқайсысын бастапқы теңдеуге қойып, тексеру қажет, яғни *жасанды тәсілдер* трансцендентті стандарт емес теңдеулерді шешуде тиімді қолданылады.

Жоғарыда келтірілген мысалдар стандартты емес трасцендентті теңдеулерді шешуде таңдалатын әдістің берілген теңдеудің түріне, оның құрамындағы функциялардың қасиеттеріне, мүмкін мәндер жиынына тікелей тәуелді екенін көрсетеді. Әрбір мысалды шығаруда қолданылған тәсілдер оқушыны дайын алгоритмді механикалық түрде қолдануға емес, есептің құрылымын талдауға, тиімді әдісті салыстырып таңдауға үйретеді.

Қорытынды

Стандартты емес теңдеулерді шешудің сан алуан әдістері математикада және оның қолданыстарында маңызды рөл атқарады, стандартты әдістермен әрдайым шешілмейтін есептерде шешімдерді талдау және табу құралдары ұсынылады. Бұл әдістерге функцияның монотондылығын, шенелгендігін, жұптылығын, туындысын, мүмкін мәндер жиынын пайдалану, теңдеуді функцияға көбейту, сондай-ақ функцияны аралықта зерттеу сияқты әртүрлі әдістер кіреді.

Стандартты емес теңдеуді шешу әдісін таңдау мен оны зерттеу қатар жүргізіледі. Оқушыларды берілген теңдеуді шешудің бірнеше тәсілдерінің ішінен тиімдісін таңдап алуға, сонымен қатар бірнеше тәсілмен шығарып, әртүрлі тәсілдерді меңгертуге үйрету маңызды. Мысалы, берілген теңдеу $n-$ші дәрежелі көпмүшеден тұрса, Безу теоремасын қолдануды да қамтамасыз ету керек. Бұл әдістерді қолдану математиканың әртүрлі салаларында кездесетін күрделі теңдеулерді шешудегі қиындықтарды жеңуге мүмкіндік береді. Жүйелі тәсіл және функциялардың қасиеттерін терең талдау арқылы бұл әдістер теңдеулердің ерекшеліктерін анықтауға және олардың шешімдерін жоғары дәлдікпен табуды қамтамасыз етеді.

Алайда, бұл әдістерді тиімді қолдану көбінесе терең математикалық білім мен негізгі ұғымдарды түсінуді қажет ететіндігін ескеру қажет. Сонымен қатар, стандартты емес теңдеулердің шешіміне жету үшін оқушыдан мұқият талдау мен күрделі есептеулерді жүргізу талап етеді.

Дегенмен, стандартты емес теңдеулерді шешу әдістерін дамыту және жетілдіру қазіргі математикада белсенді зерттеу саласы болып қала береді. Осы саладағы қосымша зерттеулер жаңа әдістер мен алгоритмдердің дамуына әкелуі мүмкін, бұл көптеген мәселелерді шешуге мүмкіндік береді және математикалық талдауды қол жетімді және тиімді етеді [10].

Стандартты емес теңдеулерді шешудің барлық тәсілдерін қарастырып шығу мүмкін емес. Жоғарыда қарастырылған мысалдардан стандартты емес теңдеулер оқушылардың меңгерген материалдарын шығармашылықпен ұғынуына септігін тигізеді және мына қабілеттердің:

1. синтез және анализ, салыстыру, ұқсастық, классификация сияқты қарапайым ойлау әрекеттерінің жоғары деңгейде қалыптасуына;
2. болжамдар мен шешімдер нұсқаларын және ерекше идеялар ұсына алатын ойлау белсенділігінің жоғары деңгейде жетілуіне;
3. еркін ойлау әрекетінен көрінетін ұйымшылдық пен ұйымдастырушылықтың жоғары деңгейге дамуына ықпал етеді [11].

Білім алушы оқу мен тәжірибенің теориялық негізделген тәсілін біліп, оны кез келген жағдайда қолдануды немесе кездескен мәселені шешуге тың тәсілдерді өздігінен таба алауға бейімделеді. Оған баратын жолдардың бірі – стандартты емес есептерді шығарту.

Қарастырылған есептер математикалық үйірмеде, сыныптан тыс сабақтарда, олимпиадаға дайындауда, сондай-ақ қорытынды - қайталау сабақтарында қолдану арқылы стандартты емес тәсілдермен шешілетін теңдеулерді дәстүрлі емес әдістермен шығаруға, тиімді тәсілдерді іздеуге оқушыларды баулиды.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

[1] Теуш Б.Л. Уравнения и неравенства. Задачи повышенной сложности. Пособие для подготовки к ЕГЭ. М.: УРСС, 2013. – 208 с.

[2] Козлов Г.А. Учись решать нестандартные задачи: Методическое руководство для учащихся 7-10 классов. Полиграфия, 2013. – 123 с.

[3] Супрун В.П. Математика для старшеклассников. Нестандартные методы решения задач. М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 272 с.

[4] Апышев О.Д., Мадияров М.Н., Ергалиев Е.К. Стандартты емес теңдеулерді шешу әдісі: әдістемелік құрал. Өскемен: Берел, 2017. – 63 б.

[5] Канель-БеловА.Я., Ковальджи А.К. Как решают нестандартные задачи. М.: МЦМНО, 2008. – 96 с.

[6] Нургабыл Д.Н., Саткулов Б.Б. Формирование и развитие математической грамотности в контексте программной концепции PISA-2021. Ясауи университетінің Хабаршысы. Ғылыми журнал, 3(129), 2023. – 267-281 б.

[7] Рахымбиұлы Н., Берикханова Г.Е. Стандартты емес есептерді шешуде туындыны қолдану. Математика және физика, 3(129), 2023. – 5-8 б.

[8] Казакбаева Г.К., Назарова К.Ж. Стандартты емес есептерді шешуде математикалық анализ элементтерін қолданудың тиімділігі. Ясауи университетінің Хабаршысы. Ғылыми журнал, 1(131), 2024. – 268-281 б.

[9] Мұсабеков М., Қожабаев К. Стандартты емес есептерді шығаруда зерттеушілік қызмет элементтерін пайдалану. Информатика, физика, математика, 1, 2000. – 16-17 б.

[10] Искакова М.Т. Орта мектепте оқушыларды математикалық есептерді стандарты емес тәсілдермен шығартуға үйрету мәселелері. «Білім беру жүйесін модернизациялау: тенденциялар, проблемалар және перспективалар» ХҒПК материалдары, Алматы, 2019. – 379-382 б.

[11] Искакова М.Т., Босқынбай Н. Решение олимпиадных задач как метод творческого мышления учащихся на уроках математики. Достижения науки и образования, 2(82), 2022. – 81-85 с.

References

[1]Teush B. L. Uravneniya i neravenstva. Zadachi povyshennoy slozhnosti. Posobie dlya podgotovki k EGE [Equations and inequalities. Problems of high complexity. A manual for preparing for the Unified State Examination]. URSS. 2013. 208 p.

[2] Kozlov G. A. Uchis' reshat' nestandartnye zadachi: Metodicheskoe rukovodstvo dlya uchashchikhsya 7-10 klassov [Learn to solve non-standard problems: Methodological guide for students of grades 7-10]. Poligrafiya. 2013. 123 p.

[3] Suprun V. P. Matematika dlya starsheklassnikov. Nestandartnye metody resheniya zadach [Mathematics for high school students. Non-standard methods of solving problems]. Knizhniydom «Librokom». 2009. 272 p.

[4]Apyshev O. D., Madiyarov M. N., Ergaliev E. K. Standartty emes tengdeulerdi sheshu adisi: adistemelik qural [Method for solving non-standard equations: methodological guide]. Oskemen, Berel. 2017. 63 p.

[5] Kanel-Belov A. Ya., Koval'dzhi A. K. Kak reshayut nestandartnye zadachi [How non-standard problems are solved]. MTsMNO. 2008. 96 p.

[6]Nurgabyl D. N., Satkulov B. B. Formirovanie i razvitie matematicheskoy gramotnosti v kontekste programmnoy kontseptsii PISA-2021 [Formation and development of mathematical literacy in the context of the program concept PISA-2021]. Yasaui universitetining Khabarshysy. Gylymi zhurnal, 3(129), 2023. pp. 267-281.

[7]Rakhymbiuly N., Berikhanova G. E. Standartty emes esepterdi sheshude tuyndyny qoldanu [Application of the derivative in solving non-standard problems]. Matematika zhane fizika, 3(129), 2023. pp. 5-8.

[8]Kazakbaeva G. K., Nazarova K. Zh. Standartty emes esepterdi sheshude matematikalyq analiz elementterin qoldanudyng tiimdiliki [Effectiveness of using elements of mathematical analysis in solving non-standard problems]. Yasaui universitetining Khabarshysy. Gylymi zhurnal, 1(131), 2024. pp. 268-281.

[9]Musabekov M., Qozhabaev K. Standartty emes esepterdi shygaruda zertteushilik qyzmet elementterin paidalanu [Use of elements of research activity in solving non-standard problems]. Informatika, fizika, matematika, 1, 2000. pp. 16-17.

[10] Iskakova M. T. Orta mektepte oqushylardy matematikalyq esepterdi standartty emes tasildermen shygartuga uiretu maseleleri [Problems of teaching secondary school students to solve mathematical problems in non-standard ways]. «Bilim beru zhuiesin modernizatsiyalau: tendentsiyalar, problemalar zhane perspektivalar» KhGPK materialdary, Almaty, 2019. pp. 379-382.

[11] Iskakova M. T., Bosqynbai N. Reshenie olimpiadnykh zadach kak metod tvorcheskogo myshleniya uchashchikhsya na urokakh matematiki [Solving olympiad problems as a method of creative thinking of students at mathematics lessons]. Dostizheniya nauki i obrazovaniya, 2(82), 2022. pp. 81-85.

IRSTI 14.35.07

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.007

R.A. Zhunussova[1]*, M.S. Bokayeva[1], A.A. Zhapakova[1]

[1]Pavlodar Pedagogical University named after A. Margulan, Pavlodar, Kazakhstan
**e-mail: rzhunusova@mail.ru*

DEVELOPING STUDENTS' CREATIVE THINKING IN THE PROCESS OF STUDYING PROJECTIVE GEOMETRY

Abstract

This article discusses methods for completing complex geometrical construction tasks to develop students' creativity. The effectiveness of methods for developing creative qualities such as flexibility, lateral thinking, and a creative approach is noted. It also describes methods for developing students' creative thinking and creative skills, problem-based learning methods, and students' research skills. The aim of this study is to improve students' creative abilities in lectures, practical work, and independent work on projective geometry. In this article, we present methodological methods and approaches aimed not only at teaching but also at developing creative thinking. These methods were applied in the educational process at Margulan University in teaching projective geometry and led to a positive shift in the development of students' creative thinking.

Keywords: creativity, creative thinking, creative approach, projective geometry, teaching methods.

Р.А. Жунусова[1*], М.С. Бокаева[1], А.А. Жапакова[1]
[1*]Әлкей Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар қ., Қазақстан

ПРОЕКТИВТІК ГЕОМЕТРИЯНЫ ОҚУ БАРЫСЫНДА ОҚУШЫЛАРДЫҢ ШЫҒАРМАШЫЛЫҚ ОЙЛАУЫН ДАМЫТУ

Аңдатпа

Бұл мақалада студенттердің шығармашылық қабілеттерін дамытуға бағытталған күрделі геометриялық салу есептерін орындау әдістері қарастырылады. Икемділік, латералды ойлау және шығармашылық тәсіл сияқты шығармашылық қасиеттерді қалыптастыру әдістерінің тиімділігі атап өтіледі. Сонымен қатар студенттердің шығармашылық ойлауын және шығармашылық дағдыларын дамыту жолдары, проблемалық оқыту әдістері мен білім алушылардың зерттеушілік дағдылары сипатталады. Зерттеудің мақсаты – проективтік геометрия бойынша дәрістерде, практикалық сабақтарда және өзіндік жұмыста студенттердің шығармашылық қабілеттерін дамыту. Бұл мақалада біз оқытуға ғана емес, сонымен қатар креативті ойлауды дамытуға бағытталған әдістемелік әдістер мен тәсілдерді ұсынамыз. Аталған әдістер Марғұлан университетінде проективтік геометрияны оқыту барысында оқу үдерісінде қолданылып, студенттердің шығармашылық ойлауын дамытуда жақсы өзгерістерге қол жеткізуге мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: креативтілік, шығармашылық ойлау, шығармашылық тәсіл, проективтік геометрия, оқыту әдістері.

Р.А. Жунусова[1*], М.С. Бокаева[1], А.А. Жапакова[1]
[1*]Павлодарский педагогический университет имени А.Маргулана, г. Павлодар, Казахстан

РАЗВИТИЕ ТВОРЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ СТУДЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЕКТИВНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Аннотация

В данной статье рассматриваются методы выполнения сложных задач на геометрические построения, направленные на развитие творческих способностей студентов. Отмечается эффективность методов формирования таких творческих качеств, как гибкость мышления, латеральное мышление и творческий подход. Также описываются способы развития у студентов творческого мышления и творческих навыков, методы проблемного обучения и исследовательские умения обучающихся. Целью исследования является развитие творческих способностей студентов на лекциях, практических занятиях и в самостоятельной работе по проективной геометрии.

В статье мы представляем методичсекие методы и подходы не только обучению , но и развитию креативного мышления. Эти методы были использованы в учебном процессе в Маргулан университете при преподавании проективной геометрии и позволил добится положительного сдвига в развитии творческого мышления студентов.

Ключевые слова: креативность, творческое мышление, творческий подход, проективная геометрия, методы обучения.

Introduction

Main provisions

The relevance of the topic lies in the fact that knowledge and understanding of the essence of geometric positions is not sufficient for studying geometry; analytical and creative thinking are also necessary. To this end, we propose the development of students' creative thinking when studying projective geometry at university. The goal and objectives of the lesson are to develop creative skills and abilities in projective geometry lessons using interactive programs and models. In this article, we propose a number of methods and technologies for teaching projective geometry in lectures, practical classes, and independent study. The main conclusions are the need to develop creative thinking, improve modern teaching aids, and increase the effectiveness of practical training. The importance of focusing on the use of interactive programs for solving and proving geometric problems is also emphasized, which contributes to the development of creative thinking in future mathematics and physics teachers.

The article discusses the section of geometry known as "projective geometry" and its teaching in pedagogical HEI. Due to the difficulties in assimilating theoretical knowledge, the article proposes that theoretical material be presented using a creative approach and the creative thinking of students. The difficulty of studying this material is primarily due to its multifacetedness and the large number of imaginary objects, as this section is directly aimed at developing students' spatial imagination and geometric intuition. Projective geometry is one of the traditional sections of the geometry course studied by future mathematics teachers. The complexity of studying this topic lies in the fact that students have studied Euclidean geometry throughout their conscious lives and are accustomed to its standards. Therefore, when studying projective geometry, it becomes difficult for them to understand its structure and basic elements. Recently, there has also been a decline in student interest in this discipline, mainly due in part to an excessive amount of theory and less visualization. In this regard, the relevance of our research lies in the search for new methodological approaches to teaching students the elements of projective geometry on a plane. Therefore, the aim of our research is to develop a creative approach for a better understanding of the basics of projective geometry on a plane by students of physics and mathematics at pedagogical HEIs. A creative approach to teaching projective geometry includes the use of real-life examples (architecture, art), interactive methods (linear perspective, 3D modeling), gamification (puzzles), and links to other disciplines (computer graphics, philosophy) to help students understand the invariant properties of figures under transformations and develop spatial thinking by turning abstract concepts into visual and engaging ones.

V.N. Druzhinin defines creativity as a person's general ability to create and, in his works, equates the concepts of "creativity" and "creative work" [1]. We agree with his opinion and consider it necessary to note that in this work, we use the concepts of "creativity" and "creative work" as synonyms. Currently, the most well-known and frequently used psychodiagnostic methods for studying the level of development of creative thinking (creativity) in students are the following: verbal and image tests of creative thinking by E.P. Torrance, S. Mednik's Remote Associates Test, A.S. Lachins's Flexibility of Thinking method, and a battery of creativity tests created by E.E. Tunik based on J. Guilford's creativity tests. The empirical and theoretical levels of creative thinking and a creative approach to problem solving must be incorporated into the training system for future mathematics teachers. They determine the readiness and ability of future teachers to carry out creative or educational research. They develop the ability to assess the reliability of results obtained using

experimental or theoretical research methods. Creative thinking, independent cognitive work skills, and the ability to model situations using a computer are developed; during the learning process, students master the skills of planning and conducting experiments (real and virtual), as well as the skills related to processing and presenting research results. Creative thinking is the ability to see approaches that differ from accepted standards and to find a way out in difficult circumstances. People with creative skills move away from stereotypes and realize that there are many solutions to a single problem. A creative approach does not question the balance between intellect and imagination, logic and creativity – on the contrary, it harmoniously combines these elements.

To develop creative thinking, Astafieva V. and Proshkin V. consider using projective and constructive geometry in the training of future mathematics teachers [2]. In the article, the authors emphasize that the tasks and methods of projective geometry (for example, Desargues' theorem) allow not only to "teach theorems," but also to practice analysis, argumentation, and the development of solution strategies, which is important for future teachers. Jafaruddin M. and Wen- Haw Chen use elements of "ethnomathematics" in their projective geometry course: they include cultural constructs (e.g., traditional houses) in their assignments, linking abstract geometrical concepts to the realities of their students' lives in order to increase motivation and understanding [3]. They apply the Hypnoteaching model, a pedagogical strategy aimed at engaging and actively involving students, especially in the context of distance learning. Ultimately, the integration of cultural context and a project-based/practical approach to distance learning can make projective geometry more accessible, understandable, and motivating. Lucas Cunha Bastos et al. provide a historical overview of the development of projective geometry – from its origins to modern approaches – and discuss how it can be implemented in the educational process (especially at the primary and secondary levels) [4]. In their opinion, one of the key prospects is the use of dynamic geometry systems (e.g., GeoGebra) to visualize and model projective concepts, which greatly facilitates the understanding of abstract concepts. The authors emphasize that this approach helps to make a "smooth transition" from familiar Euclidean geometry to projective geometry, reducing the cognitive load on students and increasing clarity and intuitivism. In general, the introduction of a historical and visual-interactive approach can serve as a bridge between traditional school geometry and more "adult" projective geometry. In her article, Ravshanova Ugylshod Abdurashid kyzy shows that projective geometry methods can even be applied to solving problems in "elementary" school geometry [5]. In other words, projective ideas make it possible to simplify, generalize, and find new solutions to problems involving collinearity, intersections, and relationships between points and lines, using concepts such as "points at infinity," "harmonic division," "cross ratio," and others. This makes it possible not to limit projective geometry to the "university level," but to use it as a tool in school geometry, broadening students' horizons and enriching their methods for solving. Kazakh scientists [6-8] suggest using digital technologies and programs (3D modeling, dynamic geometry) when teaching the construction of geometric shapes – an important skill that is similar in spirit to projective and spatial geometry. They use the method of local axiomatization and active problem-based learning, collective work, and reflection on mistakes – with the aim of developing "geometric thinking" in future teachers. This shows that even if the course is not strictly "projective," methods aimed at developing spatial, logical, abstract thinking, and visualization can be very useful and applicable in the more general context of geometry. The use of projective geometry as a tool for developing critical and spatial thinking – not only as "mathematics for mathematicians," but as a powerful pedagogical resource [9-13].

Despite some successful examples, there are not many works devoted specifically to the method of teaching projective geometry in higher education institutions. Research is needed to test the long-term effect: not just "improved performance now," but "improved geometric thinking, the ability to abstract, and apply design ideas in new situations." Methodological recommendations and training programs need to be developed that take into account the cognitive characteristics of students when transitioning from Euclidean to projective geometry.

Materials and Methods

Let's start describing the teaching materials we have developed with the creation of Projective Geometry lecture complex. It includes a lecture course on 30 basic and additional topics.

When compiling and delivering lectures, various methods and technologies are used, as well as creative approaches aimed at developing students' creative thinking. For example, problem-based learning. The use of problem situations in lectures can contribute to a creative approach to problem solving [8]. This approach involves presenting students with problem situations or tasks that do not have a single obvious solution. For example: "What if...?": studying how geometric properties or theorems change when axioms or conditions change (for example, what happens to parallel lines in projective space). Or tasks with missing or redundant data: students must determine for themselves what information is needed or unnecessary to solve a specific projective task. Other methods and technologies (Table 1) were also used in lectures to develop students' creative and innovative abilities.

Table 1. Methods and technologies used to develop creative thinking

Topics	*Proposed methods for developing creative thinking*	*Technologies and creative approaches in teaching*
Incidental	*The "Six Thinking Hats" method or brainstorming, where participants are asked to consider a problem from different perspectives (emotional, critical, optimistic, etc.).*	*Facilitation techniques, visual tools, digital platforms*
Projective straight line	*Synectics (direct, personal, symbolic analogies): Searching for analogies in nature, art, or technology to understand abstract concepts of projective geometry*	*Creative journal: Sketch your ideas about how one projection is related to another, or how isometry transitions into perspective.*
Projections	*Six Thinking Hats Method (De Bono): Study projections and perspectives from different "points of view" (emotions, facts, criticism, positivity) for a comprehensive analysis.*	*SketchUp, GeoGebra*
Homography	*TIPS (Theory of Inventive Problem Solving): Applying the principles of contradictions and ideal end results to find new ways of projecting, solving problems with constraints, and "improving" geometrical constructions*	*Project-based and problem-based learning (PBL): Solving real-world problems (architecture, design, graphics), creating 3D models from 2D sketches, or vice versa.*
Duality	*Brainstorming and mind maps: Generating a multitude of ideas related to projections, shadows, perspectives, and visualizing them to find connections.*	*Interactive diagrams.*
Conics	*Random word/picture method: Linking concepts being studied (e.g., points, lines, planes, perspectives) to a random object to generate unusual metaphors and associations.*	*Augmented (AR) and virtual (VR) reality: Immersion in a three-dimensional space that allows you to "touch" and "enter" geometric figures and see their transformations in real time.*
Axiomatics	*Brainstorming: Mass generation of ideas without judgment.*	*3D modeling and parametric design*
Desargues' theorem, Pappus' theorem	*Constructivist learning: Students don't just acquire knowledge, they "build" it by manipulating objects in GeoGebra and discovering patterns.*	*GeoGebra*

Thus, the application of creative thinking methods in lectures when studying the Projective Geometry course contributes to the formation of in-depth knowledge in students, combined with the development of interest and motivational aspects in the learning process. Therefore, is received with interest by students, reveals their creative abilities, which in turn contributes to a deep understanding of the topic and is an effective way of teaching.

During practical classes, students offered their ideas on the problem at hand and considered various methods of solving the problem. To enhance creative thinking, we used various creative approaches in practical classes. For example, the Ames room can be viewed as the result of a projective transformation of space that is close to affine but not affine. Students interpret the image assuming a standard perspective, and the brain "imposes" a Euclidean model where a projective one works. In essence, the Ames room is an optical illusion based on the principles of projective geometry (in particular, perspective distortion). The students created a three-dimensional embodiment of projective transformations in the form of a model (Fig. 1) where objects are projected onto a plane (eye retina), and the brain tries to restore their three-dimensional dimensions based on incorrect assumptions. The Ames room is constructed so that from the front it looks like a normal cubic room with a back wall and two side walls parallel to each other and perpendicular to the horizontal planes of the floor and ceiling. However, the true shape of the room is trapezoidal: the walls are sloped, the ceiling and floor are also sloped, and the right corner is much closer to the observer entering the room than the left, or vice versa. As a result of an optical illusion, the snowman (assyk, Christmas tree, and Santa Claus, headphones) standing in one corner appears to the observer to be a giant, while the second object standing in the other corner appears to be a dwarf. The illusion is so convincing that the observer thinks that the object changes size when it moves. We also tried to depict the Ames room in the GeoGebra program (Fig. 2).

Figure 1. Three-dimensional embodiment of projective transformations in the form of a model

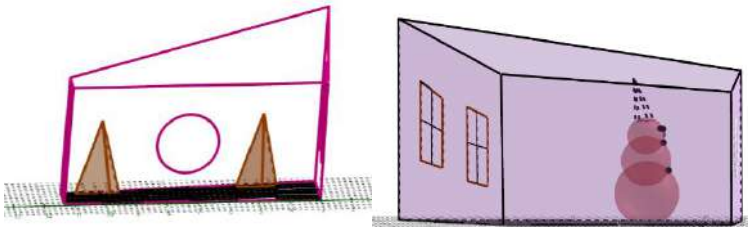


Figure 2. Ames room in the GeoGebra program

During practical classes, students demonstrated their creative abilities and creative approach by applying linear perspective, theory of shadows, and Desargues' configuration in painting, design, and architecture by making figures (Fig. 3). They also tried to make models of the room (Fig. 4) with the effect of depth and space, which is achieved by converging lines leading to a single vanishing point. The task set for the students was to create a space that would then go beyond the existing one. Models in projective geometry and perspective are closely related: perspective is a method of central projection that imitates how we see objects on a plane using vanishing points and the horizon line,

and is the basis for constructing realistic models (figures, drawings) of buildings, cities, and objects, transforming the 3D world into a 2D image using the principles of projective geometry. Projective geometry studies how shapes change when projected, and perspective is the practical application of these rules, especially linear (one, two, three vanishing points), to create the illusion of depth and volume in a model.

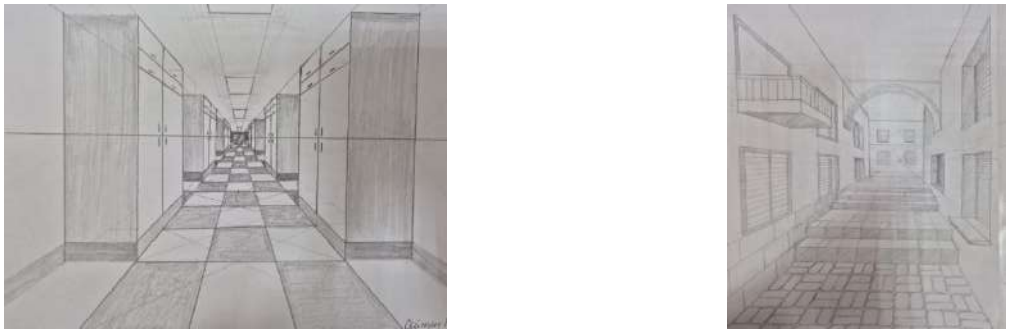


Figure 3. Students' work

Figure 4. Room models with the effect of depth and space

Using the Compass 3D and GeoGebra programs allows you not only to visualize points at infinity and directions, but also to explore projective invariants (collinearity, dual relation); model central and parallel projections; dynamically verify theorems (when changing the configuration); and develop research skills in students. This is especially important because intuition plays a key role in projective geometry, particularly when considering topics in second-order surface theory.

For example, constructing and rotating 3D models of surfaces (ellipsoids, hyperboloids, paraboloids, cylinders) based on their equations helps students understand their spatial arrangement (Figure 5). Constructing cross-sections of surfaces with planes (parallel to the axes or arbitrary) to see how second-order curves (ellipses, hyperbolas, parabolas) are formed.

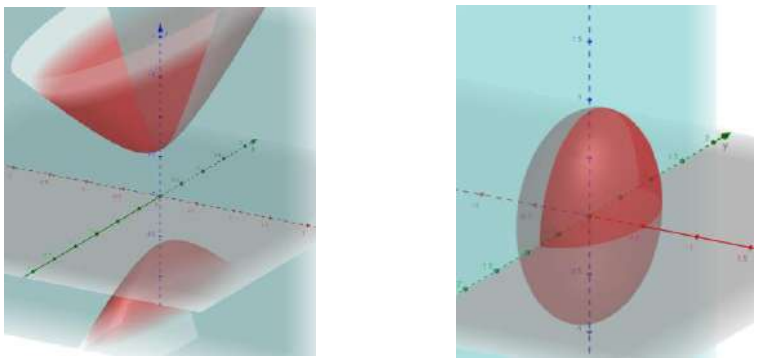


Figure 5. Three-dimensional surface models

The dynamic environment of GeoGebra allows for the effective use of an experimental approach when studying the theorems of Desargues and Pappus-Pascal, forming students' intuitive understanding of projective invariants and preparing them for the perception of rigorous proofs (Fig. 6). When proving Pappus-Pascal and Desargues' theorems, students develop their geometric imagination and rely on complex configurations of points and lines, formulate hypotheses for collinearity, observe the stability of the result, and realize which properties are projective invariants.

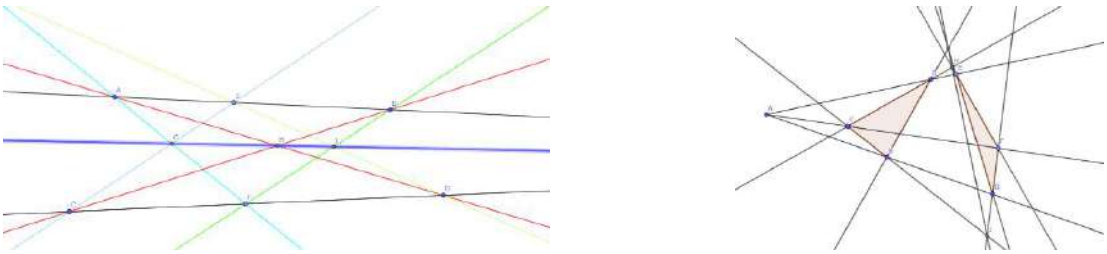


Figure 6. Students' work in GeoGebra

Students begin to understand that in projective geometry, the same "transformation" can be applied to the text of any theorem. After all, on a projective plane, unlike a Euclidean plane, there are no parallel lines. The condition and conclusion mainly involve collinear triples of points (three points are incident to one line) and competitive triples of lines (three lines are incident to one point).

By the end of the semester, students knew the basic methods for constructing perspective images of geometric figures; the basic rules for applying perspective projections in figures and performing analysis of perspective images; and solved problems involving the construction of shadows from objects in perspective at various positions of the light source.

Results and discussion

During the study, we developed a model, indicators, and control and measurement materials for diagnosing the level of research skills of future mathematics and physics teachers [7].

The study was conducted at Margulan University among students majoring in Mathematics Teacher Training while studying the Projective Geometry discipline. A total of 42 second-year students were involved, with Russian and Kazakh as their languages of instruction.

In the course of studying the discipline and observing students in lectures and practical classes, as well as analyzing their written creative works, we determined the following levels: high, sufficient, threshold, low, critical [7]. We did not divide the groups into control and experimental groups, as we diagnosed the qualities of developing creative abilities and creative thinking before and after the application of the teaching materials we had developed. The initial study was conducted after the students had completed traditional practical work on projective geometry. Next, according to our plan of experiment, the students began learning using the teaching materials we developed.

The problem of determining the levels of development of creative abilities was considered in the dissertation research of Bibikova N.V., Vishnevaya N.E., Klevtsova V.L., and Gin S.I. Theoretical analysis of their work and our own research on the problem allowed us to identify the following criteria for assessing the levels of development of students' creative abilities

The criteria on the basis of which it is possible to determine the levels of creative abilities are given in Table 2. The final diagnosis of the level of creative thinking was carried out according to the criteria, by checking written works and personal interviews with students.

At the beginning of the educational process, students did not show very high results. They did not know how to find and work with information, did not show persistence in solving problems, did not know how to analyze and correctly formulate solutions and the main points of research, etc.

Table 2. Criteria for assessing the level of creative abilities

Criterion	Level and score of creativity development				
	Critical /1	Low /2	Threshold /3	Sufficient/4	High/5
A. Cognitive-emotional criterion	Doesn't show interest in upcoming work	Takes a passive approach to tasks Afr aid to speak in public	Engages as necessary Involved in teamwork	Thinks outside the box, shows emotionality in creative tasks	Generates many ideas Is active and proactive
B. Personal-creative criterion	Not active	Afraid to express his/her point of view, prefers to work under the template	Only shows up in group work	Able to use his/her imagination	Criti cally evaluates ideas, tends to act independent ly
C. Moti vational-value criterion	Does not seek to participate in creative activities	Lea rning creative activities is extremely slow	Participates in creative activities as part of a team	Understands and recognizes the value of his/her own and others' creativity	Gen erates a large number of ideas. Demonstrat es originality and independen ce
D. Acti vity-process criterion	Does not demonstra te independe nce skills	Does not demonstrat e independen t creative activity	Demon strates creative skills in group work	Perfor ms work well, expresses emotional satisfaction with the results of his/her activities	Strives to achieve goals and obtain specific results from his/her activities
E. Refl ective criterion	Does not demonstra te analysis of activities	Does not demonstrate liveliness and emotionality in self- reflection	Adequ ate in self-assessment. Strives for self-education	Conducts self-analysis and self-reflection, sees his/her strengths and weaknesses	Striv es for self-developmen t, objective criticism of his/her own and others' achievemen ts

Given that the maximum score is 5 and the minimum is 1, we converted the obtained indicators into scores.

$$X = \frac{A + B + C + D + E}{5}$$

Then, analyzing the results at the initial stage of the study, where the level of development of creative skills and abilities had low indicators, we saw that threshold and low scores prevailed. At the final stage of the study, a repeat diagnosis of the level of development of students' research skills and abilities was carried out using the same method.

After conducting a statistical analysis using Wilcoxon rank sum test and determining whether there was a significant shift in indicators in this direction, we observed a statistically significant positive shift: the indicators of the level of development of creative skills and abilities at the final stage increased compared to the same indicators at the initial stage.

The study on the formation of creative thinking in the study of the module of Projective Geometry discipline showed positive statistics.

It should be noted that students with a relatively low creative flexibility coefficient are by no means

considered by us to be uncreative. In this case, we adhere to the point of view of V.N. Druzhinin, who believes that a person who gives an original, creative answer obviously possesses creativity. But even if a person does not give a creative answer in a free situation, this is not evidence of a lack of creativity. With the help of creativity tests, we can identify creative people, but we cannot accurately identify non-creative people. The reason for this is the spontaneity of manifestations of creativity and the insubjectivity of these manifestations to external and internal regulation [1].

Conclusions

Analysis of the results of our study on the formation of creative thinking in students has shown how, through the competent construction of logical chains, it is possible to lead students to solve problems of any complexity, while developing their creative thinking. The completion of spatial figures accompanying the reasonings given, develops spatial thinking as well. All this enriches the student's intellect and thinking culture, which is so necessary for their project and research activities.

This study aims to ensure that future mathematics and physics teachers master the theoretical foundations of creative activity through the development of their creativity and the organization of special training for students to carry out creative activities in geometry lessons.

Список использованных источников

[1] Дружинин, В.Н. Психология общих способностей [Текст] / Дружинин В.Н. // СПб.: Питер, 2002, 3-издание, 359с. URL:https://krh–school2.ucoz.com/dokumenty/obrazovanie/psikhologija_obshhikh_sposobnostej_druzhinin.pdf

[2] Proshkin, V., Astafieva, M., and Radchenko, S. Formation of critical thinking of future mathematics teachers by means of geometry. Educological discourse, 2018, № 1(20–21) DOI: 10.28925/2312–5829.2018.1–2.1416

[3] Jafaruddin, M., Chen, Wen–Haw. Fostering Ethnomathematics in Projective Geometry: A Hypnoteaching Framework for Effective Distance Learning, Southeast Asian Mathematics Education Journal, 2023, Vol.13, №2. DOI: https://doi.org/10.46517/seamej.v13i2.240

[4] Lucas, Cunha Bastos. Projective Geometry: A Historical Overview and Perspectives for Education. The Global GeoGebra Journal. – 2023. – Vol.11 – №1. https://mathed.miamioh.edu/index.php/ggbj/article/view/206

[5] Ravshanova, O'g'ilshod Abdurashid kizi. The application of projective geometry in elementary geometry problems, International Journal of Artificial Intelligence, 2025, Vol. 5, No.08, p.196–199. https://www.academicpublishers.org/journals/index.php/ijai/article/view/6051

[6] Кокеш, А.Н. Калимбетов, Б.Т. Мадияров, Н.К. Цифрлық технологияларды қолданып болашақ математика мұғалімдерін геометриялық фигураларды кескіндеуге оқыту әдістері, Gumilyov journal of pedagogy, 2025, Том 150, № 1, p.248–266. https://doi.org/10.32523/3080-1710-2025-150-1-248-266

[7] Irina, B. Shmigirilova. Alla, S. Rvanova. Advancing future mathematics teachers' geometric thinking through a Van Hiele–based elementary geometry course, Journal on Mathematics Education, 2025, Volume 16, No.3, pp. 799–818 https://doi.org/10.22342/jme.v16i3.pp799–818

[8] Zhunussova, R., Kireyeva, A. Development of students' research competencies when studying analytical and projective geometry //Bulletin of Abai KazNPU. Series of Physical and Mathematical sciences, 2025, Vol. 91, No.3, p.111–120. DOI:https://doi.org/10.51889/2959–5894.2025.91.3.010.

[9] Thom, J.S, McGarvey, L.M. and Markle, J. Projective geometry and spatial reasoning for STEM learning, European Journal of Mathematics Education, 2024, 9, p.1–5. DOI: 10.3389/feduc.2024.1312845

[10] Kim, J., & Park, H. Visualization of Cross–Ratio Concepts Through Interactive Geometry Software, Education Studies in Mathematics, 2024, Volume 45, https://doi.org/10.1016/j.edurev.2024.100639

[11] Hamdi, M. N. H., Handayani, R. D., & Supriadi, B. Student's perspective: Mathematical reasoning ability and correlations between mathematics and physics, Journal of Environment and Sustainability Education, 2024, 2(1), p. 53–60. doi: 10.62672/joease.v2i1.31

[12] Delan, Serhang & Bnar, Karim. Teaching euclidean geometry and introducing some non–euclidean geometries: enhancing high school student engagement, 2024, 15-noyabr, Session 1, Part 1. DOI: 10.5281/zenodo.14235584

[13] Майер, В.Р. Крум, Е.В. Информационные технологии в обучении проективной геометрии будущих учителей математики, 2014, №1(27). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye–tehnologii–v–obuchenii–proektivnoy–geometrii–buduschih–uchiteley–matematiki (дата обращения: 08.12.2025).

References

[1] Druzhinin, V.N. Psixologiya obshhix sposobnostej, SPb.: Piter, 2002. – 3 – izdanie, 359s. URL:https://krh–school2.ucoz.com/dokumenty/obrazovanie/psikhologija_obshhikh_sposobnostej_druzhinin.pdf

[2] Proshkin, V., Astafieva, M., and Radchenko, S. Formation of critical thinking of future mathematics teachers by means of geometry. Educological discourse, 2018, № 1(20–21) DOI: 10.28925/2312–5829.2018.1–2.1416

[3] Jafaruddin, M., Chen, Wen–Haw. Fostering Ethnomathematics in Projective Geometry: A Hypnoteaching Framework for Effective Distance Learning, Southeast Asian Mathematics Education Journal, 2023, Vol.13, №2. DOI: https://doi.org/10.46517/seamej.v13i2.240

[4] Lucas, Cunha Bastos. Projective Geometry: A Historical Overview and Perspectives for Education. The Global GeoGebra Journal. – 2023. – Vol.11 – №1. https://mathed.miamioh.edu/index.php/ggbj/article/view/206

[5] Ravshanova, O'g'ilshod Abdurashid kizi. The application of projective geometry in elementary geometry problems, International Journal of Artificial Intelligence, 2025, Vol. 5, No.08, p.196–199. https://www.academicpublishers.org/journals/index.php/ijai/article/view/6051

[6] Kokesh, A.N. Kalimbetov, B.T. Madiyarov, N.K. Sifrlyq tehnologialardy qoldanyp bolaşaq matematika mūğalımderın geometrialyq figuralardy keskındeuge oqytu ädısterı, Gumilyov journal of pedagogy, 2025, Tom 150, № 1, p.248–266. https://doi.org/10.32523/3080-1710-2025-150-1-248-266

[7] Irina, B. Shmigirilova. Alla, S. Rvanova. Advancing future mathematics teachers' geometric thinking through a Van Hiele–based elementary geometry course, Journal on Mathematics Education, 2025, Volume 16, No.3, pp. 799–818 https://doi.org/10.22342/jme.v16i3.pp799–818

[8] Zhunussova, R., Kireyeva, A. Development of students' research competencies when studying analytical and projective geometry //Bulletin of Abai KazNPU. Series of Physical and Mathematical sciences, 2025, Vol. 91, No.3, p.111–120. DOI:https://doi.org/10.51889/2959–5894.2025.91.3.010.

[9] Thom, J.S, McGarvey, L.M. and Markle, J. Projective geometry and spatial reasoning for STEM learning, European Journal of Mathematics Education, 2024, 9, p.1–5. DOI: 10.3389/feduc.2024.1312845

[10] Kim, J., & Park, H. Visualization of Cross–Ratio Concepts Through Interactive Geometry Software, Education Studies in Mathematics, 2024, Volume 45, https://doi.org/10.1016/j.edurev.2024.100639

[11] Hamdi, M. N. H., Handayani, R. D., & Supriadi, B. Student's perspective: Mathematical reasoning ability and correlations between mathematics and physics, Journal of Environment and Sustainability Education, 2024, 2(1), p. 53–60. doi: 10.62672/joease.v2i1.31

[12] Delan, Serhang & Bnar, Karim. Teaching euclidean geometry and introducing some non–euclidean geometries: enhancing high school student engagement, 2024, 15-noyabr, Session 1, Part 1. DOI: 10.5281/zenodo.14235584

[13] Majer, V.R. Krum, E.V. Informacionny`e texnologii v obuchenii proektivnoj geometrii budushhix uchitelej matematiki // Vestnik KGPU im. V.P. Astaf`eva, 2014, №1(27). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye–tehnologii–v–obuchenii–proektivnoy–geometrii–buduschih–uchiteley–matematiki (data obrashheniya: 08.12.2025).

МРНТИ 14.25.07

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.008

Шмигирилова И.Б.*, Таджигитов А.А., Дуткин М.А.

Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, г. Петропавловск, Казахстан
**e-mail: irinankzu@mail.ru*

МЕХАНИЗМЫ ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ В ОБУЧЕНИИ МАТЕМАТИКЕ: СКАФФОЛДИНГ КАК ТЕХНОЛОГИЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Аннотация

В статье рассматривается технология скаффолдинга как один из эффективных механизмов педагогической поддержки. Освоение математики школьниками сопряжено со значительными трудностями, необходимость преодоления которых актуализирует значимость scaffold-поддержки обучающихся и поиска таких дидактических средств, которые обеспечивают постепенный переход учащихся к самостоятельному выполнению учебных действий. Целью работы является исследование дидактических возможностей технологии скаффолдинга и условий ее эффективной интеграции в учебный процесс в контексте обучения математике. В ходе теоретического исследования был осуществлен анализ и систематизация результатов научно-методических изысканий по проблеме образовательного скаффолдинга, который был дополнен обобщением педагогического опыта использование этой технологии в обучении математике. Эмпирический этап исследования, который включал анкетирование учителей математики, позволил выявить особенности восприятия скаффолдинга практикующими педагогами, а также методические и организационные трудности, связанные с недостаточной их готовностью к практическому использованию scaffold-поддержки в учебном процессе. Представленные выводы и рекомендации могут быть использованы для повышения эффективности способов педагогической поддержки учащихся и разработке программ повышения квалификации учителей.

Ключевые слова: технология скаффолдинга, педагогическая поддержка, развитие самостоятельности учащихся, повышения эффективности обучения, обучение математике.

И.Б. Шмигирилова*, А.А. Таджигитов, М.А. Дуткин
М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті, Петропавл қ., Қазақстан

МАТЕМАТИКАНЫ ОҚЫТУДАҒЫ ПЕДАГОГИКАЛЫҚ ҚОЛДАУ ТЕТІКТЕРІ: СКАФФОЛДИНГ ОҚУ ҚЫЗМЕТІН СҮЙЕМЕЛДЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫ РЕТІНДЕ

Аңдатпа

Мақалада скаффолдинг технологиясы педагогикалық қолдаудың тиімді тетіктерінің бірі ретінде қарастырылады. Оқушылардың математиканы меңгеруі айтарлықтай қиындықтармен байланысты, оларды жеңу қажеттілігі scaffold қолдауын білім алушыларды қолдаудың және оқушылардың оқу іс-әрекеттерін өз бетінше орындауға біртіндеп көшуін қамтамасыз ететін осындай дидактикалық құралдарды іздеудің маңыздылығын өзектендіреді. Жұмыстың мақсаты – скаффолдинг технологиясының дидактикалық мүмкіндіктерін және оның математиканы оқыту контекстінде оқу процесіне тиімді интеграциялану шарттарын зерттеу. Теориялық зерттеу барысында білім беру скаффолдингі мәселесі бойынша ғылыми-әдістемелік зерттеулердің нәтижелерін талдау және жүйелеу жүзеге асырылды, ол математиканы оқытуда осы технологияны қолданудың педагогикалық тәжірибесін жалпылаумен толықтырылды. Математика мұғалімдерінің сауалнамасын қамтитын зерттеудің эмпирикалық кезеңі тәжірибешілердің скаффолдингті қабылдау ерекшеліктерін, сондай-ақ олардың оқу процесінде scaffold қолдауын практикалық қолдануға дайын болмауына байланысты әдістемелік және ұйымдастырушылық қиындықтарды анықтауға мүмкіндік берді. Ұсынылған тұжырымдар мен ұсыныстар оқушыларды педагогикалық қолдау әдістерінің тиімділігін арттыру және мұғалімдердің біліктілігін арттыру бағдарламаларын әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: скаффолдинг технологиясы, педагогикалық қолдау, оқушылардың дербестігін дамыту, оқыту тиімділігін арттыру, математиканы оқыту.

I.B. Shmigirilova*, A.A. Tadzhigitov, M.A. Dutkin
M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan

PEDAGOGICAL SUPPORT MECHANISMS IN TEACHING MATHEMATICS: SCAFFOLDING AS A LEARNING SUPPORT TECHNOLOGY

Abstract

This article examines scaffolding technology as an effective pedagogical support mechanism. Schoolchildren's acquisition of mathematics is fraught with significant challenges, the need to overcome which highlights the importance of scaffold support for students and the search for didactic tools that facilitate their gradual transition to independent learning. The aim of this study is to investigate the didactic potential of scaffolding technology and the conditions for its effective integration into the educational process in the context of mathematics instruction. The theoretical study analyzed and systematized the results of scientific and methodological research on educational scaffolding, complemented by a summary of pedagogical experience using this technology in mathematics instruction. The empirical phase of the study, which included a survey of mathematics teachers, revealed the specific perceptions of scaffolding among practicing teachers, as well as the methodological and organizational difficulties associated with their lack of preparedness for the practical use of scaffold support in the educational process. The findings and recommendations presented can be used to improve the effectiveness of pedagogical support methods for students and to develop teacher professional development programs.

Keywords: scaffolding technology, pedagogical support, developing student independence, improving learning effectiveness, teaching mathematics.

Основные положения

Скаффолдинг интерпретируется в рамках конструктивистской парадигмы, подчеркивая совместное конструирование знаний посредством управляемого взаимодействия учителя и ученика.

Технология скаффолдинга обладает значительным потенциалом для повышения эффективности обучения математике, способствуя метакогнитивному росту учащихся и развитию их самостоятельности в обучении.

Успешность её внедрения зависит от методической готовности учителя, его умения разрабатывать уроки на основе скаффолдинга и понимания динамических и дифференцированных механизмов поддержки.

В преподавании математики скаффолдинг помогает управлять переходом от конкретных рассуждений к абстрактной формализации, способствуя системному пониманию и рефлексивному мышлению.

Введение

Современные школьники нередко испытывают затруднения при переходе от пассивного восприятия информации к активной познавательной деятельности. В условиях информатизации и обилия цифровых источников информации, обращение к которым не вызывает трудностей, школьники всё чаще демонстрируют зависимость от внешней помощи и недостаточную учебную самостоятельность. В то же время реализация задач, которые государство и общество сегодня ставят перед школьным образованием, требует от учителя не только передачи предметных знаний, но и формирования познавательной самостоятельности обучающихся, которая в свою очередь базируется на предметных и метапредметных учебных умениях. Поиск подходов к развитию учебной самостоятельности школьников обратил внимание на технологию скаффолдинга. Данная технология характеризуется в научно-методической литературе [1, 2] как средство поэтапной помощи, направленной на постепенное развитие самостоятельности ученика и как инструмент поддержки обучающихся в зоне их ближайшего развития.

Термин «скаффолдинг» (scaffolding (англ.) – строительные леса, подмостки), относящейся к области когнитивной психологии, применительно к сфере обучения был впервые введён в 1976 году в работе Дж. Вуда и его соавторов [3]. Описывая процесс поддержки обучающемуся со стороны наставника при решении когнитивной задачи, исследователи провели аналогию со строительными лесами, обратив внимание на такие их общие свойства как: целенаправленность – использование для конкретной цели; структурированность – наличие структуры, в которой просматриваются отдельные элементы, связанные между собой; адаптивность – ориентированность на запросы конкретного пользователя (учащегося); временный характер – интенсивность поддержки постепенно снижается вплоть до полного исчезновения, когда учащиеся становятся более компетентными. Таким образом, скаффолдинг – это структурированная целенаправленная помощь обучающемуся со стороны более опытного наставника (учителя), обеспечивающая продвижение учащегося в готовности решать когнитивные задачи. Зародившийся в процессе изучения образовательных практик термин «скаффолдинг», получил широкое распространение в теоретических исследованиях по дидактическому проектированию и вернулся в практику обучения как педагогический подход.

Подавляющее большинство исследователей проблемы скаффолдинга отмечают, что эта технология теоретически напрямую связана с теорией Л.С. Выготского [4], которая подробно описывает взаимосвязь между обучением и развитием. Ключевой конструкт его теории «зона ближайшего развития» объясняет значение скаффолдинга в обучении: именно поддержка обучающегося со стороны учителя и/или сверстников позволяет ему реализовывать познавательную деятельность в зоне не актуального, а ближайшего развития, чего не могло бы случиться в случае отсутствии такой поддержки. А следовательно, методически грамотно спроектированный и внедренный в учебный процесс скаффолдинг – это прямой путь к развитию учащихся.

Анализ литературы [1, 2, 5, 6 и др.] позволяет выделить наиболее значимые требования технологии скаффолдинга, которые необходимо учитывать учителю при ее использовании в образовательном процессе:

– нацеленность на формирование когнитивной самостоятельности: главная задача поддержки не просто помощь учащемуся в выполнении задания, а обучение его стратегиям и инструментам, с помощью которых в будущем он сможет справляться с задачами без внешней помощи;

– планомерность и продуманная организация: методы и инструменты поддержки продумываются заранее, при планировании образовательного процесса, поддержка должна носить не разовый или эпизодический, а системный характер, органично и методически грамотно интегрирована в структуру урока или курса;

– индивидуализация: вид поддержки и временной период ее использования должен быть адаптирован под конкретного обучающегося, его уровень знаний, темп обучения, тип восприятия информации и мотивацию;

– разнообразие форм поддержки, которая может быть представлена визуальными подсказками (рисунками, таблицами, схемами, чек-листами), пошаговыми инструкциями, примерами, шаблонами и образцами выполнения заданий, которые могут быть выполнены на бумажном носителе или с использованием цифровых инструментов, а также устными комментариями и направляющими вопросами учителя.

В последнее десятилетие наблюдается заметный рост эмпирических исследований, направленных на оценку эффективности технологии скаффолдинга в различных образовательных контекстах. Метаанализы показывают, что использование педагогической поддержки оказывает статистически значимое влияние на результаты обучения, особенно в условиях онлайн- и смешанного обучения. Так, Б. Р. Белланд и его соавторы [6] обнаружили эффективность компьютерного скаффолдинга в STEM-дисциплинах, а в более поздней работе [7] подтвердилось наличие положительных результатов при разнообразии форм и методов

поддержки. При этом нельзя не согласиться с исследователями, когда они утверждают, что особое значение имеет метакогнитивный скаффолдинг, направленный на развитие навыков саморегуляции.

Важным направлением в исследованиях последних лет является разработка адаптивных алгоритмов автоматической редукции подсказок (fading), благодаря которым можно регулировать уровень поддержки в реальном времени. Исследования А. Мунши с соавторами [8] продемонстрировали, что использование цифровых инструментов, динамически изменяющих количество и детализацию подсказок на основе отслеживания действий учащегося, способствует развитию их самостоятельности и более глубокому усвоению материала. Эксперименты по сравнению различных стратегий fading демонстрируют, что постепенное снятие поддержки позволяет достичь лучших долгосрочных результатов, тогда как слишком ранняя редукция приводит к снижению эффективности обучения [5, 9].

Эмпирические данные [10] свидетельствуют о том, что при использовании технологии скаффолинга в учебном процессе существенное значение имеет предметный контекст. Так, например, в обучении математике скаффолдинг особенно продуктивен на начальных этапах освоения сложных алгоритмов. При этом авторы [11] подчеркивают, что именно в математике важно не просто давать подсказки, а вести диалог, направлять рассуждения учащихся, адаптировать вопросы и задания к уровню их актуальных знаний и возможностей и при этом быть нацеленными на их развитие. В то же время в отечественном сегменте исследований обсуждаемой проблемы приоритет отдается отдельным работам, посвященным рассмотрению общих вопросов внедрения скаффолдинга для облегчения обучения и понимания [1] реализации идей скаффолдинга в обучении иностранным языкам [12–14], в том числе и в контексте CLIL, когда языковые практики интегрируются с другими предметными областями [15, 16]. При этом незаполненной нишей остается область исследований особенностей использования скаффолдинга при обучении естественным наукам и математике, что препятствует целостному представлению о возможностях данной технологии.

Цель статьи заключается в исследовании дидактических возможностей технологии скаффолдинга и условий ее эффективной интеграции в учебный процесс в контексте обучения математике.

Методология исследования

Методологическую основу исследования составляет системно-деятельностный подход, обеспечивающий целостное рассмотрение технологии скаффолдинга в контексте современной педагогической практики. В работе применены теоретические и эмпирические методы исследования. На теоретическом этапе осуществлялся анализ и обобщение отечественных и зарубежных научных источников по проблеме скаффолдинга с целью выявления ключевых концепций и тенденций развития технологии. Эмпирическая часть исследования включала анкетирование учителей математики, направленное на изучение их понимания, отношения и опыта использования скаффолдинга в образовательном процессе. В анкетировании приняли участие 84 школьных педагога. Для обработки результатов применялись методы количественного и качественного анализа, в том числе графическая интерпретация данных. В исследовании также использовались методы систематизации эффективных педагогических практик и конструирования образовательного процесса, что позволило разработать рекомендации по внедрению элементов скаффолдинга в преподавание математики.

Результаты исследования

Анкетирование учителей математики проводилось с использованием мессенджеров. Респондентам была разъяснена цель опроса. В опросе приняли участие 84 учителя математики: 48 – представители сельских школ, 36 – представители школ города. Представим анализ результатов ответов на ряд вопросов анкеты, которые отражают отношение учителей к

рассматриваемой технологии и особенности её применения в школьной практике обучения математике.

При ответе на вопрос «Знакомы ли вы с технологией скаффолдинга?» ни один из школьных педагогов не выбрал ответ, свидетельствующий о полном отсутствии хотя бы поверхностного знакомства с технологией (рис. 1). При этом только чуть более 14 % респондентов считают, что они глубоко знакомы с этой технологией. Большинство опрашиваемых (76,19%) знакомы с основными приемами скаффолдинга, которые и применяют в обучении.

Рисунок 1. Результаты ответов учителей на вопрос «Знакомы ли вы с технологией скаффолдинга?»

Как показывает анализ ответов на следующий вопрос (рис.2), большинство учителей математики относят к приемам скаффолдинга пошаговое объяснение алгоритма, использование визуальных схем и опор, наводящие вопросы и подсказки, а, например, такой важный прием, определяющий постепенное развитие учебной самостоятельности, как постепенное снятие помощи относят к технологии скаффолдинга только около 6 % педагогов.

Рисунок 2. Результаты ответов учителей на вопрос «Какие из перечисленных приёмов (можно выбрать несколько) вы относите к скаффолдингу?»

Выражая мнение о наиболее эффективных методах скаффолдинга респонденты отметили прежде всего индивидуальные подсказки и использование наглядных схем и карточек (рис. 3). Каждую из этих форм поддержки отметили около трети педагогов. Остальные формы скаффолдинга учителя-математики считают менее эффективными. Такое распределение ответов на данный вопрос, скорее всего, обясняется не различиями в эффективности самих форм скаффолдинга, а готовность учителя к их реализациии и частотой их использования.

Рисунок 3. Результаты выбора учителями наиболее эффективных форм скаффолдинга

На рисунке 4 представлены данные о степени согласия респондентов с высказываниями о технологии скаффолдинга. Большинство учителей согласны с утверждениями о том, что данная технология полезна при обучении решению задач повышенной сложности и помогает повысить понимание учащимися математики. Кроме того, у большинства педагогов сложилось мнение, с которым нельзя не согласиться, о том, что скаффолдинг требует от учителя дополнительных усилий и времени. позволяют предположить, что учителя математики в целом недостаточно освоили методику проектирования и применения средств скаффолдинга в образовательном процессе.

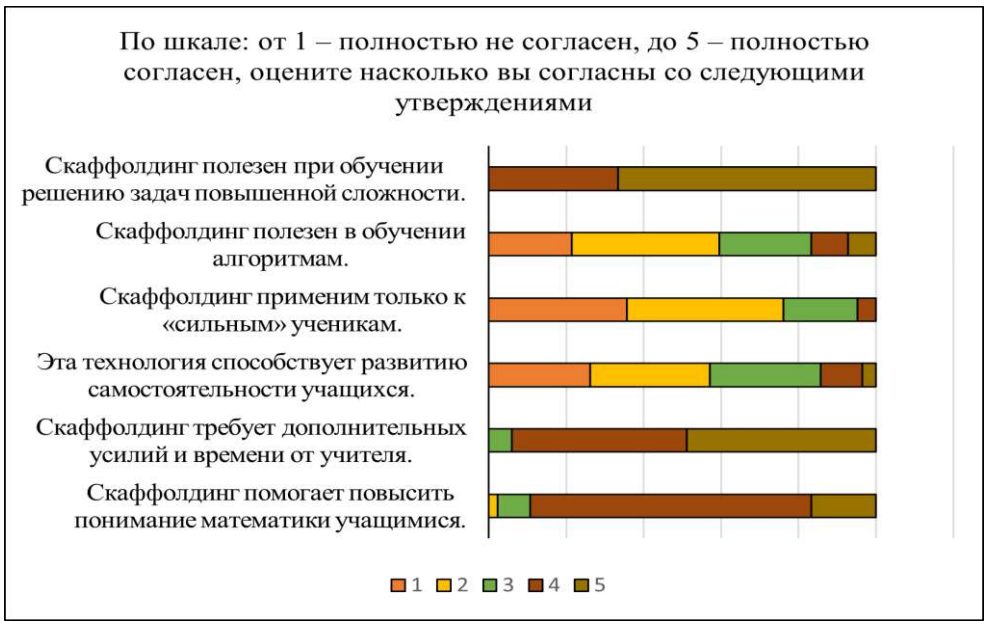


Рисунок 4. Результаты согласия учителей с высказываниями о технологии скаффолдинга

Примечательным является тот факт, что значительная часть респондентов выразила неуверенность в том, что использование технологии способствует развитию самостоятельности обучающихся. Полученные данные Отвечая на открытый вопрос о трудностях, которые испытывают педагоги при разработке средств скаффолдинга и использовании их на уроках математики, респонденты прежде всего отметили сложность проектирования поддержки, отсутствие готовых методических разработок по реализацию скаффолдинга в обучении математике и разный уровень обученности школьников и, как следствие, необходимость разрабатывать и одновременно реализовывать различные форматы поддержки.

Пищу для размышления о готовности учителей математики к использованию в образовательной практике приемов скаффолдинга дают и имеющиеся в большом количестве в сети их методических разработок и статей. Анализ этих публикаций дает основание утверждать, что, например, используемые педагогами наводящие вопросы в процессе поиска решения задач преимущественно носят характер прямых подсказок, направленных на получение конкретного ответа или осуществления конкретного шага решения задачи. Такая форма организации деятельности снижает продуктивную активность учащихся и ограничивает развитие их познавательной самостоятельности. В результате вопросы не выполняют функцию когнитивного скаффолдинга, то есть не способствуют постепенному продвижению обучающихся в зоне ближайшего развития. Эта же проблема была отмечена нами и при взаимодействии с педагогами в процессе работы педагогических мастерских [17].

Таким образом, результаты анкетирования и анализа работы практикующих учителей свидетельствуют, с одной стороны, об их интересе к технологии скаффолдинга, а с другой стороны, подтверждают необходимость повышения методической компетентности учителей математики, да и педагогов в целом, в области разработки и практической реализации scaffold-поддержки обучающихся. В связи с этим представляется целесообразным предложить ряд *методических рекомендаций*, направленных на эффективное внедрение scaffold-приемов в преподавание математики, которые разработаны на основе анализа научных источников, обобщения успешного педагогического опыта и собственного практического опыта авторов:

– необходимо заранее продумывать возможные затруднения учащихся, которые могут возникнуть при освоении предметного содержания или решения задачи, планировать конкретные формы и приемы поддержки для их преодоления;

– учителю необходимо помнить, что учащимся может потребоваться поддержка при выполнении любого вида познавательной деятельности

– важно задавать вопросы, не подсказывающие, что конкретно нужно сделать, чтобы решить задачу, а направляющие мышление учащихся, не заменяющие их мыслительную деятельность, а стимулирующие ее;

– полезно также использовать вопросы на осознание затруднений учащихся в ходе познавательной деятельности и их причин;

– способы и степень поддержки (вопросы, подсказки, уточнения) необходимо менять в зависимости от сложности задания, этапа решения и по мере освоения обучающимися предметного содержания;

– желательно использовать в обучении кейсы, построенные на самых распространенных ошибках учащихся при решении задач конкретного типа;

– организуя работу в группах, следует выстраивать степень и характер поддержки с учетом индивидуальных характеристик школьников, входящих в конкретную группу;

– полезно использовать вспомогательные задачи перед решением сложных задач;

– при необходимости нужно приводить в качестве опоры образец решения конкретного типа задач и организовывать специальную работу школьников для обеспечения понимания ими отдельных шагов решения;

– важно обучать учащихся приемам разбиения задачи (предметной или познавательной) на подзадачи;

– необходимо использовать средства когнитивной визуализации, соответствующие особенностям восприятия обучающихся;

– следует чаще использовать когнитивные диалоги, которые помогут школьникам не только решить конкретную предметную или познавательную задачу, но и станут образцом того, как нужно рассуждать, какие вопросы задавать самому себе при решении задач;

– важно обращаться к уже имеющемуся у обучающихся учебному опыту, в котором уже имеется основа для выполнения познавательной задачи;

– при организации взаимодействия учащихся между собой нужно варьировать роли «осуществляющий поддержку» и «принимающий поддержку»;

– очень важно обучать школьников словесно выражать свое непонимание и объяснять свои затруднения, это позволит своевременно обратиться к scaffold-приемам и более индивидуально их адресовать.

Проиллюстрируем реализацию на уроках математики некоторых из приведенных рекомендаций по scaffold-поддержки обучающихся на конкретных примерах. Первый пример демонстрирует использования вопросов при работе с нестандартной задачей.

Пример 1. Школьникам предлагается следующая задача: как разделить отрезок пополам, если построение можно выполнять только в одной полуплоскости относительно прямой, содержащей данный отрезок? Организация процесса решения задачи через систему вопросов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Организация процесса решения задачи на основе направляющих вопросов

№	*Направляющие вопросы учителя*	*Мыслительная деятельность школьников*	*Требуемый ответ*
1	*Вспомните известное вам решение задачи на деление отрезка пополам: к построению какой фигуры сводится решение этой задачи?*	*Обращаются к имеющемуся опыту решения известной задачи, устанавливают, что точка являющаяся серединой отрезка – это точка пересечения данного отрезка с серединным перпендикуляром к нему.*	*К построению серединного перпендикуляра к данному отрезку.*
2	*Какое свойство серединного перпендикуляра к отрезку вы знаете?* *Если школьники будут затрудняться в ответе, полезно привести чертеж отрезка и серединного перпендикуляра к нему, рассмотреть несколько точек на серединном перпендикуляре и попросить школьников сравнить расстояние от каждой из этих точек до концов отрезка.*	*Соотносят свои знания с геометрической конструкцией, построенной при решении задачи на деление отрезка пополам.*	*Серединный перпендикуляр к отрезку является прямой, все точки которой равноудалены от концов отрезка.*
3	*Как можно задать любую прямую?* *В случае затруднения школьников предложить дополнительный*	*Вспоминают ранее изученный материал.*	*Любую прямую можно задать двумя точками.*

	вопрос: какую аксиому о прямой вы знаете?		
4	*Сколько и каких точек нужно построить, чтобы провести через них серединный перпендикуляр к данному отрезку? Изобразите набросок, конструкции, которая должна получиться.*	*Соотносят ответы на два предыдущих вопроса, делают вывод.*	*Нужно построить две различные точки, каждая из которых находится на равном расстоянии от двух концов отрезка.*
5	*Поясните, как построить точку, которая находится на равном расстоянии от двух концов отрезка.*	*Повторение ранее изученного материала.*	*Нужно с помощью циркуля построить дуги окружности с центрами в концах отрезка и с равными радиусами большими половины длины отрезка. Точка пересечения этих дуг – искомая.*
6	*Точки пересечения окружностей в стандартной задаче деления отрезка пополам лежат в разных полуплоскостях относительно прямой, содержащей отрезок. Как построить две точки, принадлежащие одной полуплоскости, равноудаленные от концов отрезка?*	*Применение имеющегося опыта решения стандартной задачи в новой ситуации.*	*Можно построить две пары равных окружностей с центрами в концах отрезка, чтобы радиусы одной пары окружностей не были равны радиусам другой пары окружностей*

Решение этой нестандартной задачи строится не просто на знании того, как решается обычная стандартная задача на деление отрезка пополам (геометрия, 7 класс), но, прежде всего, на глубоком осмыслении свойств понятий «середина отрезка» и «серединный перпендикуляр к отрезку», а также на метапредметном умении переносить известные способы решения на новые задачные ситуации. Поэтому scaffold-поддержка должна быть направлена не только на работу с предметным материалом, но и на формирование указанного метапредметного умения. Подобный прием реализации скаффолдинга эффективен не только при решении задач в рамках коллективной работы со всем классом, но и при организации самостоятельной работы школьников групповой или индивидуальной. В таком случае учителю необходимо подготовить специальное дидактическое обеспечение, например, карточки с набором вопросов, отвечая на которые обучающие смогут обнаружить верную идею решения задачи. При этом, количество вопросов и их характер может варьироваться в зависимости от способностей школьников, их обученности характеристик восприятия.

Приведем пример дифференцированной поддержки групповой работы в рамках мини-исследования.

Пример 2. В ходе исследовательской работы школьникам необходимо обнаружить свойство корней квадратного уравнения, если сумма его коэффициентов равна 0. При этом для выполнения работы школьников разделили на группы: А – учащиеся, слабо успевающие по математике; В – учащиеся, имеющие средние способности к математике; С – учащиеся, способные к математике.

Предлагаемые карточки обеспечивают направленность мышления и структуру деятельности учащихся. Так в карточке для группы А, не только поэтапно описан алгоритм деятельности учащихся, но и предложен способ визуализации данных в форме таблицы, что облегчит школьникам поиск закономерностей. В карточке для группы В имеется только рекомендация того, в какой форме лучше фиксировать результаты. Структура утверждения,

которое должно стать итоговым результатом исследования в разной степени подробности имеется в карточках для групп А и В, а учащиеся группы С вывод должны будут делать самостоятельно. Также в карточках учтено, что обучающиеся из группы А, как правило, на выполнение заданий тратят больше времени, поэтому в их карточке отсутствует задание, касающееся получения обратного утверждения. При этом для группы С сложность заданий увеличена требованием доказать полученную теорему. Варьирование когнитивной сложности задачи, когда для получения одного и того же конкретного предметного знания разным группам учащихся необходимо выполнить задачи разного уровня сложности также само по себе можно считать формой скаффолдинга. Примеры scaffold-карточек представлены ниже.

Карточка для группы А

Задание. Найдите корни уравнений и заполните таблицу:

Уравнение	*a*	*b*	*c*	*a+b+c*	Корни уравнения
1) $x^2+5x-6=0$					
2) $x^2-14x+13=0$					
3) $4x^2-3x-1=0$					

1. Каким свойством обладает сумма коэффициентов во всех этих уравнениях?
2. Какой закономерностью обладают корни каждого из этих уравнений?
3. Попробуйте сделать вывод, запишите его, вставив пропущенные слова в следующее утверждение: если сумма коэффициентов квадратного уравнения _____, то один корень уравнения _____, а второй корень уравнения _____.
4. Используя данный вывод, найдите корни уравнений: а) $x^2+8x-9=0$; б) $2x^2-9x+7=0$

Карточка для группы В

Задание. Найдите корни уравнений: а) $x^2+5x-6=0$; б) $x^2-14x+13=0$; в) $4x^2-3x-1=0$.

1. Каким общим свойством обладают корни этих уравнений?
2. Очевидно, что свойство корней уравнений определяется особенностью их коэффициентов. Выпишите коэффициенты и установите зависимость между ними. Для более удобного анализа целесообразно результаты оформить в виде таблицы.
4. Какую закономерность вы заметили?
5. Сформулируйте вывод в виде теоремы в форме: если _____ квадратного уравнения _____, то один корень уравнения _____, а второй корень уравнения _____.
5. 6. Используя полученный вывод, найдите корни уравнений: а) $x^2+8x-9=0$; б) $2x^2-9x+7=0$.
7. Сформулируйте обратное утверждение: если один корень уравнения _____, а второй корень уравнения _____, то _____ квадратного уравнения _____.
8. Попробуйте проверить обратное утверждение, составив квадратное уравнение с корнями, обладающими заданным свойством.

Карточка для группы С

Задание. Найдите корни уравнений: а) $x^2+5x-6=0$; б) $x^2-14x+13=0$; в) $4x^2-3x-1=0$.

1. Каким общим свойством обладают корни этих уравнений?
2. Чем, по вашему мнению, обуславливаются свойства корней различных квадратных уравнений?
4. Какая общая особенность характерна для коэффициентов этих уравнений?
5. Сформулируйте вывод в виде теоремы (если…, то…) и докажите ее.
6. 6. Используя полученную теорему, найдите корни уравнений: а) $x^2+8x-9=0$; б) $2x^2-9x+7=0$.
7. Верно ли обратное утверждение? Сформулируйте и проверьте его истинность.

Заметим, что в реальной практике учебного процесса в каждом классе могут быть и школьники, которые по уровню обученности и способностям к математической деятельности могут занимать промежуточное положение: между А и В или между В и С. В таком случае, учитель, объединяя в группы таких школьников для подобной работы, должен позаботиться о разработке, которые также будут промежуточными вариантами между карточками групп А и В или В и С.

Подобные наборы направляющих вопросов и дидактические карточки, как и другие средства и формы скаффолдинга, по своей сути, представляют собой когнитивное структурирование процесса обучения, который влечет за собой и развития учащихся, поскольку обеспечивает не только ориентировочную структуру познавательной деятельности, но и структуру путей мышления.

Наблюдение за мимикой, жестами, эмоциями и в целом за работой обучающихся без использования приемов скаффолдинга свидетельствует о том, что элементы понимания проявляются у учащихся как эклектичный набор действия, пока, наконец, не будут установлены нужные связи между имеющимся опытом обучающегося и требованием познавательной задачи. При предъявлении им наводящих вопросов, при использовании ими scaffold-карточек или других средств поддержки такие связи образуются быстрее. Тогда задачей учителя становится постепенное прекращение поддержки с целью формирования у школьников познавательной самостоятельности, а также обеспечения освоения ими приемов самоподдержки.

Фиксация способов и приемов мыслительной деятельности в собственном опыте обучающихся как раз и является условием их интеллектуального развития. Для лучшего закрепления школьниками метапредметных умений, интеллектуальных навыков и общих подходов к решению поставленной задачи учитель может использовать рефлексивные вопросы, например, такие: Какой из этапов работы был для тебя самым трудным и почему? В чем заключалась главная трудность? Что помешало тебе сразу увидеть путь решения задачи? Какие данные в условии задания (задачи) подсказывают тебе способ для его выполнения (решения)? Как тебе помогли вопросы (рекомендации, указания, подсказки) учителя? Смог бы ты сам следующий раз формулировать для себя направляющие вопросы? Можно ли сформулировать обобщенный алгоритм той деятельности, которую ты выполнял сегодня?

Дискуссия

Полученные результаты подтверждают, что технология скаффолдинга обладает значительным потенциалом в направлении повышения эффективности обучения математике. Однако успешность её применения во многом определяется готовностью педагога проектировать и реализовывать методические и организационные условия, отвечающие требованиям данной технологии. При этом анализ проведенного анкетирования показал, что

большинство учителей осознают важность поэтапной поддержки учащихся, но не всегда имеют чёткое представление о формах и механизмах реализации скаффолдинга на уроках. Это свидетельствует о необходимости целенаправленного формирования педагогической готовности к использованию данной технологии.

Представленные примеры scaffold-поддержки демонстрируют, что внедрение скаффолдинга должно преследовать кроме сиюминутной цели решения конкретной метакогнитивных умений, повышает уровень самостоятельности при решении учебных задач и стимулирует рефлексию собственных способов мышления. При этом особенно эффективно использование дифференцированной поддержки, учитывающей личностные особенности школьников, а также динамического скаффолдинга, предполагающего постепенное снятие внешних опор по мере формирования у учащихся устойчивых учебных действий. Кроме того, учителю необходимо помнить, что поддержка обучающимся может потребоваться в любой момент его познавательной деятельности, даже в процессе чтения ими материала учебника [18].

Сравнение полученных данных с результатами ранее проведённых исследований позволяет заключить, что эффективность скаффолдинга возрастает при условии его интеграции в целостную методическую систему урока, где внешняя помощь согласуется с когнитивной сложностью учебных заданий. В этом контексте важным является не только сам факт использования приёмов поддержки, но и своевременность их предоставления, вариативность и ориентация на индивидуальные особенности учащихся. При этом, поскольку в существующих научно-методических источниках обнаруживается разброс позиций и мнений, того каким образом может быть обеспечена в учебном процессе эффективность приемом скаффолдинга, методические рекомендации, представленные в статье, обобщают, развивают и конкретизируют идеи и условия, необходимые для продуктивной scaffold-поддержки.

Обобщение результатов теоретического и эмпирического исследования приводит к мысли, что скаффолдинг следует рассматривать технологией отвечающей контексту конструктивистской парадигмы, согласно которой знания не передаются, а совместно конструируются посредством направленного взаимодействия учителя и ученика. То есть целью scaffold-поддержки является регулирование когнитивных и метакогнитивных процессов, обеспечивающих усвоения внешних структур мышления, для постепенного их превращения в часть интеллектуальной сферы личности. В этом смысле учитель выступает не только как источник временной поддержки, но и как конструктор зоны ближайшего развития учащихся, способный преобразовывать неявные формы руководства в инструменты саморегуляции.

В математическом образовании это методологическое направление особенно актуально, поскольку математическое мышление предполагает сложные переходы от конкретных рассуждений к абстрактной формализации. Скаффолдинг, позволяя структурировать процесс обучения как последовательность постепенно исчезающих опор, формирует системное представление школьников о математических фактах и способах их осмысления. С методологической точки зрения этот подход подчёркивает важность диагностики текущего уровня понимания учащегося и разработки такой траектории поддержки, которая в конечном счете приведет к познавательной самостоятельности. Следовательно, интеграцию скаффолдинга в обучение математике следует рассматривать не просто как набор методик, а как методологическую основу для организации развивающего обучения.

Заключение

Таким образом, исследование, подтверждая, что технология скаффолдинга является действенным инструментом дифференциации и персонализации обучения математике, нацеливает на дальнейшее ее развитие, углубление научно-методических оснований, разработку диагностических инструментов для оценки уровня сформированности учебной

самостоятельности учащихся и создания программ повышения квалификации учителей, направленных на овладение практикой проектирования scaffold-поддержки.

Полученные результаты имеют методологическое значение для проектирования развивающей образовательной среды и практическое для совершенствования программ повышения квалификации учителей, направленных на формирование готовности к использованию scaffold-поддержки в учебном процессе. Предложенные в статье методические рекомендации представляют собой обобщение требований для повышения эффективности способов педагогической поддержки учащихся в процессе познавательной деятельности в целом, и в обучении математике в частности.

Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке диагностических средств для оценки уровня сформированности учебной самостоятельности учащихся и в создании моделей цифрового скаффолдинга, интегрируемых в современные цифровые образовательные платформы.

Список использованных источников

[1] Чернявская О.М., Колесникова А.М., Колесников Б.С., Применение технологии педагогической поддержки «скаффолдинг» в процессе обучения школьников.// Вестник КазНПУ имени Абая. Серия: Педагогические науки. – 2023. – Т. 76(4). – С. 216–227. https://doi.org/10.51889/7478.2022.41.60.022.

[2] Курьян М.Л., Воронина Е.А. Применение технологии педагогической поддержки ("скаффолдинг") при обучении студентов эффективной обратной связи // Вестник Томского государственного университета. – 2020. – № 461. – С. 183–191. https://doi.org/10.17223/15617793/461/22

[3] Wood D., Bruner, J. S., Ross G. The role of tutoring in problem solving // Journal of Child Psychology and Psychiatry. – 1976. – vol. 17(2). – P.89–100.

[4] Выготский Л.С. Психология развития человека. – М.: Изд-во Смысл; Изд-во Эксмо, 2005.1136 с.

[5] Zuo M., Kong S., M, Y., Hu Y., Xiao M. The effects of using scaffolding in online learning: A meta-analysis. // Education Sciences. – 2023. – vol. 13(7). – P. 1–12. https://doi.org/10.3390/educsci13070705

[6] Belland B. R., Walker A. E., Kim N. J., Lefler M. Synthesizing results from empirical research on computer-based scaffolding in STEM education: A meta-analysis // Review of Educational Research. – 2017. – vol. 87(2). – P. 309–344. https://doi.org/10.3102/0034654316670999

[7] Chen D., Zhang, Y., Luo, H. et al. Effects of group awareness support in CSCL on students' learning performance: A three-level meta-analysis // International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning. – 2024. – vol. 19. – P. 97–129. https://doi.org/10.1007/s11412-024-09418-3

[8] Munshi A., Biswas G., Baker R., Ocumpaugh,J., Hutt S., Paquette L. Analyzing adaptive scaffolds that help students develop self-regulated learning behaviors // Journal of Computer Assisted Learning. – 2022. – vol. 39(2). – P. 351–368. https://doi.org/10.1111/jcal.12761

[9] Han Y., Luo T., Yang X., Jiang L. (2021). Fading scaffolds for better online learning? A comparative analysis of three scaffolding practices. In D. Ifenthaler & D. K. Mah (Eds.), Digital learning in higher education: Emerging approaches and technologies. – Springer, 2021. – P. 123–138. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71778-0_8

[10] Van de Pol J., Volman M., Beishuizen J. Scaffolding in teacher–student interaction: A decade of research // Educational Psychology Review. –2010. – vol. 22(3), – P. 271–296. https://doi.org/10.1007/s10648-010-9127-6

[11] Bakker A., Smit J., Wegeri, R. Scaffolding and dialogic teaching in mathematics education: introduction and review // ZDM Mathematics Education. – 2015. – vol. 47. – P. 1047–1065. https://doi.org/10.1007/s11858-015-0738-8

[12] Rizakhojayeva G.A. Saipullayeva M.A., Shalabayeva L., Alzhanova A.O. The impact of scaffolding approach on advancing communication skills // BULLETIN of Ablai Khan KazUIRandWL Series «Pedagogical sciences». – 2025. – No 1(76). – . 181 – 194

[13] Seitova M., Makkambayeva F. English learners' attitudes towards developing reading strategies through scaffolding // Journal of Educational Sciences. – 2023. – No 75(2). – P. 108–116. https://doi.org/10.26577/JES.2023.v75.i2.010,

[14] Tastemir M., Seidaliyeva G.O. Improving reading strategies for english language learners using scaffolding: a pedagogical approach // Bulletin of Abai KazNPU. Series of Philological Sciences. – 2025. – No 92(2). – P. 138–145.https://doi.org/10.51889/2959-5657.2025.92.2.014

[15] Ибрагимова Э. Пәндік-тілді кіріктіре оқыту технологиясында скаффолдинг әдісін іске асыру арқылы биология сабағын ұйымдастыру // Scientific Journal of Pedagogy and Economics. – 2023. – Т. 404(4). – С. 143–157. https://doi.org/10.32014/2023.2518-1467.541

[16] Какимова М.Е., Сабиева Е.В., Енсегенова Г.Ж. Роль методической поддержки (скаффолдинга) в предметно-языковом обучении: визуализация обучения через системно-функциональный мультимодальный подход // Вестник Казахского национального женского педагогического университета. – 2021. – № 1(85). – С. 136–145: https://doi.org/10.52512/2306-5079-2021-85-1-136-145

[17] Шмигирилова И.Б., Рванова А.С., Таджигитов А.А.Педагогическая мастерская как форма развития оценочной компетентности учителя математики // Современные проблемы науки и образования. – 2020. – № 6. – С. 87–96.

[18] Шмигирилова И.Б., Дарбаева Д.К. Формирование у школьников умений работать с математическим текстом // Современные тенденции естественно-математического образования: школа – вуз. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Соликамск, 2022. – С. 16–20.

References

[1] Chernyavskaya O.M., Kolesnikova A.M., Kolesnikov B.S., Primeneniye tekhnologii pedagogicheskoy podderzhki «skaffolding» v protsesse obucheniya shkol'nikov. Vestnik KazNPU imeni Abaya. Seriya: Pedagogicheskiye nauki. 2023. T. 76(4). S. 216–227. https://doi.org/10.51889/7478.2022.41.60.022.

[2] Kur'yan M.L., Voronina Ye.A. Primeneniye tekhnologii pedagogicheskoy podderzhki ("skaffolding") pri obuchenii studentov effektivnoy obratnoy svyazi. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2020. № 461. S. 183–191. https://doi.org/10.17223/15617793/461/22

[3] Wood D., Bruner, J. S., Ross G. The role of tutoring in problem solving. Journal of Child Psychology and Psychiatry. 1976. vol. 17(2). P.89–100.

[4] Vygotskiy L.S. Psikhologiya razvitiya cheloveka. M.: Izd-vo Smysl; Izd-vo Eksmo, 2005. 1136 s.

[5] Zuo M., Kong S., M, Y., Hu Y., Xiao M. The effects of using scaffolding in online learning: A meta-analysis. // Education Sciences. 2023. vol. 13(7). P. 1–12. https://doi.org/10.3390/educsci13070705

[6] Belland B. R., Walker A. E., Kim N. J., Lefler M. Synthesizing results from empirical research on computer-based scaffolding in STEM education: A meta-analysis. Review of Educational Research. 2017. vol. 87(2). P. 309–344. https://doi.org/10.3102/0034654316670999

[7] Chen D., Zhang, Y., Luo, H. et al. Effects of group awareness support in CSCL on students' learning performance: A three-level meta-analysis./ International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning. 2024. vol. 19. P. 97–129. https://doi.org/10.1007/s11412-024-09418-3

[8] Munshi A., Biswas G., Baker R., Ocumpaugh,J., Hutt S., Paquette L. Analyzing adaptive scaffolds that help students develop self-regulated learning behaviors. Journal of Computer Assisted Learning. 2022. vol. 39(2). P. 351–368. https://doi.org/10.1111/jcal.12761

[9] Han Y., Luo T., Yang X., Jiang L. (2021). Fading scaffolds for better online learning? A comparative analysis of three scaffolding practices. In D. Ifenthaler & D. K. Mah (Eds.), Digital learning in higher education: Emerging approaches and technologies. Springer, 2021. P. 123–138. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71778-0_8

[10] Van de Pol J., Volman M., Beishuizen J. Scaffolding in teacher–student interaction: A decade of research. Educational Psychology Review. 2010. vol. 22(3), P. 271–296. https://doi.org/10.1007/s10648-010-9127-6

[11] Bakker A., Smit J., Wegeri, R. Scaffolding and dialogic teaching in mathematics education: introduction and review. ZDM Mathematics Education. 2015. vol. 47. P. 1047–1065. https://doi.org/10.1007/s11858-015-0738-8

[12] Rizakhojayeva G.A. Saipullayeva M.A., Shalabayeva L., Alzhanova A.O. The impact of scaffolding approach on advancing communication skills. BULLETIN of Ablai Khan KazUIRandWL Series «Pedagogical sciences». 2025. No 1(76). P. 181 – 194

[13] Seitova M., Makkambayeva F. English learners' attitudes towards developing reading strategies through scaffolding. Journal of Educational Sciences. 2023. No 75(2). P. 108–116. https://doi.org/10.26577/JES.2023.v75.i2.010,

[14] Tastemir M., Seidaliyeva G.O. Improving reading strategies for english language learners using scaffolding: a pedagogical approach. Bulletin of Abai KazNPU. Series of Philological Sciences. 2025. No 92(2). P. 138–145.https://doi.org/10.51889/2959-5657.2025.92.2.014

[15] Ïbragïmova É. Pändik-tildi kiriktire oqıtw texnologïyasında skaffoldïng ädisin iske asırw arqılı bïologïya sabağın uyımdastırw. Scientific Journal of Pedagogy and Economics. 2023. T. 404(4). S. 143–157. https://doi.org/10.32014/2023.2518-1467.541

[16] Kakimova M.Ye., Sabiyeva Ye.V., Yensegenova G.ZH. Rol' metodicheskoy podderzhki (skaffoldinga) v predmetno-yazykovom obuchenii: vizualizatsiya obucheniya cherez sistemno-funktsional'nyy mul'timodal'nyy podkhod. Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo zhenskogo pedagogicheskogo universiteta. 2021. № 1(85). S. 136–145: https://doi.org/10.52512/2306-5079-2021-85-1-136-145

[17] Shmigirilova I.B., Rvanova A.S., Tadzhigitov A.A. Pedagogicheskaya masterskaya kak forma razvitiya otsenochnoy kompetentnosti uchitelya matematiki. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2020. № 6. S. 87–96.

[18] Shmigirilova I.B., Darbayeva D.K. Formirovaniye u shkol'nikov umeniy rabotat' s matematicheskim tekstom. Sovremennyye tendentsii yestestvenno-matematicheskogo obrazovaniya: shkola – vuz. Materialy XI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Solikamsk, 2022. S. 16–20.

ИНФОРМАТИКА

COMPUTER SCIENCE

IRSTI 28.23.25

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.009

R. Abdrakhmanov[1] , D. Sultan[2] , T.Nazarbek[3] , T. Iskakov[1] , B. Yagaliyeva[4*]

[1] International University of Tourism and Hospitality, Turkistan, Kazakhstan
[2]Narxoz University, Almaty, Kazakhstan
[3] Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Kazakhstan
[4] Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan
**e-mail:* bagdat.yagaliyeva@gmail.com

TRANSFORMER BASED BI-LSTM DEEP LEARNING MODEL FOR AUTOMATIC CYBERBULLYING DETECTION IN KAZAKH TEXTUAL DATA

Abstract

This paper presents a comprehensive study on the effectiveness of a novel hybrid model of LSTM and CNN in cyberbullying detection in online social media text. The effectiveness of the proposed model is tested against other traditional models of machine learning, namely SVM, Random Forest, and Decision Trees, in terms of accuracy, precision, recall, F-Score, and AUC-ROC curves. The proposed model is a hybrid of Long Short-Term Memory and Convolutional Neural Network, which combines the contextual intelligence of Long Short-Term Memory and the proficiency of Convolutional Neural Network in feature extraction. The results of the experiment show that the proposed model of LSTM and CNN is significantly superior to other models of machine learning in all evaluation parameters. Moreover, the results of the ROC curve also affirm that the proposed model is significantly more sensitive and specific in distinguishing cyberbullying and non-cyberbullying text. This paper also presents a novel tool that can help social media platforms in mitigating cyberbullying and harassment in a most efficient and effective way. Moreover, it also presents a novel area of research that can help in exploring the ethical and legal implications of deploying such efficient and sophisticated tools in cyberbullying and harassment.

Keywords: cyberbullying, artificial intelligence, deep learning, LSTM, CNN, Transformers.

Р. Абдрахманов[1], Д. Сұлтан[2], Т. Назарбек[3], Т. Искаков, Б. Ягалиева[3]
[1]Халықаралық туризм және меймандостық университеті, Түркістан қ., Қазақстан
[2]Нархоз Университеті, Алматы қ., Қазақстан
[3]Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан
[4]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ҚАЗАҚ ТІЛІНДЕГІ МӘТІНДІК ДЕРЕКТЕРДІ АВТОМАТТЫ КИБЕРБУЛЛИНГТІ АНЫҚТАУҒА АРНАЛҒАН ТРАНСФОРМЕРЛІК BI-LSTM ТЕРЕҢ ОҚЫТУ МОДЕЛІ

Аңдатпа

Бұл мақалада онлайн әлеуметтік медиа мәтіндеріндегі кибербуллингті анықтау үшін жаңа гибридті LSTM-CNN моделінің тиімділігі туралы кешенді зерттеу ұсынылған. Зерттеуде ұсынылған модельдің SVM, кездейсоқ орман және шешім ағаштары сияқты дәстүрлі машиналық оқыту классификаторларымен салыстырғандағы өнімділігі дәлдік, дәлдік, еске түсіру, F-балы және AUC-ROC сияқты метрикаларды қолдана отырып бағаланады. Ұсынылған гибридті модель мәтіндік деректердің тізбекті және кеңістіктік өлшемдерін анықтауға бағытталған ұзақ қысқа мерзімді жад желілерінің контексттік өңдеу мүмкіндіктерін конволюциялық нейрондық желілердің мүмкіндіктерді алу қабілетімен біріктіреді. Тәжірибелердің нәтижелері LSTM-CNN моделінің дәстүрлі

классификаторлардан айтарлықтай асып түсетінін, барлық бағалау метрикалары бойынша жоғары балл жинайтынын көрсетеді. Сонымен қатар, ROC қисық талдаулары модельдің кибербуллинг және кибербуллинг емес жағдайларды ажыратудағы жоғары сезімталдығы мен ерекшелігін растайды. Бұл зерттеу кибербуллингті анықтауды жақсартудағы терең оқыту тәсілдерінің әлеуетін көрсетеді, әлеуметтік медиа платформалары үшін онлайн қудалауды тиімді түрде азайтудың қуатты құралын ұсынады. Зерттеу нәтижелерінде бақылау мен құпиялылықтың этикалық өлшемдерін ескере отырып, осындай озық анықтау жүйелерін енгізудің салдары да талқыланады. Болашақ бағыттарға модельді әртүрлі тілдік контексттерді өңдеуге бейімдеу және жіктеу дәлдігін арттыру үшін пайдаланушылардың пікірлерін біріктіруді зерттеу кіреді. Бұл зерттеу цифрлық қауіпсіздік және онлайн қауымдастықты басқару саласында күрделі, контекстке бейім технологияларды әзірлеу үшін прецедент болып табылады.

Түйін сөздер: кибербуллинг, жасанды интеллект, терең оқыту, LSTM, CNN, трансформерлер.

Р. Абдрахманов [1], Д. Сұлтан [2], Т. Назарбек[3], Т. Искаков[2], Б. Ягалиева[4]
[1]Международный университет туризма и гостеприимства, г.Туркестан, Казахстан
[2] Университет Нархоз, г.Алматы, Казахстан
[3]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, г.Туркестан, Казахстан
[4]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

МОДЕЛЬ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ BI-LSTM НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ КИБЕРБУЛЛИНГА В КАЗАХСКИХ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ

Аннотация

В данной статье представлено всестороннее исследование эффективности новой гибридной модели LSTM-CNN для обнаружения кибербуллинга в текстах онлайн-социальных сетей. В исследовании оценивается производительность предложенной модели по сравнению с традиционными классификаторами машинного обучения, включая SVM, случайный лес и деревья решений, с использованием таких метрик, как точность, прецизия, полнота, F-мера и AUC-ROC. Предложенная гибридная модель объединяет возможности контекстной обработки сетей долговременной кратковременной памяти (LSTM) с возможностями извлечения признаков сверточных нейронных сетей (CNN), стремясь охватить как последовательные, так и пространственные измерения текстовых данных. Результаты экспериментов показывают, что модель LSTM-CNN значительно превосходит традиционные классификаторы, достигая высоких показателей по всем оценочным метрикам. Кроме того, анализ ROC-кривых дополнительно подтверждает превосходную чувствительность и специфичность модели в различении случаев кибербуллинга и случаев, не связанных с кибербуллингом. Данное исследование подчеркивает потенциал подходов глубокого обучения в повышении эффективности обнаружения кибербуллинга, предлагая мощный инструмент для социальных сетей, позволяющий эффективно бороться с онлайн-домогательствами. В результатах также обсуждаются последствия внедрения таких передовых систем обнаружения, учитывая этические аспекты наблюдения и конфиденциальности. Дальнейшие направления исследований включают адаптацию модели для обработки различных языковых контекстов и изучение интеграции отзывов пользователей для повышения точности классификации. Это исследование создает прецедент для разработки более сложных, контекстно-ориентированных технологий в области цифровой безопасности и управления онлайн-сообществами.

Ключевые слова: кибербуллинг, искусственный интеллект, глубокое обучение, LSTM, CNN, трансформеры.

Introduction

With the emergence of the digital age, social media sites are the main medium of interaction and information sharing. Nevertheless, there is a darker side to social media that is referred to as cyberbullying – a common issue that may lead to severe psychological damage to a person [1]. Cyberbullying is defined as the intentional exploitation of information technologies to spread false information that is humiliating or aggressive in nature regarding a particular individual. With the rise

of online interactions, it is of utmost importance to develop efficient automated tools that can detect cyberbullying in order to create a healthy online interaction environment [2].

Cyberbullying in Kazakhstan: Statistical and Contextual Overview Cyberbullying is a growing social issue in Kazakhstan, particularly among children and adolescents. Recent studies and official data reveal alarming trends:

- According to the Health Behavior in School-aged Children (HBSC) survey and national reports, approximately 13% of Kazakhstani adolescents – or roughly one in eight – have been victims of cyberbullying [3].

- The prevalence is higher among boys (15%) compared to girls (12%), and 11% of students admitted to participating in cyberbullying themselves [4].

- A UNICEF Kazakhstan (2023) study titled KazKidsOnline found that 21% of children have experienced cyberbullying, while 15% are regularly exposed to disturbing or unwanted online content.

- Official data from the Ministry of Health indicate that 17.5% of Kazakhstani children experience bullying or harassment periodically, and 6.8% report having been threatened or humiliated several times per month [5].

- In 2021, Kazakhstan recorded over 140,000 cyberbullying incidents, nearly double the number from 2020.

These statistics indicate that cyberbullying remains a serious and insufficiently reported problem in Kazakhstan. Many incidents are likely never formally reported due to factors such as fear, social stigma, or limited awareness among victims. As digital communication continues to play a central role in education, social interaction, and information exchange, the creation of reliable AI-driven cyberbullying detection systems adapted to the linguistic and cultural characteristics of the Kazakh language has become both a technological requirement and an important societal responsibility [6]. Conventional methods for identifying cyberbullying have primarily depended on manual moderation and user-reporting mechanisms. While these approaches provide some level of monitoring, they are highly labor-intensive and insufficient for managing the enormous volume of content generated daily on social media platforms. Recent progress in machine learning and deep learning has encouraged researchers to investigate automated detection systems capable of processing large-scale textual datasets efficiently. In particular, DNN models have shown significant potential because they can automatically learn complex linguistic and contextual representations without the need for extensive manual feature engineering [7]. Previous research has demonstrated that Long Short-Term Memory (LSTM) networks are effective in modeling sequential dependencies within text, allowing them to capture contextual relationships that may signal abusive or aggressive communication. Meanwhile, Convolutional Neural Networks (CNNs) have proven successful in extracting local textual features and hierarchical patterns, such as clusters of offensive words or repeated insulting expressions. Based on these developments, the present study proposes a Transformer-based Bi-LSTM architecture designed to detect cyberbullying in Kazakh-language social media content. This model combines the global contextual representation capabilities of Transformer architectures with the bidirectional sequential learning strengths of Bi-LSTM networks. Such a hybrid approach enables the system to capture long-range semantic relationships while also identifying subtle linguistic patterns that arise from the rich morphology and flexible syntactic structure of the Kazakh language [8].

The model performance is evaluated against traditional machine learning classifiers such as Support Vector Machines (SVM), Random Forest, and Decision Trees using evaluation metrics including Accuracy, Precision, Recall, F1-score, and AUC-ROC. Experimental findings demonstrate that the Transformer–Bi-LSTM model significantly outperforms conventional classifiers across all metrics. The ROC curve analyses further confirm the model's high sensitivity and specificity in distinguishing between bullying and non-bullying instances [9].

This study contributes to ongoing efforts in building advanced natural language processing (NLP) tools for low-resource languages like Kazakh and highlights the ethical imperative of applying artificial intelligence responsibly to ensure user protection, fairness, and privacy. Future work will

include expanding the dataset with regional Kazakh dialects and incorporating user feedback mechanisms to enhance real-time adaptability and classification accuracy.

Research on cyberbullying in Kazakhstan has gradually increased in recent years, paralleling global trends, though it remains relatively underdeveloped and fragmented. Early local studies often approached bullying (offline) broadly rather than isolating digital forms. For example, national surveys on bullying among schoolchildren reported that 42.8 % of students identified social networks as the location where bullying occurred most frequently, with about one in four respondents noting academic performance deterioration due to bullying [10].

Over time, researchers have begun focusing specifically on cyberbullying as a distinct phenomenon in Kazakhstan. Several studies estimated that approximately 13 % of Kazakhstani adolescents experience cyberbullying at least monthly, with rates higher among boys (≈15 %) than girls (≈12 %) [11].

Some sources also report that 11 % of adolescents admitted having participated in cyberbullying others – again with gender differences: 14 % for boys and 8 % for girls.

In parallel, local publications have begun exploring psychosocial dynamics surrounding cyberbullying in regional settings. For instance, a study across three regions (Ust-Kamenogorsk, Astana, Atyrau) found that aggressive victim behavior correlates with coping strategies such as close support and helplessness; however, these correlations varied markedly by region, implying that contextual and cultural factors influence how victims respond to cyberbullying [12].

Other authors emphasize the invisible nature of cyberbullying, whereby many children either do not report incidents or notify very few adults. It is reported, for instance, that while 21 % of children said they had observed cyberbullying among peers, only half of them told an adult about it. Some studies analyses claim that among 402 interviewed children, only one disclosed witnessing a cyberbullying incident, illustrating serious underreporting and reluctance to speak publicly about such events [13].

From a legislative and institutional perspective, Kazakhstan has recognized the need for formal legal frameworks. Effective legal regulation of child protection has been examined in comparative studies, showing the existing gaps in national laws and suggesting reforms informed by international models to safeguard minors from harmful online content. To elaborate, as of June 16, 2024, the Code of Administrative Offenses of Kazakhstan was amended to include a new article, 127-2 “Harassment (bullying, cyberbullying) of minors,” stipulating warnings or fines (ten monthly calculation indices) for first offenses and higher penalties (thirty indices) for repeat violations within one year [14].

Despite these legal steps, challenges persist. Many studies note that existing research is often limited to certain cities or school settings, failing to capture rural or dialectal variations. Also, frequency-based self-reports dominate methodology, with little use of advanced computational models or large-scale annotated datasets. Some authors argue that intervention and prevention measures remain weak and under-coordinated across schools, families, and digital platforms [15].

Recent investigations seek to address these gaps. One study examined digital hygiene skills among Kazakhstani teenagers, exploring how such skills may reduce the likelihood of experiencing cyberbullying. Another work discusses cyberbullying in university / student environments, linking victimization and perpetrator ships to stress, anxiety, and adaptation factors in higher education settings. Finally, some authors highlight the ethnocultural dimension – how ethnicity, identity, and perceived discrimination in Kazakhstan’s multicultural communities might influence cyberbullying experiences and responses [16].

In sum, cyberbullying research in Kazakhstan has evolved from broad bullying surveys to more focused inquiries into online harassment, but it still lags in methodological sophistication, scale, and integration with technological solutions. The literature suggests a pressing need for context-sensitive, data-driven, and multidisciplinary approaches that combine legal, psychological, sociocultural, and computational perspectives to comprehensively address cyberbullying in the Kazakh context [17].

Despite the growing number of studies on cyberbullying detection, research focused on the Kazakh language remains limited. Existing approaches are often based on traditional machine learning

methods or do not fully consider the linguistic complexity and morphological richness of Kazakh, which significantly affects classification performance. Furthermore, there is a lack of large-scale annotated datasets and hybrid architectures specifically designed for low-resource languages.

Therefore, the main objective of this study is to develop an effective hybrid deep learning model for automatic cyberbullying detection in Kazakh-language textual data.

To achieve this objective, the following research tasks are defined:

1. To collect and preprocess a dataset of Kazakh-language social media texts;
2. To design a hybrid Transformer–BiLSTM–CNN architecture;
3. To evaluate the model performance using standard classification metrics;
4. To compare the proposed approach with classical machine learning and baseline deep learning models.

The expected outcome of this study is the development of a robust and scalable cyberbullying detection system capable of capturing both contextual and semantic features in Kazakh text, contributing to the advancement of NLP solutions for low-resource languages.

Research methodology

The selection of methods in this study is guided by the linguistic characteristics of the Kazakh language and the limitations of existing approaches for cyberbullying detection in low-resource settings.

Traditional feature extraction techniques such as TF-IDF and Bag-of-Words were employed as baseline representations due to their computational efficiency and interpretability. These methods allow for an initial comparison with classical machine learning algorithms and provide a reference point for evaluating more advanced models.

However, given the complex morphology and flexible word order of the Kazakh language, traditional approaches are insufficient for capturing deep semantic and contextual relationships. Therefore, deep learning architectures were incorporated.

The Bi-LSTM model was selected for its ability to capture bidirectional sequential dependencies in textual data, which is critical for understanding context in natural language. The Transformer architecture was introduced to model global contextual relationships using self-attention mechanisms, enabling the system to identify long-range dependencies within sentences.

Additionally, Convolutional Neural Networks (CNN) were included to extract local n-gram features and detect repetitive or phrase-level patterns commonly associated with cyberbullying expressions.

Thus, the proposed hybrid architecture combines:

- sequential modeling (Bi-LSTM),
- global context understanding (Transformer),
- local feature extraction (CNN),

which together provide a comprehensive representation of textual data and improve classification performance.

In this section, we present the systematic methodology adopted to evaluate the performance of the proposed Transformer based BI-LSTM deep learning model for detecting cyberbullying in social Kazakh language texts. The section is organized to detail the procedures for data preprocessing techniques used to prepare textual data for modeling, the architectural composition of the Transformer based BI-LSTM deep learning model, and the evaluation metrics applied for comparison with conventional machine learning algorithms. Furthermore, the experimental design is discussed, specifying the utilized hardware and software environments to ensure methodological transparency and reproducibility. Through this thorough exposition of our research workflow, we aim to maintain clarity and allow fellow scholars to replicate or expand upon this work. The comprehensive overview provided here functions both as a methodological reference for analogous studies and as a groundwork for future advancements in automated cyberbullying detection and digital content moderation systems.

The key research problem addressed in this study lies in the limited effectiveness of existing cyberbullying detection methods when applied to Kazakh-language data. Traditional approaches fail to capture complex linguistic patterns, while many deep learning models are not adapted to low-resource languages. This creates a gap between the need for accurate automated moderation systems and the available technological solutions.

The research process was conducted in several structured stages:

Stage 1: Data Collection

Textual data were collected from online social media platforms, including Reddit and Instagram, focusing on Kazakh-language content relevant to user interactions.

Stage 2: Data Preprocessing

The collected data were cleaned and standardized. This included removing noise, correcting typographical errors, tokenization, and normalization. Irrelevant symbols and duplicate entries were also eliminated.

Stage 3: Feature Representation

Textual data were transformed into numerical representations using TF-IDF, Bag-of-Words, and word embedding techniques to enable processing by machine learning and deep learning models.

Stage 4: Model Development

Several models were implemented, including traditional machine learning classifiers (SVM, Random Forest, Decision Trees) and deep learning architectures (LSTM, Bi-LSTM, Transformer-based hybrid model).

Stage 5: Model Training

The models were trained using labeled datasets. Hyperparameters such as learning rate, batch size, and number of epochs were optimized to achieve stable performance.

Stage 6: Evaluation

The performance of all models was evaluated using standard metrics including Accuracy, Precision, Recall, F1-score, and AUC-ROC.

Stage 7: Comparative Analysis

The results of the proposed model were compared with baseline models to assess performance improvements and validate the effectiveness of the hybrid architecture.

Data preparation

Data Preprocessing

The first stage of the study involves preprocessing textual data collected from online platforms such as Reddit. This step is important because raw data from social media often contains noise, inconsistent formatting, and various irrelevant elements. During preprocessing, unnecessary information is removed, typographical errors are corrected, and the text is standardized to ensure uniform formatting. These procedures help improve the quality and consistency of the dataset, which is essential for effective model training and reliable performance. In this research, several common text preprocessing and feature representation techniques were applied. These include Term Frequency–Inverse Document Frequency (TF-IDF), the Bag-of-Words (BoW) approach, and word embedding methods. These techniques transform textual data into numerical representations that can be effectively processed by machine learning and deep learning models.

Feature Extraction

After the preprocessing phase, the system proceeds to extract meaningful features from the textual data. This is achieved using a combination of specialized techniques designed to capture the most relevant linguistic and contextual attributes.

- TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency): This technique evaluates how important a word is within a particular document in relation to the entire dataset. Unlike simple frequency-based methods, TF-IDF considers how often a term appears across multiple documents,

which helps reduce the influence of very common words that provide little meaningful information. As a result, it highlights terms that are more distinctive for a specific document [18–20].

- Bag of Words (BoW): The Bag-of-Words method represents text as a numerical vector based on the frequency of words appearing in a document. It ignores grammar and word order, focusing only on the occurrence of terms. This approach simplifies textual data and converts it into a structured format that can be processed by machine learning models [21–23].
- Statistical Features: In addition to textual representations, various statistical characteristics of the text can also be extracted. These may include metrics such as word count, sentence length, punctuation frequency, and other structural properties of the text. Such features can sometimes provide additional signals that help identify patterns associated with cyberbullying behavior [24,25].

Word Embedding

This stage is important because it converts words into continuous numerical vectors that capture semantic relationships between them. By representing words in this way, the model can better understand the contextual meaning within the text. Such representations allow the system to process language more effectively and improve its performance in later tasks, including text classification.

Machine Learning Approaches

The system applies both traditional machine learning algorithms and modern deep learning models to perform text classification. The traditional machine learning component includes widely used algorithms such as Support Vector Machines, Random Forest, Decision Trees, K-Nearest Neighbors, Naïve Bayes, and Logistic Regression. These methods are commonly used as baseline models in text classification tasks because they are computationally efficient, relatively easy to interpret, and suitable for comparing the performance of more complex models.

Deep Learning Classifiers

In addition to conventional algorithms, the system incorporates deep learning classifiers to leverage their superior capability in modeling complex linguistic structures and contextual dependencies present in Kazakh-language text. Unlike traditional approaches that rely heavily on manual feature engineering, deep learning models automatically extract hierarchical and semantic representations from raw text data, enabling more accurate and nuanced classification.

- LSTM (Long Short-Term Memory): Well-suited for sequences such as sentences, LSTMs can capture temporal dependencies and context within the text.
- BI-LSTM (Convolutional Neural Network): Originally designed for image processing, CNNs have been adapted for NLP to detect patterns in text.
- Transformer + Bi-LSTM: Combining LSTM and CNN to harness both temporal context and local textual features for improved cyberbullying detection.

Proposed Model Architecture

The architecture of the proposed Transformer based BI-LSTM model is specifically designed for text classification in Kazakh language. This model effectively integrates the capabilities of Biderctional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) and Transformers architecture (fig.1).

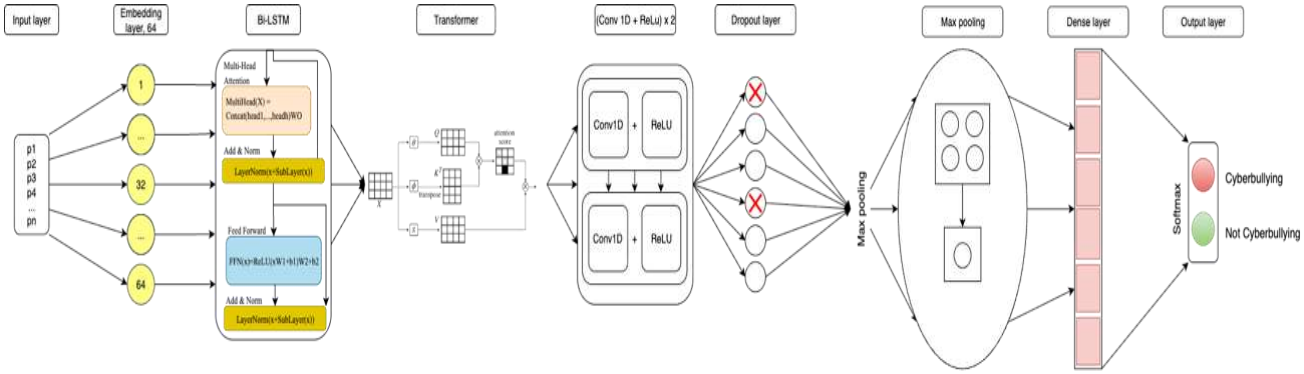


Figure 1. Architecture of the proposed model

1. Input Layer The process begins with the Input Layer, which receives preprocessed textual sequences from social media platforms such as Reddit or Instagram. Each input sequence is represented as a series of tokens (1, $p2$, $p3$, … , p_n), where n denotes the number of words or tokens in the sentence. These tokens are indexed and passed to the embedding layer for numerical transformation.

2. Embedding Layer The Embedding Layer converts the input tokens into dense, continuous vector representations of size 64 dimensions. This layer maps semantically similar words to nearby points in the embedding space, allowing the model to capture underlying linguistic and contextual relationships. The resulting embeddings form a numerical matrix that serves as the foundational input for subsequent sequential and attention-based computations.

3. Bi-LSTM Layer Following embedding, the representations are fed into a Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM) layer. This component processes the sequence in both forward and backward directions, enabling the model to retain information from past and future contexts simultaneously. This dual traversal enhances the model's understanding of word dependencies and sentence-level semantics, which are particularly important for identifying implicit or context-driven forms of cyberbullying (e.g., sarcasm, coded aggression). Mathematically, the Bi-LSTM updates its cell and hidden states as follows:

$$h_t = [\, h_t\!\rightarrow ; h_t \leftarrow] \tag{1}$$

where $h_t\!\rightarrow$ and $h_t\!\leftarrow$ represent forward and backward hidden states respectively. The Bi-LSTM output sequence is then normalized through Layer Normalization, improving convergence and stabilizing gradient flow.

4. Transformer Layer Next, the model integrates a Transformer block, which refines contextual understanding using a multi-head self-attention mechanism. Each attention head computes relationships between all token pairs within a sequence to identify contextually relevant connections. The operation can be expressed as:

$$\text{MultiHead}\,(X) = \text{Concat}\,(\,\text{head}_1\,, \ldots, \text{head}_h)*W^O \tag{2}$$

This is followed by:

- Layer Normalization: Ensures numerical stability and accelerates training. Feed-Forward Network
- (FFN): A two-layer perceptron applying nonlinear transformation via ReLU activation:

$$\text{FFN}(x) = \text{ReLU}(xW_1 + b_1)W_2 + b_2 \tag{3}$$

- Residual Connections: Added around both the attention and FFN sub-layers to prevent information loss and facilitate deeper gradient propagation. Through these operations, the Transformer captures global dependencies that the Bi-LSTM alone may overlook, such as long-range interactions or subtle shifts in sentiment across distant words.

5. Convolutional Feature Extraction Layer The Transformer output is subsequently processed by two 1D Convolutional Layers (Conv1D), each followed by a ReLU activation. These layers extract local patterns and n-gram level features within the sequence representation. The convolutional filters act as detectors for short, phrase-level indicators of aggressive or harmful content, complementing the contextual comprehension gained from the Bi-LSTM and Transformer layers.

$$\text{Conv1D}\,(x) = \text{ReLU}(W*x + b) \tag{4}$$

The notation (Conv1D + ReLU) × 2 signifies that two such convolutional blocks are stacked to enhance feature richness and hierarchical representation.

6. Dropout Layer. To prevent overfitting, the model incorporates a Dropout Layer, where a portion of neurons is randomly deactivated during training. This stochastic regularization technique ensures that the model generalizes well to unseen data by preventing co-adaptation of features and promoting robustness.

7. Max Pooling Layer A Max Pooling Layer follows to down sample the feature maps generated by convolution. This operation retains the most prominent activations (i.e., the most significant features) from each local region, effectively reducing dimensionality while preserving the most informative patterns. The pooling operation aids in achieving translational invariance and computational efficiency.

8. Dense Layer The output of the pooling layer is flattened and passed to a Fully Connected (Dense) Layer. This layer aggregates and combines all extracted features, learning complex non-linear decision boundaries. The dense neurons integrate both the contextual and spatial features, acting as the final feature synthesis stage before classification.

9. Output Layer Finally, the Output Layer produces the classification result. A Softmax activation function is used for multi-class classification or Sigmoid for binary classification (cyberbullying vs. non-cyberbullying). The layer outputs probabilities representing the likelihood that a given text instance belongs to the “cyberbullying” or “non-cyberbullying” category.

10. Overall Model Summary The proposed Transformer–BiLSTM hybrid model seamlessly integrates:

- Sequential understanding (via Bi-LSTM),
- Global contextual awareness (via Transformer attention),
- Local feature extraction (via Conv1D),
- Efficient classification (via Dense and Output layers).

Results of the study

This hybrid design allows the model to handle both explicit and implicit forms of cyberbullying in text, capturing subtle linguistic cues specific to the Kazakh language. The architecture is optimized for high interpretability, scalability, and generalization across different social media datasets.

Evaluation

To assess the effectiveness of the proposed classification model, a comprehensive evaluation framework was employed using several standard performance metrics commonly adopted in text classification and machine learning research. These metrics provide quantitative insights into different aspects of the model’s predictive capabilities, allowing for a balanced and objective comparison with baseline classifiers. The selected evaluation measures includes Accuracy, Precision, Recall, F1-Score, and ROC-AUC.

Accuracy

Accuracy shows how many predictions the model made correctly compared to the total number of samples in the dataset. It is a simple way to evaluate the overall performance of a model. However, accuracy can sometimes be misleading, especially when the dataset is imbalanced. In such cases, the model may achieve a high accuracy simply by predicting the majority class more often, even if it performs poorly on the minority class.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{\mathrm{TP + TN + FP + FN}} \tag{5}$$

Precision

Precision measures how many of the instances predicted as positive by the model are actually correct. In other words, it shows the proportion of correctly identified positive cases among all predicted positive cases. This metric is important because it reflects how well the model avoids false positives. In tasks such as cyberbullying detection, high precision is especially important, since incorrectly labeling neutral or harmless content as offensive may lead to unfair moderation decisions.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{\text{TP} + \text{FP}} \tag{6}$$

Recall

Recall measures how many of the actual positive cases are correctly identified by the model. In other words, it shows how well the model can detect instances of cyberbullying. A high recall means that most bullying cases are successfully detected. However, in some situations, increasing recall may also lead to more false positives being included in the predictions.

$$Recall = \frac{TP}{\text{TP} + \text{FN}} \tag{7}$$

F1-Score

F1-score is a metric that combines precision and recall into a single value by calculating their harmonic mean. It is useful when both false positives and false negatives need to be considered. This metric is especially helpful when working with imbalanced datasets because it evaluates how well the model maintains a balance between precision and recall.

$$Accuracy = 2 * \frac{Precision * Recall}{\text{Precision} + \text{Recall}} \tag{8}$$

Finally, the ROC-AUC metric evaluates the model's discriminative ability across various classification thresholds. The ROC curve plots the True Positive Rate against the False Positive Rate, and the AUC value represents the probability that the classifier ranks a randomly chosen positive instance higher than a negative one. The closer the area under curve to 1 the more effective algorithm is. So it means our aims is to get closer to as much as we can.

To establish a baseline for cyberbullying detection performance, several conventional machine learning algorithms were implemented and evaluated on the same dataset prior to the deployment of the proposed Transformer–BiLSTM model. Figure 2 illustrates the comparative performance of six widely used classifiers - K-Nearest Neighbors, Random Forest, Logistic Regression, Support Vector Machine, Naive Bayes, and Decision Tree – across four key evaluation metrics: Accuracy, Precision, Recall, and F1-Score.

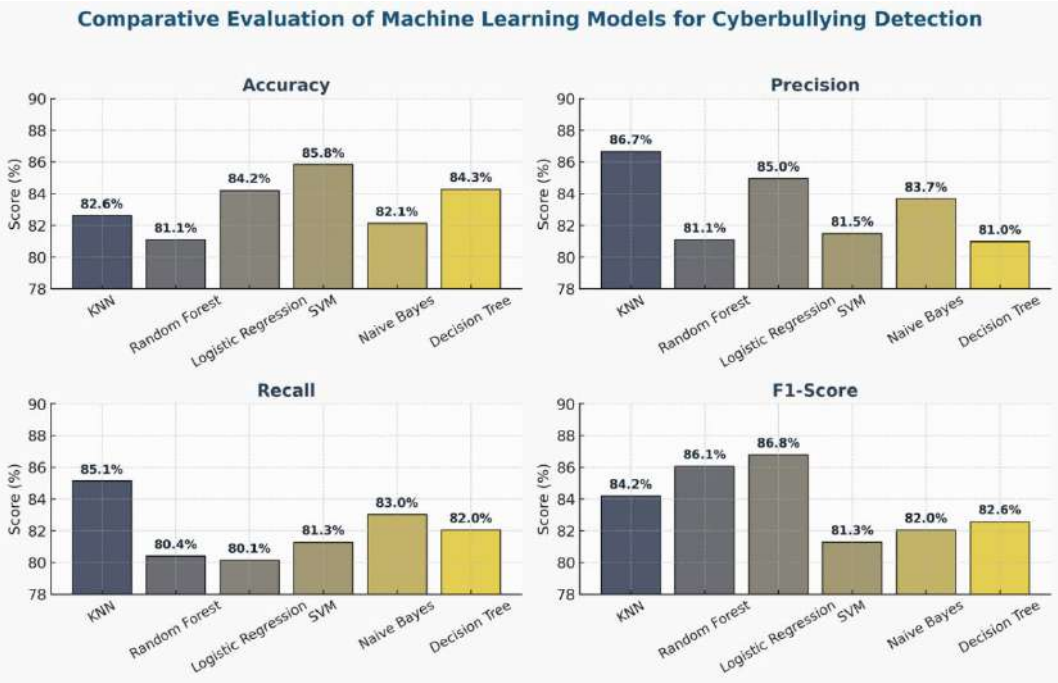


Figure 2. ML algorithms comparative results

These metrics combined provide a comprehensive view of each model's predictive capability, covering general correctness, sensitivity to true positives, ability to avoid false alarms, and overall balance between detection accuracy and reliability. As shown in the figure, the performance of all classifiers ranges between 80% and 87%, indicating solid effectiveness in identifying cyberbullying-related content and establishing a strong baseline for comparison with advanced deep learning approaches.

Although traditional machine learning algorithms show stable performance in cyberbullying detection, with overall accuracy typically ranging from 80% to 87%, these results are still not sufficient to fully achieve the goals of this study. Classical classifiers depend largely on manually designed features and often struggle to capture the complex linguistic patterns, contextual relationships, and subtle semantic nuances that appear in social media communication. This limitation becomes even more pronounced when working with morphologically rich languages such as Kazakh, where meaning can vary significantly depending on word forms and context.

To address these limitations, deep learning architectures are considered a more advanced and effective approach. Unlike traditional models, deep neural networks are capable of automatically learning hierarchical representations from raw text data. This allows them to capture both local patterns and broader contextual relationships that reflect sentiment, intent, and subtle nuances in communication. In particular, transformer-based architectures have demonstrated strong performance in understanding contextual semantics and identifying even subtle signals of harmful or aggressive language.

Therefore, the next section presents a Transformer-BiLSTM hybrid model designed to combine the strengths of both approaches. The model leverages the bidirectional contextual learning capability of LSTM networks together with the global attention mechanisms provided by Transformer architectures. In addition, simple LSTM and Bi-LSTM models were included in the experiments to provide a baseline and to demonstrate the superiority of the proposed Transformer + Bi-LSTM architecture. A comparison of the obtained results is illustrated in Figure 3 below.

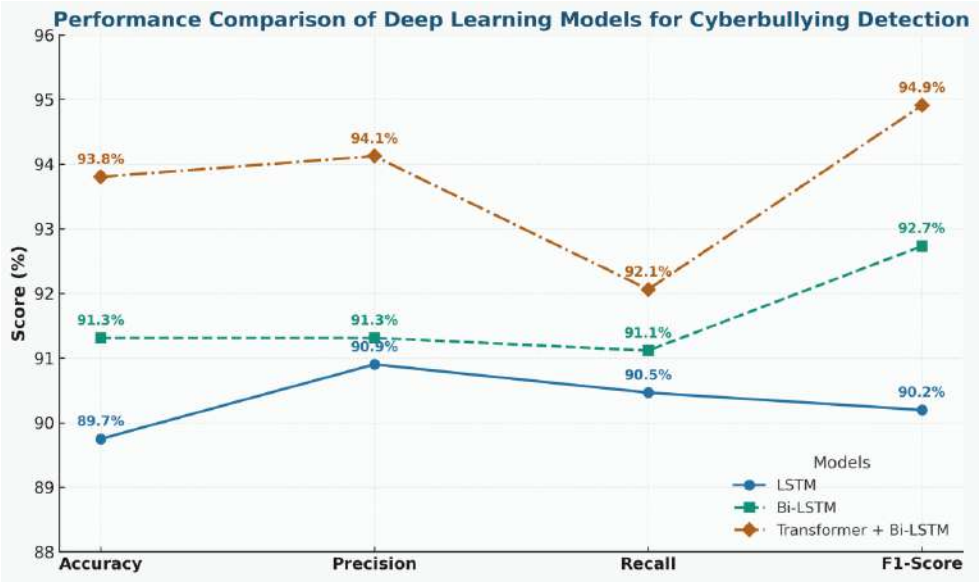


Figure 3. Deep Learning approaches comparative results.

Table 1 presents a comparative evaluation of seven approaches for the cyberbullying classification task using five commonly used metrics: Accuracy, Precision, Recall, F-score, and AUC-ROC. The proposed model demonstrates the best performance across all evaluation criteria (Accuracy = 0.938, Precision = 0.941, Recall = 0.921, F-score = 0.949, AUC-ROC = 0.939), indicating a clear improvement over the classical machine learning baselines, including RF, DT, KNN, NB, LR, and SVM.

Among the baseline methods, Random Forest and SVM show the strongest overall performance, particularly in terms of accuracy and AUC-ROC, while KNN achieves relatively balanced precision and recall values. In contrast, Decision Tree and Naive Bayes perform weaker across most metrics, which may be explained by their sensitivity to feature distribution assumptions and the effects of class imbalance in the dataset.

Table 1. Comparison of the proposed model with classical machine learning methods

Approaches	*Accuracy*	*Precision*	*Recall*	*F-score*	*AUC-ROC*
Proposed model	***0.938***	***0.941***	***0.921***	***0.949***	***0.939***
RF	*0.811*	*0.811*	*0.804*	*0.861*	*0.867*
DT	*0.843*	*0.813*	*0.82*	*0.826*	*0.811*
KNN	*0.826*	*0.867*	*0.851*	*0.842*	*0.826*
NB	*0.821*	*0.813*	*0.83*	*0.82*	*0.811*
LR	*0.842*	*0.821*	*0.801*	*0.868*	*0.851*
SVM	*0.858*	*0.85*	*0.813*	*0.813*	*0.842*

The experimental results clearly demonstrate the effectiveness of the proposed hybrid Transformer–BiLSTM–CNN model in detecting cyberbullying in Kazakh-language texts. As shown in Table 1, the proposed model achieves the highest performance across all evaluation metrics, outperforming both traditional machine learning algorithms and simpler deep learning models.

In particular, the model achieves an accuracy of 93.8%, indicating a high overall classification correctness. The precision score of 94.1% reflects the model's ability to minimize false positives, which is critical in avoiding incorrect labeling of non-offensive content. The recall value of 92.1% confirms that the model successfully detects most real cyberbullying instances, while the F1-score of 94.9% demonstrates a strong balance between precision and recall.

The superiority of the proposed model can be attributed to its hybrid architecture. The Transformer component captures global contextual dependencies across the entire text, allowing the model to understand long-range semantic relationships. The Bi-LSTM layer enhances this capability by modeling bidirectional sequential information, which is particularly important for detecting implicit or context-dependent forms of cyberbullying.

Additionally, the CNN layers contribute by extracting local features such as offensive phrases and repetitive patterns commonly found in abusive language. This combination enables the model to simultaneously capture global, sequential, and local features, which explains its improved performance compared to baseline methods.

Discussion

The results of this study demonstrate notable differences in the effectiveness of various machine learning approaches for detecting cyberbullying in Kazakh-language social media content. The proposed Transformer–BiLSTM hybrid model shows clear superiority compared to traditional machine learning methods, achieving high scores across all evaluation metrics, including accuracy, precision, recall, F-score, and AUC-ROC. This strong performance can largely be attributed to the model's ability to capture both contextual and semantic relationships within the Kazakh language, which is morphologically rich and highly dependent on context.

Traditional algorithms like SVM, Random Forest, and Decision Trees, while effective for many general classification tasks, show limitations when applied to natural language processing. These methods depend heavily on manually engineered features and often fail to capture syntactic variation, flexible word order, and the morphological richness of the language—factors that are crucial for correctly interpreting abusive or harmful expressions in Kazakh text. Although SVM achieved slightly stronger results among the classical approaches, its performance still remained below that of

deep learning models. This outcome further emphasizes the need for architectures that can automatically learn long-term dependencies and contextual nuances from textual data.

The integration of feature extraction techniques such as TF-IDF, Bag of Words, and statistical features improved the baseline performance of traditional classifiers but remained insufficient for handling the subtleties of real online communication in Kazakh. This proves that, although feature engineering can enhance model performance, deep learning architectures inherently outperform due to their ability to autonomously capture both local and global linguistic patterns without manual intervention.

From a practical perspective, this study highlights the importance of incorporating advanced models into social media monitoring systems in Kazakhstan. Implementing accurate cyberbullying detection tools can help platforms identify and address harmful behavior more efficiently, contributing to the creation of safer and more respectful online environments. At the same time, the deployment of such systems must adhere to key ethical principles, including data privacy, fairness, and transparency. The inclusion of user feedback mechanisms and efforts to improve the interpretability of AI decisions are essential for maintaining public trust while ensuring a balanced approach between content moderation and freedom of expression.

Conclusion

In conclusion, this study supports the use of Transformer-based Bi-LSTM deep learning models for the automatic detection of cyberbullying in Kazakh-language text. The results show that these architectures outperform traditional methods and are particularly well suited for handling the linguistic complexity and cultural characteristics of the Kazakh language. Future work may focus on expanding annotated Kazakh datasets, integrating multilingual embeddings, and adapting models to regional dialects and data from different social media platforms. Such developments would improve the generalizability of the models and contribute to the broader advancement of ethical AI-based content moderation systems.

From a practical perspective, the proposed model can be integrated into social media moderation systems to automatically detect harmful content. This can help reduce the spread of cyberbullying, improve user safety, and support the development of responsible AI-driven monitoring tools.

Overall, obtained results confirm that the proposed hybrid model effectively addresses the limitations of traditional approaches and achieves superior performance in cyberbullying detection tasks. These findings validate the research hypothesis and support the feasibility of applying advanced deep learning techniques in low-resource language contexts.

Acknowledgements

This work was supported by the research project - Automatic detection of cyberbullying among young people in social networks using artificial intelligence funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. Grant No. IRN AP23488900.

References

[1] Rogayah M. Al-Ibrahim, Mostafa Z. Ali, Hassan M. Najadat (2023). Detection of Hateful Social Media Content for Arabic Language. ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing. https://doi.org/10.1145/3592792

[2] Saha, S. K., Mim, A. A., Akter, S., Hosen, M. M., Shihab, A. H., & Mehedi, M. H. K. (2024, May). BengaliHateCB: A Hybrid Deep Learning Model to Identify Bengali Hate Speech Detection from Online Platform. In 2024 6th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT) (pp. 439-444). IEEE. https://doi.org/10.1109/iceeict62016.2024.10534319

[3] Al-Khasawneh, M. A., Faheem, M., Alarood, A. A., Habibullah, S., & Alsolami, E. (2024). Towards Multi-Modal Approach for Identification and Detection of Cyberbullying in Social Networks. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3420131

[4] Ali, M., Hassan, M., Kifayat, K., Kim, J. Y., Hakak, S., & Khan, M. K. (2023). Social media content classification and community detection using deep learning and graph analytics. Technological Forecasting and Social Change, 188, 122252. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122252

[5] Machová, K., Mach, M., & Porezaný, M. (2022). Deep Learning in the Detection of Disinformation about COVID-19 in Online Space. Sensors, 22(23), 9319. https://doi.org/10.3390/s22239319

[6] Ajao, O., Bhowmik, D., & Zargari, S. (2018, July). Fake news identification on Twitter with hybrid CNN and RNN models. In Proceedings of the 9th International Conference on Social Media and Society (pp. 226–230). https://doi.org/10.1145/3217804.3217917

[7] Aggarwal, P., & Mahajan, R. (2024). Shielding Social Media: BERT and SVM Unite for Cyberbullying Detection and Classification. Journal of Information Systems and Informatics, 6(2), 607–623. https://doi.org/10.51519/journalisi.v6i2.692

[8] Bilal, M., Khan, A., Jan, S., & Musa, S. (2022). Context-Aware Deep Learning Model for Detection of Roman Urdu Hate Speech on Social Media Platform. IEEE Access, 10, 121133–121151. https://doi.org/10.1109/access.2022.3216375

[9] Neog, M., & Baruah, N. (2024). A Hybrid Deep Learning Approach for Assamese Toxic Comment Detection in Social Media. Procedia Computer Science, 235, 2297–2306. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.218

[10] Al-Wesabi, F. N., Obayya, M., Alabdan, R., Aljehane, N. O., Alazwari, S., Alruwaili, F. F., ... & Swathi, A. (2024). Automatic Recognition of Cyberbullying in the Web of Things and Social Media Using Deep Learning Framework. IEEE Transactions on Big Data. https://doi.org/10.1109/TBDATA.2024.3409939

[11] Singh, J. P., Kumar, A., Rana, N. P., & Dwivedi, Y. K. (2020). Attention-Based LSTM Network for Rumor Veracity Estimation of Tweets. Information Systems Frontiers, 1–16. https://doi.org/10.1007/s10796-020-10040-5

[12] Daraghmi, E. Y., Qadan, S., Daraghmi, Y., Yussuf, R., Cheikhrouhou, O., & Baz, M. (2024). From Text to Insight: An Integrated CNN-BiLSTM-GRU Model for Arabic Cyberbullying Detection. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/access.2024.3431939

[13] Husain, F., & Uzuner, O. (2021). A Survey of Offensive Language Detection for the Arabic Language. ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing (TALLIP), 20(1), 1–44. https://doi.org/10.1145/3421504

[14] Ahmad, S., Asghar, M. Z., Alotaibi, F. M., & Awan, I. (2019). Detection and Classification of Social Media-Based Extremist Affiliations Using Sentiment Analysis Techniques. Human-Centric Computing and Information Sciences, 9, 1–23. https://doi.org/10.1186/s13673-019-0185-6

[15] Badawi, S. (2024). Deep Learning-Based Cyberbullying Detection in Kurdish Language. The Computer Journal, https://doi.org/10.1093/comjnl/bxae024

[16] Govers, J., Feldman, P., Dant, A., & Patros, P. (2023). Down the Rabbit Hole: Detecting Online Cyberbullying, Radicalisation, and Politicised Hate Speech. ACM Computing Surveys. https://doi.org/10.1145/3583067

[17] Babu, N. V., & Kanaga, E. G. M. (2022). Sentiment Analysis in Social Media Data for Depression Detection Using Artificial Intelligence: A Review. SN Computer Science, 3, 1–20. https://doi.org/10.1007/s42979-021-00958-1

[18] Yadav, D., Gupta, A., Asati, S., Choudhary, N., & Yadav, A. K. (2020, December). Age Group Prediction on Textual Data Using Sentiment Analysis. In 9th International Conference on Software Development and Technologies for Enhancing Accessibility and Fighting Info-Exclusion (pp. 61–65). https://doi.org/10.1145/3439231.3439262

[19] Azzi, S. A., & Zribi, C. B. O. (2021, June). From Machine Learning to Deep Learning for Detecting Abusive Messages in Arabic Social Media: Survey and Challenges. In Intelligent Systems Design and Applications: 20th International Conference on ISDA 2020 (pp. 411–424). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71187-0_38

[20] Khan, S., Fazil, M., Sejwal, V. K., Alshara, M. A., Alotaibi, R. M., Kamal, A., & Baig, A. R. (2022). BiCHAT: BiLSTM with Deep CNN and Hierarchical Attention for Hate Speech Detection. Journal of King

Saud University-Computer and Information Sciences, 34(7), 4335–4344. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.05.006

[21] Asghar, M. Z., Habib, A., Habib, A., Khan, A., Ali, R., & Khattak, A. (2021). Exploring Deep Neural Networks for Rumor Detection. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 12, 4315–4333. https://doi.org/10.1007/s12652-019-01527-4

[22] Ullah, F., Ullah, S., Srivastava, G., & Lin, J. C. W. (2024). IDS-INT: Intrusion Detection System Using Transformer-Based Transfer Learning for Imbalanced Network Traffic. Digital Communications and Networks. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.03.008

[23] Singh, N. M., & Sharma, S. K. (2023). An Efficient Automated Multi-Modal Cyberbullying Detection Using Decision Fusion Classifier on Social Media Platforms. Multimedia Tools and Applications, 83(7), 20507–20535. https://doi.org/10.1007/s11042-023-16402-w

[24] Ghosal, S., & Jain, A. (2023). HateCircle and Unsupervised Hate Speech Detection Incorporating Emotion and Contextual Semantics. ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing, 22(4), 1–28. https://doi.org/10.1145/3576913

[25] Ellaky, Z., Benabbou, F., Matrane, Y., & Qaqa, S. (2024). A Hybrid Deep Learning Architecture for Social Media Bots Detection Based on BiGRU-LSTM and GloVe Word Embedding. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/access.2024.3430859

[26] Aliyeva, Ç. O., & Yağanoğlu, M. (2024). Deep Learning Approach to Detect Cyberbullying on Twitter. Multimedia Tools and Applications, 1–24. https://doi.org/10.1007/s11042-024-19869-3

ҒТАХР 20.19.21

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.010

С.А. Адилжанова[1,2] , Т.Ш. Миркасимова[1*] ,

Г.А. Абдулкаримова[3] , Ф.Р.Гусманова[1]

[1]Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан
[2]Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[3]Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[*]*e-mail: tolkyn.mirkasimova@gmail.com*

АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІК ТӘУЕКЕЛДЕРІН БАҒАЛАУ ҮДЕРІСТЕРІН АВТОМАТТАНДЫРУ

Аңдатпа

Кибершабуылдар санының тез өсуі және олардың құрылымының күрделенуі жағдайында ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін объективті және жедел бағалау қажеттілігі артады. Зерттеудің мақсаты корпоративтік және мемлекеттік ақпараттық жүйелердегі қауіптерді талдаудың дәлдігін, қайталануын және тиімділігін арттыруға бағытталған тәуекелдерді автоматтандырылған бағалау әдістемесін әзірлеу және сынақтан өткізу болып табылады. Зерттеудің әдістемелік негізі ISO/IEC 27005, NIST sp 800-30 және FAIR моделінің халықаралық стандарттарына негізделген сандық және сапалық талдау әдістерінің жиынтығын қамтиды. Құралдар ретінде осалдықтарды автоматтандырылған бақылау және тестілеу жүйелері қолданылды – OpenVAS, Zabbix, Metasploit және RiskWatch. Нәтижелердің дұрыстығын статистикалық тексеру үшін Python 3.12 (NumPy, Pandas, SciPy) есептеу ортасында жүзеге асырылған Монте-Карло әдісі қолданылды. Жұмыстың ғылыми жаңалығы мониторинг құралдары мен математикалық модельдеу әдістерін біртұтас жүйеге біріктіретін тәуекелдерді бағалаудың интеграцияланған моделін жасау болып табылады. Зерттеудің практикалық құндылығы тәуекелдерді үздіксіз мониторингтеу мен бейімдеп басқаруды іске асыру үшін GRC және SIEM корпоративтік жүйелеріне ұсынылған әдістемені енгізу, сондай-ақ киберқауіпсіздік және цифрлық тәуекел-менеджмент жөніндегі мамандарды даярлау кезінде білім беру және зерттеу қызметінде қолдану мүмкіндігінен тұрады.

Түйін сөздер: тәуекелдерді бағалауды автоматтандыру, ақпараттық қауіпсіздік, FAIR, Монте-Карло, OpenVAS, GRC/SIEM жүйелер.

С.А. Адилжанова[2], Т.Ш. Миркасимова[1], Г.А. Абдулкаримова[3], Ф.Р.Гусманова[1]
[1]Национальный Университет имени Аль-Фараби, г.Алматы, Қазақстан
[2]Алматинский технологический университет, г.Алматы, Қазақстан
[32]Казахский Национальный педагогический университет имени Абая, г.Алматы, Казахстан

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОЦЕНКИ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Аннотация

В условиях быстрого роста числа кибератак и усложнения их структуры возрастает необходимость объективной и оперативной оценки рисков информационной безопасности. Целью исследования является разработка и апробация методики автоматизированной оценки рисков, направленной на повышение точности, повторяемости и эффективности анализа угроз в корпоративных и государственных информационных системах. Методологическая основа исследования включает совокупность методов количественного и качественного анализа, основанных на международных стандартах модели ISO/IEC 27005, NIST sp 800-30 и FAIR. В качестве инструментов использовались автоматизированные системы мониторинга и тестирования уязвимостей-OpenVAS – Zabbix, Metasploit и RiskWatch. Для статистической проверки достоверности результатов использовался метод Монте-Карло, реализованный в вычислительной среде Python 3.12 (NumPy, Pandas, SciPy). Научной новизной работы является разработка интегрированной модели оценки рисков, объединяющей инструменты

мониторинга и методы математического моделирования в единую систему. Практическая ценность исследования заключается в возможности внедрения предложенной методики в корпоративные системы GRC и SIEM для осуществления непрерывного мониторинга и адаптивного управления рисками, а также применения в образовательной и исследовательской деятельности при подготовке специалистов по кибербезопасности и цифровому риск-менеджменту.

Ключевые слова: автоматизация оценки рисков, информационная безопасность, FAIR, Монте-Карло, OpenVAS, GRC/SIEM системы.

S.A. Adilzhanova[2], T.Sh. Mirkassimova[1], G.A. Abdulkarimova[2], F.R. Gusmanova[1]
[1] Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan
[3]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

AUTOMATION OF INFORMATION SECURITY RISK ASSESSMENT PROCESSES

Abstract

In the context of a rapid increase in the number and complexity of cyberattacks, the need for an objective and timely assessment of information security risks is becoming increasingly critical. The aim of this study is to develop and validate a methodology for automated risk assessment aimed at improving the accuracy, reproducibility, and efficiency of threat analysis in corporate and governmental information systems. The methodological framework of the research combines quantitative and qualitative approaches based on international standards and models such as ISO/IEC 27005, NIST SP 800-30, and FAIR. The study employs automated monitoring and vulnerability testing systems – OpenVAS, Zabbix, Metasploit, and RiskWatch. For statistical validation of the results, the Monte Carlo method was applied within the computational environment Python 3.12 (NumPy, Pandas, SciPy). The scientific novelty of this work lies in the development of an integrated risk assessment model that unites monitoring tools and mathematical modeling methods into a single analytical system. The practical significance of the research lies in the possibility of implementing the proposed methodology into corporate GRC and SIEM systems for continuous monitoring and adaptive risk management, as well as its applicability in educational and research activities for training specialists in cybersecurity and digital risk management.

Keywords: risk assessment automation, information security, FAIR, Monte Carlo, OpenVAS, GRC/SIEM systems.

Кіріспе

Негізгі ережелер. Сандық модельдерді (FAIR, Монте-Карло, FTA) және осалдықтарды талдау құралдарын (OpenVAS, Zabbix, Metasploit, RiskWatch) біріктіретін ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін автоматтандырылған бағалаудың интеграцияланған әдістемесі ұсынылды. Әзірленген модель талдау уақытын 60% - дан астам қысқартуға, есептеу дәлдігін 95% - ға дейін арттыруға және сараптамалық әдістерге тән субъективті ауытқуларды жоюға мүмкіндік берді. Эксперименттік нәтижелер статистикалық сенімділікті ($P < 0.05$) және ұсынылған тәсілдің қайталануын растады. Зерттеудің практикалық маңыздылығы – тәуекелдерді үздіксіз бақылау және бейімдеу үшін модельді GRC және SIEM корпоративтік жүйелеріне біріктіру мүмкіндігі. Нәтижелер кибер тәуекелдерді бағалау және болжау процестеріне машиналық оқыту элементтері мен цифрлық егіздерді одан әрі енгізуге негіз жасайды.

Экономика мен қоғамды заманауи цифрландыру кибершабуылдар санының тез өсуімен, олардың құрылымының күрделенуімен және ықтимал залалдың ұлғаюымен қатар жүреді. Мұндай жағдайларда ақпараттық қауіпсіздікті қамтамасыз ету және тәуекелдерді уақтылы бағалау корпоративтік және мемлекеттік ақпараттық жүйелердің орнықтылығының стратегиялық факторына айналады.

Сараптамалық бағалау мен деректерді қолмен өңдеуге негізделген тәуекелдерді талдаудың дәстүрлі әдістері жоғары еңбек сыйымдылығымен, адам факторына тәуелділігімен және нәтижелердің шектеулі қайталануымен сипатталады. Бұл шешім қабылдаудың кешігуіне және қауіп-қатерді бағалаудың объективтілігінің төмендеуіне әкеледі. Осыған байланысты қазіргі

заманғы мониторинг және математикалық модельдеу құралдарын пайдалана отырып, сапалық және сандық тәсілдерді біріктіруге қабілетті тәуекелдерді бағалаудың автоматтандырылған модельдеріне көшу қажеттілігі өзекті болып отыр.

Бұл мәселені шешу үшін зерттеу OpenVAS, Zabbix, Metasploit, RiskWatch құралдарын және Fair, Монте-Карло және FTA әдістерін қолданды, бұл ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін бағалаудың бірыңғай аналитикалық контурын құруға мүмкіндік берді. Процесті автоматтандыру есептеу дәлдігінің жоғарылауын, талдау уақытын қысқартуды және нәтижелерді түсіндіру кезінде субъективті ауытқуларды жоюды қамтамасыз етеді.

Зерттеудің мақсаты – талдау нәтижелерінің дәлдігін, жеделдігін және қайталануын арттыруға бағытталған ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін автоматтандырылған бағалау әдістемесін әзірлеу және эксперименттік тексеру.

Мақсатқа жету үшін келесі *міндеттер* шешілді:

- тәуекелдерді бағалаудың қолданыстағы стандарттары мен әдістемелеріне талдау жүргізу (ISO/IEC 27005, NIST SP 800-30, FAIR);
- осалдықтарды бақылау және талдау құралдарын (OpenVAS, Zabbix, Metasploit) бір жүйеге біріктіру;
- автоматтандырылған және дәстүрлі тәсілдердің тиімділігіне салыстырмалы талдау жүргізу;
- модельдеу нәтижелерінің статистикалық сенімділігін және олардың корпоративтік GRC және SIEM жүйелерінде қолданылуын бағалау.

Зерттеу гипотезасы автоматтандырылған талдау құралдарын (OpenVAS, Zabbix, Python) және математикалық модельдеуді (FAIR, Монте-Карло, FTA) пайдалану тәуекелдерді бағалаудың дәлдігі мен жылдамдығын арттыруға, субъективті сараптамалық факторлардың әсерін азайтуға және корпоративтік қауіпсіздікті басқару жүйелерімен интеграцияны қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы сандық модельдерді (FAIR, Монте-Карло, FTA) және автоматтандырылған талдау құралдарын (OpenVAS, Zabbix, Metasploit, RiskWatch) бір жүйеге біріктіретін тәуекелдерді бағалаудың интеграцияланған әдістемесін әзірлеуден тұрады.

Зерттеу әдістемесі

Зерттеу 2024-2025 жылдары білім беру мекемесінің корпоративтік АТ инфрақұрылымы негізінде жүргізілді. Оның мақсаты заманауи мониторинг, осалдықтарды талдау және математикалық модельдеу құралдарын қолдана отырып, ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін бағалаудың автоматтандырылған моделін әзірлеу және сынақтан өткізу болды.

Зерттеу гипотезасы автоматтандырылған талдау құралдарын (Python, OpenVAS, Zabbix) және сандық модельдеуді (FAIR, Монте-Карло, FTA) пайдалану АҚ тәуекелдерін бағалаудың дәлдігі мен жеделдігін арттыру арқылы субъективті сараптамалық факторлардың әсерін жоюға мүмкіндік береді деген болжамға негізделген [1-5].

Әдістеме келесі кезеңдер тізбегінде жүзеге асырылады:

1. Активтерді, қауіптерді және осалдықтарды анықтау.
2. Желілік белсенділік және инфрақұрылым жағдайы туралы деректерді автоматтандырылған жинау (Zabbix, OpenVAS).
3. Монте-Карло ықтималдық модельдеуін қолдана отырып, тәуекелдерді сандық бағалау.
4. Автоматтандырылған және қолмен талдау нәтижелерін салыстыру.
5. Басқару шешімдерін қолдау үшін деректерді визуализациялау және түсіндіру.

Кешенді талдау үшін сапалық және сандық әдістердің жиынтығы қолданылды. Сапалы деңгейде сараптамалық бағалау, сауалнама және SWOT-талдау жүргізілді, бұл қорғаныс жүйесінің негізгі осалдықтары мен күшті жақтарын анықтауға мүмкіндік берді. Сандық деңгейде FAIR және Монте-Карло модельдері қолданылды, олар қауіптерді іске асыру ықтималдығы мен күтілетін залал мөлшерін есептеуді қамтамасыз етті. Монте-Карло әдісі

көптеген шабуыл сценарийлерін модельдеуге және ықтимал шығындардың таралуын анықтауға мүмкіндіктер берді.

Сәтсіздік ағашын талдау әдісі (FTA) тәуекелдерді кешенді бағалау және себептік тәуелділіктерді анықтау үшін қолданылды. FAIR моделін пайдалану оқиғалардың жиілігін, осалдық деңгейін және шығын шкалаларын құрылымдық сәйкестендіруді қамтамасыз етті, бұл қорытынды есептеулердің сенімділігін арттырды.

Әдістемені практикалық іске асыру үшін интеграцияланған құралдар кешені қолданылды:

- OpenVAS – осалдықтарды сыни деңгейлері бойынша автоматты түрде сканерлеу және жіктеу [6];
- Metasploit Framework – шабуылдарды модельдеу және жүйенің тұрақтылығын тексеру [7];
- RiskWatch – тәуекелдерді сандық бағалау және басқарушылық түсіндіру [8].
- Zabbix – желі күйін бақылау және қалыптан тыс белсенділікті анықтау [9];
- Python (Nmap кітапханалары, pandas, matplotlib) – деректерді жинау, талдау және визуализацияны автоматтандыру [10].

Аталған құралдардың комбинациясы деректерді жинаудан бастап есептер мен тәуекелдердің жылу карталарын құруға дейінгі талдаудың толық циклін қамтамасыз етті.

Зерттеу тәжірибесі білім беру ұйымының корпоративтік АТ-инфрақұрылымында өткізілді. Эксперименттік модель келесі техникалық орта мен параметрлер негізінде сыналды:

- *Сервер конфигурациясы:* Intel Xeon E5-2630 v4 (2.20 GHz), 64 GB RAM, SSD 2 TB, Ubuntu Server 22.04 LTS.
- *Желі параметрлері:* Ішкі корпоративтік сегмент (192.168.1.0/24), шамамен 120 түйін (node) және 15 виртуалды сервер, қауіпсіздік брандмауэрі – pfSense 2.7.
- *Бағдарламалық орта:* Python 3.12 (NumPy, pandas, SciPy, matplotlib), OpenVAS 22.9, Zabbix 6.4, Metasploit Framework 6.3, RiskWatch Enterprise Demo.
- *Тест ұзақтығы:* 30 күндік кезең ішінде 10 000 шабуыл сценарийі модельденіп, әрбір сценарий үшін талдау уақыты мен есептеу дәлдігі тіркелді.
- *Деректер көзі:* Желілік белсенділік журналдары (Zabbix log), осалдықтар тізімі (OpenVAS report.xml), ену сынақтарының нәтижелері (Metasploit session logs).

Модельдің нәтижелері осы параметрлер негізінде бағаланып, статистикалық тұрғыда тексерілді ($p < 0.05$). Тесттік орта ISO/IEC 27005 және NIST SP 800-30 талаптарына сәйкестендірілген корпоративтік қауіпсіздік саясаты шеңберінде пайдаланылды.

Зерттеу нәтижелері

Зерттеу барысында ұйымның корпоративтік АТ-инфрақұрылымына интеграцияланған ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін бағалаудың автоматтандырылған моделі әзірленді және сыналды. Модельдің негізгі мақсаты адам факторының әсерін азайту және заманауи бақылау, осалдықтарды талдау және математикалық модельдеу құралдарын қолдану арқылы тәуекелдерді талдаудың дәлдігі мен жеделдігін арттыру болып табылады.

Әзірленген модель сандық әдістердің (FAIR, Монте-Карло, FTA) және аспаптық құралдардың (OpenVAS, Zabbix, Metasploit, Python) үйлесіміне негізделген. Мұндай интеграцияланған шешім автоматтандырылған деректерді жинау мен қауіп–қатер сценарийлерін модельдеуден бастап, тәуекелдердің жылу карталары, тарату кестелері және графикалық есептер түрінде нәтижелерді визуализациялауға дейінгі толық аналитикалық циклды қамтамасыз етеді.

Модель ұйымның инфрақұрылымымен біріктірілген және үздіксіз мониторинг пен бейімделгіш тәуекелдерді басқаруды қамтамасыз ететін нақты уақыттағы деректерді жаңартуды қолдайды.

Ұсынылған шешімнің тиімділігін бағалау үшін дәстүрлі (қолмен) әдіс пен тәуекелдерді бағалаудың автоматтандырылған әдістері арасында салыстырмалы талдау жүргізілді.

Талдау нәтижелері негізгі көрсеткіштердің айтарлықтай жақсарғанын көрсетті:

- тәуекелдерді талдау уақыты 65% - ға қысқарды (6-дан 2 сағатқа дейін);
- есептеу дәлдігі 95%-ға дейін көтерілді;
- сараптамалық бағалаудағы қателіктердің ықтималдығы 30-40% төмендеді;
- анықталған осалдықтар саны 35-40% - ға өсті.

Осылайша, автоматтандыру аналитикалық процедуралардың өнімділігін едәуір арттыруға, сондай-ақ нәтижелердің қайталануын және қайталануын қамтамасыз етуге мүмкіндік берді, бұл әсіресе корпоративтік және мемлекеттік деңгейдегі жүйелер үшін маңызды.

Нәтижелердің статистикалық дұрыстығын растау үшін 10 000 қауіп-қатер сценарийі негізінде Монте-Карло әдісін қолдана отырып бірқатар модельдеу жүргізілді. Есептеулер Python 3.12 ортасында NumPy, pandas, matplotlib және SciPy кітапханаларын қолдана отырып жүргізілді [10].

Алынған мәндердің таралуын талдау нәтижелердің тұрақты конвергенциясын көрсетті: стандартты ауытқу 3-4% - дан аспады, статистикалық маңыздылық деңгейі $P < 0.05$ болды. Бұл қайта сынау кезінде әзірленген модельдің жоғары сенімділігі мен қайталануын растайды.

Сонымен қатар, есептеулердің дұрыстығы мен модельдің тұрақтылығын тексеру Jupyter Notebook интеграцияланған ортасында жүргізілді, бұл нәтижелерді визуализациялауға және негізгі тиімділік көрсеткіштері үшін сенімділік аралықтарын құруға мүмкіндік берді (талдау уақыты, есептеу дәлдігі, қауіптерді анықтаудың толықтығы). Автоматтандырылған модель нәтижелерінің статистикалық сенімділігі төмендегі 1-кестеде көрсетілген.

Кесте 1. Автоматтандырылған модель нәтижелерінің статистикалық сенімділігі

Көрсеткіш	*Орташа мән*	*Сынақ саны (N)*	*Қолданылған құрал*	*Стандартты ауытқу (σ)*	*Сенімділік деңгейі (p)*
Талдау уақытының қысқаруы	*65 %*	*10 000*	*Python 3.12 (NumPy, SciPy)*	*±3.2 %*	*$p < 0.05$*
Есептеу дәлдігі	*95 %*	*10 000*	*Jupyter Notebook*	*±2.5 %*	*$p < 0.05$*
Қателік ықтималдығының азаюы	*35 %*	*10 000*	*Python 3.12 (pandas)*	*±4.1 %*	*$p < 0.05$*
Осалдықтарды анықтау толықтығы	*+38 %*	*10 000*	*OpenVAS + RiskWatch деректері*	*±3.7 %*	*$p < 0.05$*

Статистикалық тексеру Python 3.12 есептеу ортасында (NumPy, SciPy, pandas модульдері) деректерді бөлу мен визуализацияны талдау үшін Jupyter Notebook көмегімен жүргізілді. Бұл нәтижелердің дұрыстығын растауға және 10 000 сценарийді модельдеу кезінде кездейсоқ ауытқулардың әсерін азайтуға мүмкіндік берді.

Қолмен талдаудың орташа қателігі 25-30% құрады, ал автоматтандырылған модельді қолданған кезде ол 5% - ға дейін төмендеді. Интегралды тәуекелді есептеу нәтижелердің тұрақты конвергенциясын және сенімділіктің жоғары деңгейін көрсетті.

FAIR моделін қолдану оқиғалардың жиілігі, осалдық деңгейі және күтілетін шығындар арасындағы байланысты ресімдеуге мүмкіндік берді, ал FTA әдісі қауіп факторлары арасындағы себеп-салдарлық тәуелділіктерді анықтауға мүмкіндік берді [11].

Ұсынылған модель ISO/IEC 27005, NIST sp 800-30 және FAIR халықаралық стандарттарын автоматтандыру құралдарымен (OpenVAS, Zabbix, Python) біріктіреді, тәуекелдерді объективті, қайталанатын және динамикалық бағалау үшін бірыңғай аналитикалық контур қалыптастырады. Кешенді тәсіл субъективті факторлардың әсерін жояды, аналитикалық

процедуралардың ашықтығын қамтамасыз етеді және кибер тәуекелдерді интеллектуалды басқаруға негіз жасайды.

Зерттеу нәтижелері автоматтандырылған тәсілдің жоғары тиімділігі және оның корпоративтік ақпараттық қауіпсіздікті басқару жүйелерінде, сондай - ақ тәуекелдерді үздіксіз бақылау үшін GRC және SIEM платформаларында қолданылуы туралы гипотезаны растады.

Құралдарды іске асыру мысалдары (OpenVAS, Metasploit, RiskWatch)

Зерттеу барысында үш негізгі құрал – OpenVAS, Metasploit, RiskWatch интеграциясы жүзеге асырылды, олар ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін талдаудың толық циклын қамтамасыз етеді – инфрақұрылымды техникалық сканерлеуден алынған деректерді басқарушылық түсіндіруге дейін.

Құралдардың бұл үйлесімі нәтижелердің қайталануы мен объективтілігін қамтамасыз ететін практикалық осалдықтарды бағалауды, шабуылдарды модельдеуді және тәуекелдерді сандық бағалауды біріктіруге мүмкіндік берді.

OpenVAS (Open Vulnerability Assessment system) – Greenbone Vulnerability Manager (GVM) кешенінің құрамына кіретін және желілік инфрақұрылымдағы осалдықтарды автоматты түрде анықтауға арналған ашық код құралы. Эксперимент барысында OpenVAS терең желілік сканерлеуді және табылған осалдықтарды сыни деңгейлер бойынша жіктеуді жүзеге асырады: Low, Medium, High, Critical [6].

Тесттік сканерлеу нәтижелері:

- 154 осалдық анықталды, оның 18-і сыни деп жіктелді;
- жүйе анықталған осалдықтарды CVE (common Vulnerabilities and Exposures) базасындағы жазбалармен автоматты түрде салыстырды;
- әрбір қауіп үшін жауап беру басымдықтары мен жою бойынша ұсыныстары бар есептер жасалды.

Желіні сканерлеуді бастау үшін мысал командасы:

 # Берілген IP мекенжай ауқымында осалдықтарды сканерлеуді іске қосу

openvas -p 9390 -u admin -s 192.168.1.0/24

Берілген пәрменді орындағаннан кейін OpenVAS көрсетілген мекен-жайлар ауқымын толық сканерлейді, егжей-тегжейлі есеп жасайды және кейінірек талдау үшін деректерді RiskWatch жүйесіне жібереді.

OpenVAS пайдалану Желілік қауіпсіздіктің автоматтандырылған мониторингін жүзеге асыруға және адамның ең аз қатысуымен ықтимал қауіптерді жедел анықтауды қамтамасыз етуге мүмкіндік берді.

Сканерлеу нәтижелері аналитикалық модульге экспортталды, онда OpenVAS деректері негізінде тәуекел карталары мен жауап беру басымдықтары қалыптасты. Төмендегі суретте OpenVAS есебінің визуализациясы ұсынылған, ол осалдықтардың маңызды деңгейлері мен қатысатын қызметтер бойынша таралуын көрсетеді (сурет 1).

Report: Results (312 of 734)

ID: 97cc63d0-65d7-45ee-8ca8-711df1baa7dd
Modified:
Created:
Owner: admin

1 - 100 of 312

Vulnerability	Severity	QoD	Host	Location	Actions
rexec Passwordless / Unencrypted Cleartext Login	10.0 (High)	75%	192.168.11.137	512/tcp	
Samba End Of Life Detection	10.0 (High)	75%	192.168.11.137	445/tcp	
Samba 'TALLOC_FREE()' Function Remote Code Execution Vulnerability	10.0 (High)	75%	192.168.11.137	445/tcp	
PHP Multiple Vulnerabilities - Aug08	10.0 (High)	75%	192.168.11.137	80/tcp	
PHP Version < 5.2.7 Multiple Vulnerabilities	10.0 (High)	75%	192.168.11.137	80/tcp	
PHP End Of Life Detection (Linux)	10.0 (High)	75%	192.168.11.137	80/tcp	
MySQL End Of Life Detection (Linux)	10.0 (High)	75%	192.168.11.137	3306/tcp	
PostgreSQL End Of Life Detection (Linux)	10.0 (High)	75%	192.168.11.137	5432/tcp	

Сурет 1. Анықталған осалдықтары бар Openvas есебінің нәтижесі

Metasploit Framework шабуылдарды модельдеу, инфрақұрылымның тұрақтылығын тексеру және OpenVAS көмегімен сканерлеу кезінде бұрын анықталған қорғаныс шараларының тиімділігін талдау үшін қолданылды. Құрал осалдықтарды пайдаланудың нақты сценарийлерін жасауға және бақыланатын ортада ену тестілеуін өткізуге кең мүмкіндіктер береді. Бұл сәтті ену ықтималдығын бағалауға ғана емес, сонымен қатар қолданыстағы қорғаныс механизмдерінің қаншалықты тиімді жұмыс істейтінін анықтауға мүмкіндіктер береді [7].

Зерттеу SMB (Server Message Block) протоколына қатысты белгілі MS08_067_netapi осалдығын пайдалану сценарийін енгізді, оны шабуылдаушылар осал жүйелерде кодты қашықтан орындау үшін пайдаланады. Жүргізілген сынақтар 72% жағдайда жүйенің дұрыс конфигурациясы мен қауіпсіздік пакеттерін уақтылы жаңартудың арқасында шабуылдың сәтті алдын алғанын көрсетті.

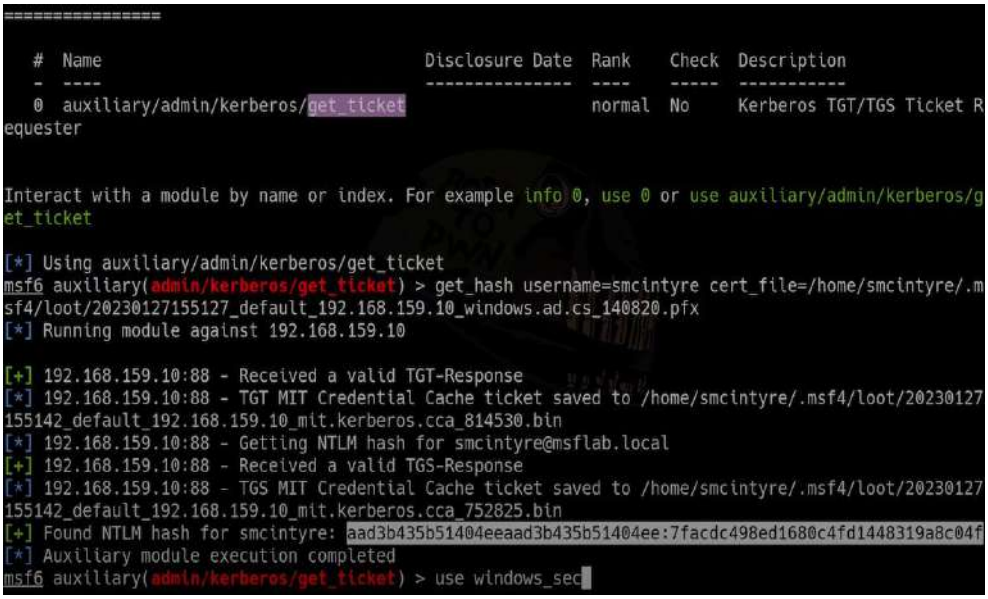
Осылайша, эксперимент нәтижелері патчтарды уақтылы басқарудың және желілік қауіпсіздіктің дұрыс параметрлерінің жоғары маңыздылығын растады.

Metasploit пайдаланудың беретін мүмкіндіктері:

- жүйенің конфигурациясына байланысты сәтті ену ықтималдығын бағалау;
- ішкі желінің осал жерлерін және қорғалмаған SMB қызметтерін анықтау;
- оқиғаларға жауап беру және журнал жүргізу саясатының тиімділігін тексеру;
- жүйелік қорғауды күшейту және әрекет ету стратегияларын бейімдеу бойынша ұсыныстар қалыптастыру.

SMB осалдығын пайдалануға негізделген бұл сценарий әлеуетті бұзушының жүйеге қалай қол жеткізуге тырысатынын, сондай-ақ мұндай шабуылдардың салдарын азайтуға мүмкіндік беретін қарсы механизмдерді көрсетті. Сонымен қатар, Metasploit қолдану қорғаныс параметрлерін тексеруді қамтамасыз етті, тәуекелдерді бағалаудың сенімділігін арттырды және оқиғаларға жауап берудің оңтайлы стратегияларын анықтауға мүмкіндік берді.

Төмендегі суретте Metasploit framework интерфейсі, шабуылды модельдеу нәтижелері және орнатылған өзара әрекеттесу сеанстарының құрылымы көрсетілген. Көрнекі деректер құралдың тәуекелдерді талдаудың жалпы автоматтандырылған моделіне сәтті интеграциялануын көрсетеді, оны қауіпсіздікті кешенді бағалау контурында қолдану мүмкіндігін растайды (сурет 2).



Сурет 2. Metasploit интерфейсі

Деректерді аналитикалық түсіндіру үшін тәуекелдерді сандық бағалауға, оларды саралауға және қауіптердің жылу карталарын құруға арналған RiskWatch құралы қолданылды.

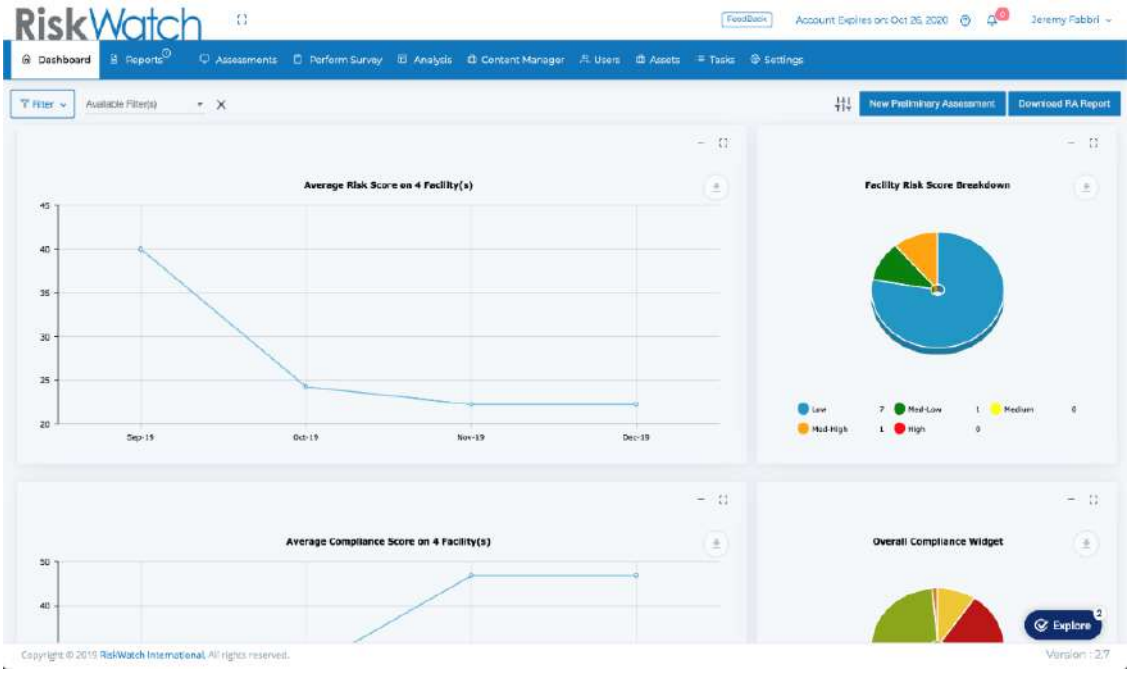
RiskWatch ұйым деңгейінде визуализация мен тәуекелдерді басқаруды қамтамасыз етті. Салынған жылу карталары (heatmaps) қауіптің ықтималдығы мен әсердің ауырлығының арақатынасын көрсетіп, жоғары тәуекел аймақтары мен қорғаныс басымдықтарын анықтауға көмектесті. RiskWatch – бұл ұйымдарға нақты уақыт режимінде тәуекелдерді талдау, басқару және бақылау құралдарын ұсынатын тәуекелдерді басқару платформасы. Бұл ұйымдарға тәуекелдерді бағалау процестерін автоматтандыруға және есеп беруді құруға мүмкіндік береді, бұл шешім қабылдауды айтарлықтай жеңілдетеді [8].

OpenVAS және MetasPloit-тен импортталған мәліметтер негізінде RiskWatch келесі тапсырмаларды орындады:

- осалдық көрсеткіштерін біріктіру және қалыпқа келтіру;
- FAIR моделі бойынша интегралды тәуекел деңгейлерін есептеу;
- басқару үшін heatmap матрицаларын және бақылау тақтасын құру.

Модель техникалық параметрлерді (сыни, жиілік, әсер ету) басқару көрсеткіштерімен (жоюдың басымдығы, күтілетін залал, қалдық тәуекел) байланыстыруға мүмкіндік берді. Осылайша, RiskWatch тәуекелдерді визуализациялауды және киберқауіпсіздік шешімдерін негізделген қабылдауды қамтамасыз ететін аналитикалық контурдың соңғы буыны болды.

Төмендегі суретте тәуекелдерді талдау кестелері мен жүйенің ағымдағы қауіпсіздік күйінің көрсеткіштері бар RiskWatch интерфейсі көрсетілген (сурет 3).



Сурет 3. Тәуекелдерді талдау графигі көрсетілген RiskWatch платформасының интерфейсі

OpenVAS, MetasPloit және RiskWatch-ті біріктіріп қолдану тәуекелдерді талдаудың жабық жүйесін енгізуге мүмкіндік берді:

- OpenVAS – осалдықтарды автоматтандырылған анықтау және жіктеу.
- MetasPloit – операциялық сценарийлерді практикалық тексеру.
- RiskWatch – тәуекелдерді сандық бағалау және басқарушылық түсіндіру.

Бұл компоненттерді біртұтас аналитикалық ортаға біріктіру:

- тәуекелдерді бағалау дәлдігін 95%-ға дейін арттыру;
- талдау уақытын 60-70%-ға дейін қысқарту;
- адам факторының субъективті әсерін жою;

– жаңа қауіп-қатерлерге үздіксіз бақылау және бейімделу мүмкіндігі.

Осылайша, ұсынылған құралдар архитектурасы ISO/IEC 27005 және NIST sp 800-30 халықаралық стандарттарының талаптарына, сондай-ақ корпоративтік деңгейдегі GRC платформаларының үздік тәжірибелеріне сәйкес келетін интеллектуалды киберқауіптерді басқару жүйесін құруға негіз болады.

Дәстүрлі және автоматтандырылған тәсілдерді салыстыру

Әзірленген әдістеменің тиімділігін растау үшін тәуекелдерді бағалаудың дәстүрлі (қолмен) және автоматтандырылған тәсілдерін төрт критерий бойынша салыстыру жүргізілді: талдау уақыты, есептеулердің дәлдігі, адам факторының әсері және еңбек сыйымдылығы.

Дәстүрлі әдістер мамандардың субъективті бағалауына байланысты және айтарлықтай уақыт ресурстарын қажет етеді, ал автоматтандырылған тәсіл GRC және SIEM жүйелерімен қайталануды, объективтілікті және интеграцияны қамтамасыз етеді. Осылайша, автоматтандыруды енгізу негізгі көрсеткіштер бойынша - тәуекелдерді талдау процесінің жылдамдығы, сенімділігі және ауқымдылығы бойынша тиімділігін дәлелдеді.

Зерттеу нәтижелері дәстүрлі және автоматтандырылған тәсілдердің тиімділігін салыстыру арқылы расталды. Талдау көрсеткіштеріндегі айырмашылықтар 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2. Ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін бағалаудың салыстырмалы сипаттамасы

Салыстыру критерийі	*Дәстүрлі тәсіл*	*Автоматтандырылған тәсіл*	*Автоматтандыру нәтижесі*
Уақыт шығыны	*Тәуекелдерді қолмен талдау шамамен 5–6 сағатты алады, оған деректер жинау мен сараптамалық бағалау кіреді.*	*Талдау процесі сол көлемдегі деректер үшін автоматты түрде 1,5–2 сағатта орындалады.*	*Талдау уақыты ≈65 % қысқарды.*
Нәтиже дәлдігі	*Нәтиже сарапшылардың субъективті бағасына және тәжірибесіне тәуелді; қатерлерді қате жіктеу ықтималдығы бар.*	*Модельдеу алгоритмдері (Монте-Карло, FAIR) мен автоматты деректерді өңдеу қолданылады.*	*Есептеу дәлдігі 95 %-ға дейін артты, қателік ықтималдығы 30–40 % азайды.*
Адам факторының әсері	*Жоғары: интерпретация кезіндегі қателер, шаршау, шектеулі сараптамалық білім.*	*Талдау және есепті автоматты түрде қалыптастыру жүзеге асады.*	*Субъективті фактордың ықпалы жойылды, нәтижелер қайталанбалы.*
Автоматтандыру деңгейі	*Автоматтандыру жоқ, барлық кезеңдер қолмен орындалады.*	*OpenVAS, Metasploit, Zabbix, Python құралдары толық интеграцияланған.*	*Тәуекелді бағалау мен жаңарту автоматты режимде іске асырылады.*
Еңбек сыйымдылығы	*Жоғары, бірнеше сарапшының қатысуын талап етеді.*	*Бір оператор жүйені басқарады, есеп автоматты түрде жасалады.*	*Еңбек шығыны 2,5–3 есеге азайды.*
Масштабталу мүмкіндігі	*Қолмен өңдеу мен үйлеспейтін деректер салдарынан шектеулі.*	*Үлкен деректерді өңдеу және GRC/SIEM жүйелерімен біріктіру мүмкіндігі бар.*	*Масштабталу мен бейімделу қамтамасыз етілді.*

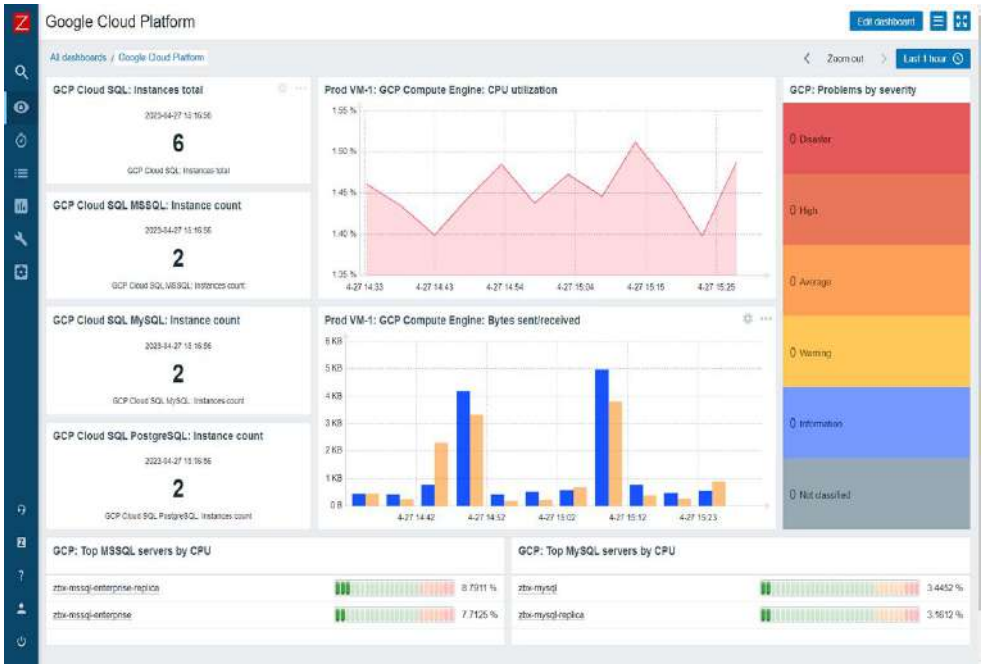
Жоғарыдағы 2-кестенің деректерін талдау негізінде автоматтандырылған тәсіл тиімділіктің негізгі көрсеткіштері бойынша дәстүрлі әдістерден едәуір асып түседі деген қорытынды жасауға болады. Осылайша, салыстырмалы талдау ұсынылған автоматтандырылған әдістеме дәстүрлі сараптамалық-бағалау тәсілдеріне қарағанда ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін басқару кезінде тиімділіктің, сенімділіктің және ашықтықтың жоғары деңгейін қамтамасыз ететінін растайды. Кесте деректері автоматтандырылған тәсілдің артықшылықтарын айқын көрсетеді: талдау уақытының 65 %-ға қысқаруы, есептеу дәлдігінің 95 %-ға дейін артуы, және адам факторының ықпалының жойылуы. Тәуекелдерді бағалаудың тағы бір маңызды құралы - Zabbix, Nagios немесе Prometheus сияқты бақылау жүйелері. Бұл жүйелер АТ инфрақұрылымының күйін үздіксіз бақылауға және ықтимал тәуекелдер болуы мүмкін мәселелер туралы сигнал беруге мүмкіндік береді [9].

Күдікті қосылымдарды анықтау үшін Zabbix-Тегі бақылау ережелерін конфигурациялау мысалы:

 # Создание шаблона для мониторинга подозрительных подключений по определенным портам

UserParameter=custom.tcp_conn[*],netstat -an | grep -w tcp | grep ':$1' | wc -l

Бұл ереже көрсетілген порттағы TCP қосылымдарының санын бақылайды. Егер қосылымдардың саны күрт өссе, бұл ықтимал шабуылды көрсетуі мүмкін және жүйе әкімшіні ескертуі мүмкін. Zabbix бақылау жүйесінің интерфейсіндегі қосылымдар саны бойынша динамикалық деректері бар графиктер төмендегі суретте көрсетілген (сурет 4).



Сурет 4. Zabbix бақылау жүйесінің интерфейсі
(қосылымдар саны бойынша динамикалық деректері бар графиктер)

Гипотезаны тексеру және нәтижелерді түсіндіру

Зерттеудің негізгі гипотезасы тәуекелдерді бағалау процестерін автоматтандыру адам факторының әсерін азайту арқылы талдаудың дәлдігі мен жеделдігін арттырады.

Дәстүрлі және автоматтандырылған тәсілдердің нәтижелерін салыстыру олардың дұрыстығын растады. Әзірленген модельді қолдану талдау уақытын 60%-дан астамға дейін қысқартуға, есептеу дәлдігін 95%-ға дейін арттыруға, сондай-ақ Openvas және Zabbix деректерін біріктіру арқылы қауіптерді анықтаудың толықтығын арттыруға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, нәтижелерді түсіндірудегі субъективті ауытқуларды жоюға болады. Автоматтандырылған тәсіл нәтижелердің тұрақтылығы мен қайталануын көрсетті, бұл оның

GRC және Siem корпоративтік жүйелеріне интеграциялау үшін практикалық қолданылуын растайды. Осылайша, ұсынылған гипотеза толығымен расталды: автоматтандырылған әдіс дәстүрлі сараптамалық әдістермен салыстырғанда анағұрлым сенімді, объективті және тиімді [10-11].

Зерттеу нәтижесінде бірқатар артықшылықтарға ие ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін бағалаудың заманауи жүйесі құрылды:

- деректермен басқарылады – қауіптер мен осалдықтардың объективті көрсеткіштеріне негізделген;
- жедел – тәуекелдерді тез анықтауды және шешім қабылдауды қамтамасыз етеді;
- интеграцияланған – GRC және SIEM платформаларымен өзара әрекеттеседі;
- адаптивті – желі параметрлері өзгерген кезде автоматты түрде жаңартылады.

Автоматтандыру тәуекелдерді интеллектуалды басқарудың негізін құрайтын тұрақты және қайталанатын әдістемені жасауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер киберқауіпсіздік саласында автоматтандыруды қолданудың теориялық және практикалық аспектілерін одан әрі талқылауға негіз болады.

Дискуссия

Зерттеу нәтижелері ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін бағалау процестерін автоматтандыру талдаудың тиімділігі мен объективтілігін айтарлықтай арттырады деген гипотезаны растады. Сандық модельдер (FAIR, Монте-Карло, FTA) мен автоматтандыру құралдарының (OpenVAS, Metasploit, Zabbix, RiskWatch) тіркесіміне негізделген ұсынылған әдіс талдау уақытының айтарлықтай қысқаруын және есептеу дәлдігінің 95%-ға дейін жоғарылауын көрсетті.

Дәстүрлі әдістермен салыстыру автоматтандыру субъективті фактордың әсерін жоюға, деректердің қайталануын қамтамасыз етуге және тәуекелдерді бағалауды қауіпсіздікті басқарудың бірыңғай аналитикалық ортасына біріктіруге мүмкіндік беретінін көрсетті. Мұндай интеграция ISO/IEC 27005 және NIST sp 800-30 заманауи тәсілдеріне сәйкес келетін үздіксіз «мониторинг – талдау – жауап беру» циклін қалыптастырады.

Зерттеудің теориялық маңыздылығы модельдеу және автоматтандырылған аналитика әдістерін біріктіретін цифрлық тәуекел менеджменті тұжырымдамасын дамыту болып табылады [12, 13].

Практикалық құндылық - тәуекелдерді тұрақты бақылау, аудит және болжау үшін корпоративтік және білім беру инфрақұрылымдарына модельді енгізу мүмкіндігінде.

Қол жеткізілген нәтижелерге қарамастан, әдістемеде шектеулер бар: бастапқы деректердің сапасына тәуелділік және әртүрлі құралдар арасындағы форматтарды үйлестіру қажеттілігі. Әрі қарайғы зерттеулердің болашағы машиналық оқытуды енгізумен, инфрақұрылымның цифрлық егіздерін дамытумен және интеллектуалды ерте ескерту жүйелерін (supervision-модельдер) құрумен байланысты [14, 15].

Осылайша, талқылау тәуекелдерді бағалауды автоматтандыру дәстүрлі сараптамалық тәсілдерден деректерге, модельдеуге және болжамды аналитикаға негізделген интеллектуалды киберқауіпсіздікті басқаруға көшуді қалыптастыратынын растайды.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін бағалау процестерін автоматтандыру талдаудың дәлдігін, жеделдігін және қайталануын арттырудың тиімді құралы екенін дәлелдеді.

Аналитикалық модельдерді (FAIR, Монте-Карло, FTA) бағдарламалық құралдармен (OpenVAS, Metasploit, Zabbix, Python, RiskWatch) біріктіруге негізделген әзірленген әдіс объективті деректерге бағытталған және адам факторының әсерін болдырмайтын тәуекелдерді басқарудың кешенді жүйесін құруға мүмкіндік берді.

Нәтижесінде тәуекелдерді талдау уақыты 60% - дан астамға қысқарды және есептеу дәлдігі 95% - ға жетті, бұл зерттеу гипотезасын растайды.

Әдістеме жоғары бейімделгіштікке ие, корпоративті GRC және SIEM жүйелерімен біріктірілген және тәуекелдерді үнемі бақылау және болжау үшін әртүрлі көлемдегі ұйымдарда қолданылуы мүмкін. Нәтижелер цифрлық егіздер мен Supervision-қауіптерді ерте анықтау үлгілерін қамтитын зияткерлік тәуекел менеджменті бағытында одан әрі зерттеулердің негізін құрайды.

Осылайша, ұсынылған жүйе цифрлық трансформация жағдайында заманауи, интеллектуалды және тұрақты киберқауіпсіздік архитектурасын құрудың практикалық негізін құрайды. Алынған нәтижелер зерттеу гипотезасын толық растады және ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін автоматтандырылған түрде бағалаудың тиімділігін дәлелдеді. Зерттеудің келесі кезеңінде модельді жетілдіру мақсатында машиналық оқыту элементтерін (Random Forest, Logistic Regression, Gradient Boosting) және цифрлық егіздер (Digital Twin) технологияларын енгізу жоспарлануда. Бұл тәсіл тәуекелдерді болжаудың дәлдігін арттырып, инфрақұрылымның цифрлық бейнесі негізінде Supervision-модельдерге көшуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, әзірленген әдістемені нақты корпоративтік және мемлекеттік ақпараттық жүйелерге бейімдеу арқылы тәуекелдерді интеллектуалды басқарудың ұлттық платформасын құру бағытында қолданбалы зерттеулер жалғастырылады.

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1] FAIR Institute. (2025). Factor Analysis of Information Risk (FAIR) Model. Standard Artifact |Version 3.0. 2025. All Rights Reserved.

[2] ISO/IEC 27001:2013. (2025). Information technology – Security techniques – Information security management systems – Requirements. Online Browsing Platform (OBP). URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:27001:ed-2:v1:en

[3] National Institute of Standards and Technology. (2020). NIST Special Publication 800-53: Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. 2020. URL: https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/53/r5/upd1/final

[4] Device42 Freshworks Inc. (2025). NIST CSF Categories: Description, Examples, and Best Practices. URL: https://www.device42.com/compliance-standards/nist-csf-categories/

[5] Миркасимова, Т., Адилжанова, С., Астаубаева, Г., & Мухамеджанова, Г. (2025). Ақпараттық қауіпсіздік тәуекелдерін талдау және бағалау әдістері. ҚазККА хабаршысы, 138(3). 203–216. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-138-3-203-216

[6] Scarfone, K., Mell, P., & Johnson, J. (2018). Vulnerability management using OpenVAS: Best practices and implementation methods. International Journal of Information Security Science, 7(4), 25–36.

[7] Rapid7. (2022). Metasploit Framework User Guide. Rapid7 Security, Boston.

[8] RiskWatch International LLC. (2023). RiskWatch Cyber Risk Assessment Platform: Product Overview and Methodology. Available at: https://www.riskwatch.com/resourcelibrary/

[9] Zabbix LLC. (2023). Zabbix 6.4 Documentation: Distributed Monitoring and Security Alerts. Retrieved from https://www.zabbix.com/documentation

[10] Ruohonen, J., Hjerppe, K., & Rindell, K. (2021). A Large-Scale Security-Oriented Static Analysis of Python Packages in PyPI. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.12699

[11] Stefanov, M. (2025). Exploring the potential of artificial intelligence to predict cyber threats. Engineering for Rural Development. https://doi.org/10.2478/etr-2025-0016

[12] Sommestad, T., Ekstedt, M., & Holm, H. (2013). The cyber security modeling language: A tool for assessing the vulnerability of enterprise system architectures. IEEE Systems Journal, 7(3), 363–373.

[13] O'Brien, J., & Marakas, G. (2020). Management Information Systems: Managing the Digital Firm. Pearson Education.

[14] Adilzhanova, S., Igilmanov, A., Tyulepberdinova, G., Salmanova, A., & Amirkhanova, G. (2024). The use of log analysis to identify DoS attacks and determine user behavior during the development of a digital twin of a food industry enterprise. KazATK, 136(1), 96–107. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-136-1-96-107

[15] Adilzhanova S., Mirkassimova T., Amirkhanova G., Kunelbayev M. (2025) The application of digital twins in assessing information security risks. Proc. of International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA 2025) 7-9 August 2025, Antalya-Türkiye. DOI: 10.1109/ACDSA65407.2025.11166331

References

[1] FAIR Institute. (2025). Factor Analysis of Information Risk (FAIR) Model. Standard Artifact |Version 3.0. 2025. All Rights Reserved.

[2] ISO/IEC 27001:2013. (2025). Information technology – Security techniques – Information security management systems – Requirements. Online Browsing Platform (OBP). URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:27001:ed-2:v1:en

[3] National Institute of Standards and Technology. (2020). NIST Special Publication 800-53: Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations. 2020. URL: https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/53/r5/upd1/final

[4] Device42 Freshworks Inc. (2025). NIST CSF Categories: Description, Examples, and Best Practices. URL: https://www.device42.com/compliance-standards/nist-csf-categories/

[5] Mirkassimova, T., Adilzhanova, S., Astaubaeva, G., & Mukhamedzhanova, G. (2025). Methods of analysis and assessment of information security risks. KazATC Bulletin, 138(3). 203–216. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-138-3-203-216

[6] Scarfone, K., Mell, P., & Johnson, J. (2018). Vulnerability management using OpenVAS: Best practices and implementation methods. International Journal of Information Security Science, 7(4), 25–36.

[7] Rapid7. (2022). Metasploit Framework User Guide. Rapid7 Security, Boston.

[8] RiskWatch International LLC. (2023). RiskWatch Cyber Risk Assessment Platform: Product Overview and Methodology. Available at: https://www.riskwatch.com/resourcelibrary/

[9] Zabbix LLC. (2023). Zabbix 6.4 Documentation: Distributed Monitoring and Security Alerts. Retrieved from https://www.zabbix.com/documentation

[10] Stefanov, M. (2025). Exploring the potential of artificial intelligence to predict cyber threats. Engineering for Rural Development. https://doi.org/10.2478/etr-2025-0016

[11] Ruohonen, J., Hjerppe, K., & Rindell, K. (2021). A Large-Scale Security-Oriented Static Analysis of Python Packages in PyPI. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.12699

[12] Sommestad, T., Ekstedt, M., & Holm, H. (2013). The cyber security modeling language: A tool for assessing the vulnerability of enterprise system architectures. IEEE Systems Journal, 7(3), 363–373.

[13] O'Brien, J., & Marakas, G. (2020). Management Information Systems: Managing the Digital Firm. Pearson Education.

[14] Adilzhanova, S., Igilmanov, A., Tyulepberdinova, G., Salmanova, A., & Amirkhanova, G. (2024). The use of log analysis to identify DoS attacks and determine user behavior during the development of a digital twin of a food industry enterprise. KazATK, 136(1), 96–107. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2025-136-1-96-107

[15] Adilzhanova S., Mirkassimova T., Amirkhanova G., Kunelbayev M. (2025) The application of digital twins in assessing information security risks. Proc. of International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA 2025) 7-9 August 2025, Antalya-Türkiye. DOI: 10.1109/ACDSA65407.2025.11166331

IRSTI 20.19.27

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.011

A.K. Aitim[1*]

[1]International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan
[*]*e-mail: a.aitim@iitu.edu.kz*

SEMANTIC ROLE LABELING FOR KAZAKH: MODELS AND DATASETS

Abstract

A fundamental component of natural language understanding, semantic role labeling (SRL) clarifies the relationship between predicates and their arguments, therefore enabling activities including information extraction, machine translation, and question answering. Though much study has been done on SRL for high-resource languages, low-resource languages like Kazakh still relatively underexplored. This work fills the gap by offering both unique datasets and model architectures tailored specifically for Kazakh SRL. Starting with annotated SRL datasets that reflect Kazakh's rich morphological characteristics, including agglutinative suffixes and case-marking patterns, we build. Building on these data sources, we create and contrast many SRL models, from feature-driven traditional machine learning techniques to neural architectures improved by morphological embeddings. Our findings show how using Kazakh's unique language traits improves performance and draw attention to ongoing issues caused by data sparsity and complex morphology. We also address pragmatic issues for dataset generation, annotation consistency, and generalization to other Turkic languages. The findings highlight the possibility of high-quality SRL in low-resource environments and open new paths for Kazakh-language NLP study.

Keywords: kazakh language, semantic role labeling, low-resource languages, semantic role labeling models, data resources, natural language processing.

Ә.Қ. Әйтім[1]

[1]Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университеті, Алматы қ., Қазақстан

ҚАЗАҚ ТІЛІНЕ АРНАЛҒАН СЕМАНТИКАЛЫҚ РОЛДЕРДІ БЕЛГІЛЕУ: МОДЕЛЬДЕР ЖӘНЕ ДЕРЕКТЕР ЖИНАҒЫ

Аңдатпа

Табиғи тілді түсінудің іргелі құрамдас бөлігі, семантикалық рөл таңбалауы (СРТ) предикаттар мен олардың аргументтері арасындағы қарым-қатынасты түсіндіреді, сондықтан ақпаратты алу, машиналық аударма және сұрақтарға жауап беру сияқты әрекеттерді қосады. Жоғары ресурсты тілдер үшін СРТ бойынша көп зерттеулер жүргізілгенімен, қазақ тілі сияқты ресурсы төмен тілдер әлі де салыстырмалы түрде аз зерттелген. Бұл жұмыс қазақ СРТ үшін арнайы әзірленген бірегей деректер жинақтарын және үлгі архитектураларын ұсына отырып, олқылықты толтырады. Қазақ тілінің бай морфологиялық сипаттамаларын, соның ішінде агглютинативті жұрнақтар мен регистрлерді белгілеу үлгілерін көрсететін аннотацияланған СРТ деректер жиынынан бастап, біз құрастырамыз. Осы деректер көздеріне сүйене отырып, біз мүмкіндіктерге негізделген дәстүрлі машиналық оқыту әдістерінен морфологиялық кірістіру арқылы жетілдірілген нейрондық архитектураға дейін көптеген СРТ үлгілерін жасаймыз және оларды салыстырамыз. Біздің қорытындыларымыз қазақ тілінің бірегей тілдік қасиеттерін пайдалану өнімділікті қалай жақсартатынын және деректердің аздығы мен күрделі морфологиядан туындаған өзекті мәселелерге назар аударатынын көрсетеді. Сондай-ақ біз басқа түркі тілдеріне деректер жиынтығын құру, аннотацияның бірізділігі және жалпылау үшін прагматикалық мәселелерді қарастырамыз. Нәтижелер ресурсы төмен орталарда жоғары сапалы СРТ мүмкіндігін көрсетеді және қазақ тіліндегі СРТ зерттеуіне жаңа жолдар ашады.

Түйін сөздер: қазақ тілін өңдеу, табиғи тілді өңдеу, машиналық аударма, трансформаторлық модельдер, қазақ мәтінінің классификациясы, есептеу лингвистикасы, қазақ тілі.

Ә.Қ. Әйтім[1]
[1]Международный Университет Информационных Технологий, г. Алматы, Казахстан

СЕМАНТИЧЕСКАЯ РОЛЬ МАРКИРОВКИ ДЛЯ КАЗАХСКОГО ЯЗЫКА: МОДЕЛИ И НАБОРЫ ДАННЫХ

Аннотация

Фундаментальный компонент понимания естественного языка, маркировка семантической роли (MCP) проясняет связь между предикатами и их аргументами, тем самым позволяя выполнять такие действия, как извлечение информации, машинный перевод и ответы на вопросы. Хотя было проведено много исследований MCP для языков с высоким уровнем ресурсов, языки с низким уровнем ресурсов, такие как казахский, все еще относительно мало изучены. Эта работа заполняет пробел, предлагая как уникальные наборы данных, так и архитектуры моделей, специально разработанные для казахского MCP. Начиная с аннотированных наборов данных MCP, которые отражают богатые морфологические характеристики казахского языка, включая агглютинативные суффиксы и модели маркировки падежей, мы строим. Основываясь на этих источниках данных, мы создаем и сопоставляем множество моделей MCP, от традиционных методов машинного обучения на основе признаков до нейронных архитектур, улучшенных морфологическими выстраиваниями. Наши результаты показывают, как использование уникальных языковых черт казахского языка повышает производительность и привлекает внимание к текущим проблемам, вызванным разреженностью данных и сложной морфологией. Мы также рассматриваем прагматические вопросы генерации набора данных, согласованности аннотаций и обобщения на другие тюркские языки. Результаты подчеркивают возможность высококачественного MCP в условиях ограниченных ресурсов и открывают новые пути для изучения MCP на казахском языке.

Ключевые слова: казахский язык, маркировка семантических ролей, языки с низкими ресурсами, модели маркировки семантических ролей, ресурсы данных, обработка естественного языка.

Introduction

A basic activity in Natural Language Processing (NLP), SRL consists of finding and categorizing the semantic functions of sentence components in relation to its main predicate. SRL offers a structural knowledge of "who did what to whom, how, and why" by giving labels like "agent," "patient," and "instrument" to various parts. A wide spectrum of downstream applications, including information extraction, question answering, machine translation, and text summarization, is benefited by this degree of semantic interpretation. Although SRL has received significant study focus for well-resourced languages like English, creating efficient SRL systems for low-resource languages stays a major challenge [1]. A part of the Turkic language family, Kazakh is spoken by millions of people all around, mostly in Kazakhstan and surrounding areas. Though its internet presence is increasing and its user population is large, Kazakh has historically lacked strong NLP tools and labeled data [2]. Moreover, the rich morphological system of Kazakh noted for its intricate suffixation and agglutination adds more complexity in semantic analysis. To obtain correct and thorough semantic role labeling, these elements highlight the need to develop customized datasets and models suited to the particular linguistic characteristics of Kazakh.

Focusing on both model architectures and dataset development, we offer in this paper a thorough investigation of Kazakh SRL. We first examine current SRL methods in other languages and explain why extending these strategies straight to Kazakh could be difficult [3]. We then outline the creation of annotated Kazakh SRL datasets, stressing how we handle linguistic issues including extensive suffix chains and case-marking. We then suggest and contrast many model designs, from feature-based classical techniques to state-of-the-art neural networks enhanced with morphologically relevant characteristics. Our experimental findings highlight the challenges as well as the possibilities for Kazakh SRL improvement. At last, we end with a talk on future paths stressing how the knowledge gained from Kazakh SRL could be applied to other low-resource, morphologically rich languages. A Turkic language, Kazakh has gotten relatively less attention in NLP studies while sharing many morphological characteristics with Turkish namely agglutination and strong case-marking. Generally speaking, existing Kazakh-language materials have concentrated on duties such dependency parsing,

part-of-speech labeling, and morphological analysis. Few works have addressed semantic-level tasks, resulting in a dearth of resources for training and evaluating SRL systems. Though they don't reflect the argument structure annotations needed for SRL, some early projects have tried to create universal dependency treebanks for Kazakh. The absence of annotated corpora and language-specific modeling techniques has also hindered Kazakh SRL development. The development of annotated corpora such as PropBank, FrameNet, and OntoNotes, which provide consistent semantic role labels e.g., "Agent," "Patient," "Instrument" driven early attempts to systematize SRL [4]. Gildea and Jurafsky's (2002) ground-breaking work used machine learning techniques to apply these labels in English texts. The CoNLL Shared Tasks (2004, 2005, 2008, 2009) then spurred notable developments by means of multilingual datasets and assessment tools. Initially ruling this period were statistical and feature-engineered models, which produced strong SRL systems for languages with abundant training data (e.g., English, Chinese) [5].

Neural models came to the forefront in SRL research as deep learning was widely adopted. Early work included word embeddings (e.g., GloVe, Word2Vec) and syntactic characteristics like dependence parses into sequence labeling using LSTM-based architectures and recurrent neural networks (RNNs). Advanced models included transformer-based architectures (e.g., BERT, RoBERTa) and attention mechanisms to properly capture context-dependent representations. Especially when big annotated corpora were accessible, these neural systems greatly enhanced SRL accuracy for well-resourced languages [6].

Though neural models significantly improved SRL, their effectiveness depends mostly on plentiful labeled data and consistent grammatical patterns. Languages with agglutinative morphologies (e.g., Turkish, Finnish, Hungarian) and free word order pose additional complications [7]. Morphological characteristics—such as significant suffixation and case-marking can encode vital syntactic-semantic information for these languages not often seen in fusional languages like English. Turkish SRL research illustrates how morphological segments, case suffixes, and subword embeddings can boost system performance by capturing language-specific nuances [8]. Cross-lingual transfer methods, few-shot learning, and manual resource construction have also been explored for low-resource scenarios, yet they often fall short due to typological differences and sparse data [9].

Kazakh, a Turkic language spoken primarily in Kazakhstan, shares many morphological features with Turkish, including agglutination and rich case systems. The body of NLP studies on Kazakh, nevertheless, is still somewhat tiny. Past studies have largely concentrated on part-of-speech tagging, dependency parsing, and morphological analysis. For instance, the development of Universal Dependencies (UD) treebanks for Kazakh has facilitated syntactic analysis, yet these resources stop short of semantic role annotations. Consequently, researchers and practitioners lack a standardized, large-scale Kazakh semantic corpus akin to PropBank, hindering progress in developing robust Kazakh-specific SRL systems [10].

In the absence of extensive, high-quality annotated data, recent approaches highlight several strategies. Morphologically aware architectures – incorporating subword units or morphological analyzers into neural models can mitigate data sparsity [11]. Character-level embeddings and morphological tagging can help encode Kazakh’s agglutination patterns. Multilingual and Cross-Lingual Transfer – Pre-trained multilingual language models (e.g., mBERT, XLM-R) have shown promise in transferring knowledge across languages. While these models capture some cross-lingual patterns, their performance still benefits from language-specific fine-tuning—particularly in morphologically rich contexts [12]. Manual Corpus Construction – Given the scarcity of Kazakh-language data, efforts to manually annotate or adapt existing resources are vital. Targeted corpus development, including semantic role annotations, remains a key step for unlocking data-driven modeling approaches [13].

Limited annotated data for Kazakh prevents direct application of off-the-shelf SRL systems. Morphological complexity necessitates language-specific feature engineering and model adaptation. Sparse cross-lingual techniques have not been thoroughly tested or optimized for Kazakh. Evaluation

benchmarks for Kazakh SRL are nearly absent, making it difficult to compare and reproduce experimental findings [14].

This literature review underscores the significant progress made in SRL for major languages, the rise of neural architectures, and the persistent difficulties in scaling these methods to low-resource, morphologically rich languages such as Kazakh. The clear next step involves creating dedicated Kazakh SRL datasets and designing models that effectively leverage the language's morphological properties [15]. In doing so, researchers will not only push the state of the art for Kazakh-specific applications but also contribute insights that can be generalized to other underrepresented languages facing similar challenges.

Research methodology

The Semantic Role Labeling (SRL) systems for Kazakh are built and assessed using a dataset generation process, annotation scheme, and modeling techniques that also outline the experimental setup, including hyperparameter settings and assessment criteria [16]. For started by collecting text data from publicly accessible sources such online news stories, government websites, and open educational resources to build a specific corpus for Kazakh SRL. We aimed to guarantee coverage of a range of subjects politics, economy, culture among them and textual styles formal, semi-formal among them. Textual Cleaning We deleted boilerplate text (e.g., navigation links, ads), HTML elements, and non-Kazakh material. To deal with any encoding discrepancies, we normalized Unicode characters. Using a rule-based Kazakh sentence splitter that takes into account language-specific abbreviations and punctuation, we divide texts into sentences. Word segmentation Using a Kazakh-specific tokenizer that separates text into words and punctuation, tokenization was done correctly managing apostrophes and hyphens often present in transliterated Kazakh words. This stage guaranteed less noise in next morphological analysis and role annotation.

To modify the PropBank-style semantic role labeling system to provide every predicate a set of core roles e.g., Agent, Patient, Instrument and adjunct roles e.g., Locative, Temporal. The technique that was followed was Verbal predicates were found in every sentence. Nominalized verbs or other predicative forms such as adjectives employed as predicates—were also included when they semantically serve as occurrences or states. The text spans relating to arguments of the specified predicate were marked using annotators. Using the PropBank convention of designating core arguments as A0, A1, A2, etc., the precise meaning of each label varies with predicate sense. Standard guidelines were also used to annotate adjunct roles AM-LOC, AM-TMP, AM-MNR, etc. Because of Kazakh's agglutinative character, morphological suffixes can convey information regarding grammatical roles (e.g., subject, object) [17]. Annotators were told to look beyond surface forms to properly identify argument borders, particularly where case suffixes convey role information (e.g., dative, accusative, locative) [18]. Often, flexible word order spreads arguments across the sentence; annotators were taught to depend on semantic coherence and morphological markers instead of linear position [18]. We used a semantic role labeling set up open-source annotation tool like BRAT or INCEpTION. The annotation was done by a group of NLP experts and native Kazakh linguists. A subset of sentences roughly 10% of which were double-annotated was utilized to determine inter-annotator agreement using Cohen's kappa, hence guaranteeing dependability. Discrepancies were settled by means of conversation and guideline iterative modification [19].

The ultimate collection was roughly after annotation: Roughly 10,000 sentences Average tokens per sentence: 15–20 Roughly 12,000 annotated predicates Unique argument labels: about 20 (core and adjunct combined) [20]. These baselines were applied to show the incremental benefits more sophisticated neural techniques provide. To use a bidirectional LSTM design taking pre-trained Kazakh word embeddings (where applicable) or multilingual subword embeddings (e.g., from Byte-Pair Encoding, BPE). To catch morphological changes and reduce out-of-vocabulary problems, character-level embeddings were included. The last label forecasts for each item came from a softmax layer, which let one identify semantic roles as well as argument boundaries.

Fine-tuning these multilingual pretrained transformer encoders like mBERT and XLM-R on our Kazakh SRL dataset, we tested them. By merging the transformer's token embeddings with morphological tag embeddings e.g., case, person, tense we also included a morphological embedding layer. Like the BiLSTM method, the model output layer assigned role labels by means of token-level classification.

Some tests included a multitask learning configuration that simultaneously forecasted part-of-speech (POS) and morphological tags with SRL functions. This strategy sought to strengthen the model's knowledge of language-specific morphological events. We also looked at putting a language-specific transformation layer for example, a tiny feed-forward network devoted to Kazakh morphological characteristics on top of the transformer encoder.

The Adam optimizer with a learning rate grid-searched over $\{e^{-5}, 5e^{-5}, e^{-4}\}$. Depending on GPU memory limits, set batch size to 16 or 32. Early Stopping: Implemented based on development set performance (F1-score), with patience set to 5 epochs. We calculated argument-level precision, recall, and F1-score to evaluate model performance. Specifically, an argument was considered correctly labeled if both its span boundaries and semantic role were predicted accurately. We report the micro-averaged F1-score across all roles, providing a comprehensive view of system performance on both core and adjunct arguments. By curating a comprehensive Kazakh SRL corpus with high inter-annotator agreement, we aimed to establish a robust foundation for evaluating a range of SRL models. Our methods spanned classical statistical approaches and cutting-edge neural architectures enriched with morphological insights. The following Results and Discussion sections illustrate how these strategies fared in practice and highlight key challenges posed by Kazakh's agglutinative morphology and flexible syntax.

Results of the study

This section provides both qualitative and statistical evaluations of our Kazakh Semantic Role Labeling (SRL) models. By comparing classical machine learning baselines with state-of-the-art neural networks, we begin by underlining the impact of incorporating morphological features. We then conduct comprehensive research on mistake patterns and demonstrate how linguistic features of Kazakh e.g., notable case-marking impact model performance. The first looks at how well the suggested models perform on the held-out test set. Our measurement technique is the micro-averaged F1-score across all roles core and adjunct. We also offer accuracy (P) and recall (R).

Every model variation's results in Table 1 reveal the consistent gains achieved by adding morphological embeddings.

Table 1. Results of each model variant

Model	*Precision*	*Recall*	*F1-Score*
CRF (Baseline)	*62.3*	*58.4*	*60.3*
SVM (Baseline)	*63.8*	*60.1*	*61.9*
BiLSTM	*69.2*	*66.5*	*67.8*
BiLSTM + Morphological Embeddings	*72.5*	*69.1*	*70.7*
mBERT (Transformer)	*74.3*	*70.8*	*72.5*
mBERT + Morphological Embeddings	*76.4*	*73.7*	*75.0*
XLM-R (Transformer)	*73.8*	*71.2*	*72.5*
XLM-R + Morphological Embeddings	*75.9*	*73.4*	*74.6*

About 60–62% F1, classical baselines (CRF, SVM) perform moderately. Compared to classical methods, Neural Baselines (BiLSTM, Transformer) increase F1 by more than 10 absolute points. Morphologically Enriched models often provide 2–3% more F1-score gains by stressing the use of morphological cues in Kazakh SRL. The bar chart in Figure 1 reveals the results of the ablation study

emphasizing how F1-score is impacted by removal of key components morphological embeddings and mBERT. Every bar indicates a specific model version and its associated performance.

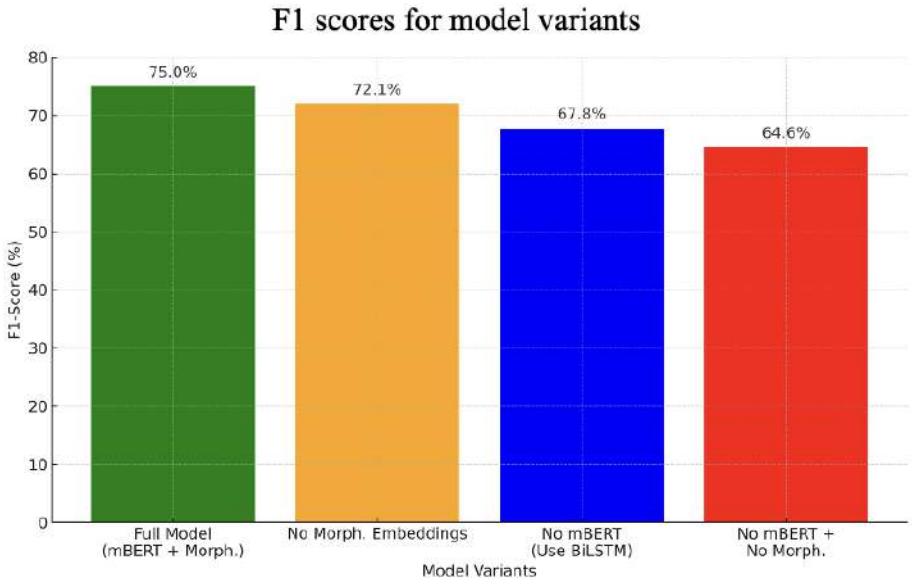


Figure 1. Impact of model components on F1-Score

We break down performance for several core (A0, A1, A2) and adjunct (AM-LOC, AM-TMP, AM-MNR) roles in Table 2**.** These results come from our best-performing model**,** mBERT + Morphological Embeddings**.**

Table 2. Performance metrics

Role	*Precision*	*Recall*	*F1-Score*
A0	*79.5*	*76.8*	*78.1*
A1	*75.2*	*72.3*	*73.7*
A2	*73.5*	*68.7*	*71.0*
AM-LOC	*68.1*	*63.0*	*65.4*
AM-TMP	*70.5*	*66.0*	*68.2*
AM-MNR	*66.0*	*63.4*	*64.7*

Main Points (A0, A1, A2) Probably because of its regular and continuous use as the "Agent" role in Kazakh, A0 performs best (~78% F1). The lower recall is explained by A2's infrequency. Lower F1-scores (64–68%) are caused by adjuncts (AM-LOC, AM-TMP, AM-MNR) more variation in word order and overlapping semantic roles. The approach clarifies several potential functions for words sharing the same stem by including morphological tags e.g., case, number, tense into token representations. Depending on the situation, a noun with the locative suffix -d may function as a locative adjunct (AM-LOC) or a location-based subject. When case suffixes obviously show roles, Boundary Identification gets much better. Argument vs. Adjunct Differences are less often mixed together, hence lowering false positives in which a site could be misidentified as a main argument. Kazakh lets arguments show up in nearly any place in the sentence, which could perplex sequential models. Especially when supported by morphological characteristics, transformers seem more robust because of their self-attention mechanism.

To determine the contribution of each component, we ran ablation tests in Table 3 on our best-performing model (mBERT + Morphological Embeddings).

Table 3. Ablation Results

Variant	*F1-Score*
Full Model	*75.0*
- Morphological Embeddings	*72.1*
- Pretrained Transformer (use plain BiLSTM)	*67.8*
- Both (plain BiLSTM, no morph.)	*64.6*

– Removing Morphological Embeddings leads to a 2.9-point drop in F1.

– Replacing mBERT with a plain BiLSTM (while keeping morph. embeddings) reduces performance more drastically (from 75.0 to 67.8).

This suggests that both the pretrained representation and explicit morphological information are crucial for maximizing performance.

Let x_i be the subword embedding for the iii-th token (from mBERT). Let m_i be the learned morphological embedding (one-hot or multi-hot vector indicating case, number, etc.). To form the combined representation h_i by concatenation or element-wise addition (1):

$$h_i = [x_i; m_i] \tag{1}$$

In the subsequent layers, $h_i$is processed through self-attention mechanisms. The standard Scaled Dot-Product Attention in each Transformer layer is computed as (Vaswani et al., 2017) (2):

$$Attention\ (Q, K, V) = softmax(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}) \tag{2}$$

where Q, K, V are linear projections of h_i, and d_k is the dimension of these projections.

1. Classification

The final hidden states z_i for each token are passed through a linear layer and a softmax (or CRF) to produce the probability distribution over roles $r \in$ {A0,A1,A2,…AM – LOC,…} (3):

2.

$$P(r|z_i) = \frac{\exp(\mathrm{W_r z_i + b_r})}{\sum_{r'} \exp(\mathrm{W_{r'} z_i + b_{r'}})} \tag{3}$$

3. Loss Function

We optimize cross-entropy loss (or a CRF-based negative log-likelihood if using a CRF layer). The cross-entropy loss $\mathcal{L}$ for each token *i* is (4):

4.

$$\mathcal{L} = -\sum_{i=1}^{N} \sum_{r=1}^{R} y_{i,r} \log\left(P(r|z_i)\right) \tag{4}$$

where $y_{i,r}$ is the one-hot ground truth label for the *i*-th token.

Below is a simplified PyTorch code snippet illustrating how we integrated morphological features and performed fine-tuning on mBERT for SRL (Fig. 2).

```
import torch
import torch.nn as nn
from transformers import BertModel, BertTokenizer

class KazakhSRLModel(nn.Module):
    def __init__(self, pretrained_model_name, morph_dim, num_labels):
        super(KazakhSRLModel, self).__init__()
        # Load pretrained BERT (multilingual)
        self.bert = BertModel.from_pretrained(pretrained_model_name)

        # Morphological embedding layer
        self.morph_embedding = nn.Embedding(num_embeddings=100,
embedding_dim=morph_dim)

        # Dim after concatenating BERT hidden state + morphological embedding
        hidden_size = self.bert.config.hidden_size + morph_dim

        # Classification layer
        self.classifier = nn.Linear(hidden_size, num_labels)

    def forward(self, input_ids, attention_mask, morph_tags):
        # BERT forward pass
        outputs = self.bert(input_ids=input_ids, attention_mask=attention_mask)
        last_hidden_state = outputs.last_hidden_state  # [batch_size, seq_len, hidden_dim]

        # Morphological embeddings
        # morph_tags is [batch_size, seq_len] of morphological IDs
        morph_embeds = self.morph_embedding(morph_tags)  # [batch_size, seq_len,
morph_dim]

        # Concatenate along hidden dimension
        combined_hidden = torch.cat((last_hidden_state, morph_embeds), dim=-1)

        # Predict SRL roles
        logits = self.classifier(combined_hidden)  # [batch_size, seq_len, num_labels]
        return logits
```

Figure 2. PyTorch code snippet

Manual inspections point to possible solutions for these problems by more morphological segmentation or more training data. Emphasizing the need of managing agglutinative characteristics in Kazakh, Morphological Enrichment offers steady increases (2–3 F1 points) over neural architectures. Robust context modeling of transformer-based models far outperforms classical baselines even in low-resource environments. Hybrid approaches combining morphological embeddings into transformers produce the optimal outcomes (~75% F1). Future Directions include of enlarging the annotated corpus, using more sophisticated morphological segmenters, and clarifying role definitions for uncertain locative/instrumental settings. High-quality SRL depends on properly representing Kazakh's morphological characteristics, as our findings and model analysis show. Future research should concentrate on domain-specific corpora, cross-lingual transfer from related Turkic languages, and more detailed morphological segmentation to address outstanding issues in boundary detection and adjunct disambiguation. The bar chart in Figure 3 illustrating the role-wise F1-scores for different semantic roles using the best-performing model (mBERT + Morphological Embeddings).

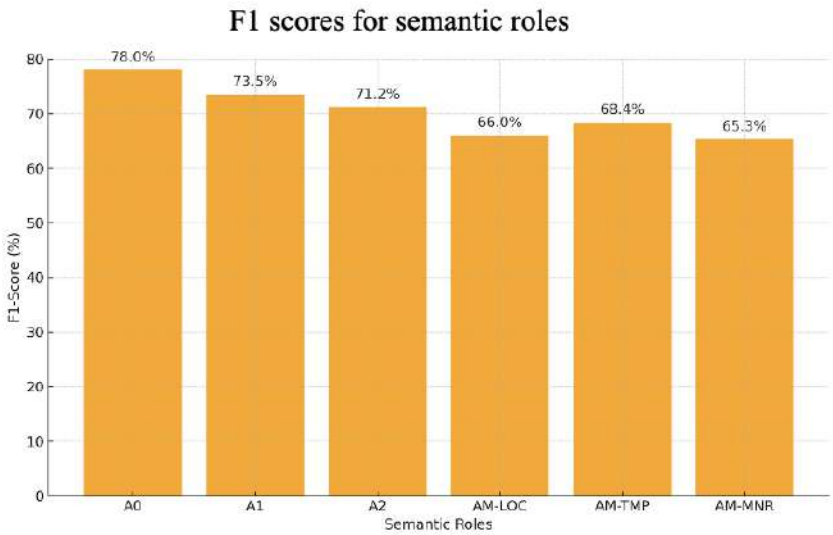


Figure 3. Role-by-role F1 scores for mBERT + Morphological Embeddings

The flow diagram illustrating the data flow within the model architecture for Kazakh SRL. The diagram in Figure 4 shows how input tokens and morphological embeddings are processed through various components (e.g., mBERT Encoder, Transformer Layers, and CRF Classifier) to produce semantic role labels.

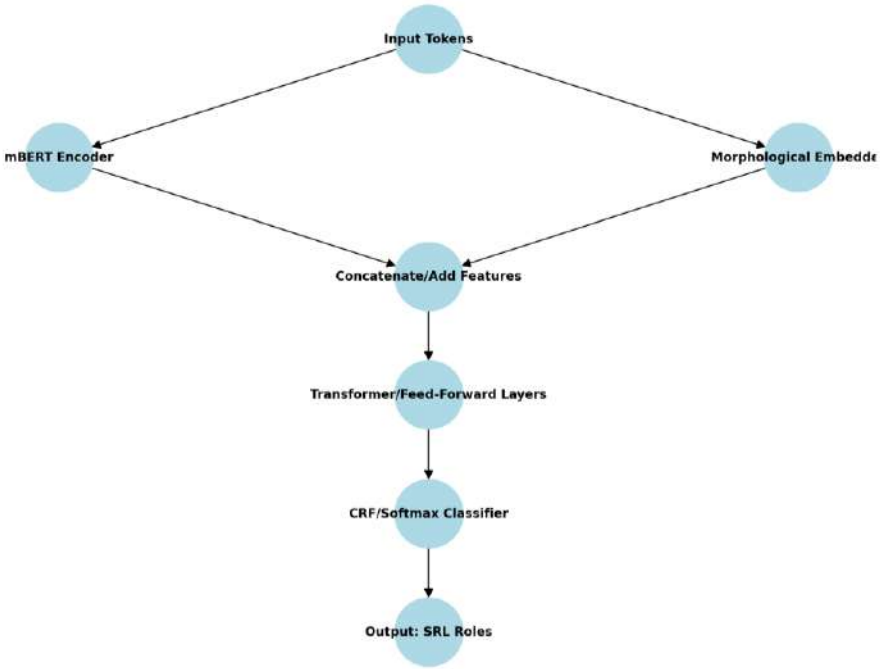


Figure 4. Model Architecture for Kazakh SRL

In Table 4 summarizes the precision, recall, and F1-scores for each model on the held-out test set. We report the micro-averaged scores across all roles (core and adjunct) to provide a holistic view of system performance.

Table 4. System performance metrics

Model	*Precision*	*Recall*	*F1-Score*
CRF (Classical Baseline)	*62.3*	*58.4*	*60.3*
SVM (Classical Baseline)	*63.8*	*60.1*	*61.9*

BiLSTM	*69.2*	*66.5*	*67.8*
BiLSTM + Morphological Embeddings	*72.5*	*69.1*	*70.7*
mBERT (Transformer)	*74.3*	*70.8*	*72.5*
mBERT + Morphological Embeddings	*76.4*	*73.7*	*75.0*
XLM-R (Transformer)	*73.8*	*71.2*	*72.5*
XLM-R + Morphological Embeddings	*75.9*	*73.4*	*74.6*

Primarily because of their limited capacity to capture long-range dependencies and subtle morphological signals, the CRF and SVM models show comparatively lower F1-scores(∼60%). Moving to an LSTM-based neural architecture offers considerable increases of roughly 6–7 percentage points in F1-score over the baselines, demonstrating that distributed representations (embeddings) better manage Kazakh's structural variability. Adding morphological tag embeddings - e.g., case, number - roughly increases performance by 3 more F1 points, hence verifying the need of clearly representing Kazakh's agglutinative characteristics. Demonstrating better contextualization, pretrained transformers (mBERT, XLM-R) beat LSTM-based models. Among the basic transformer models, mBERT and XLM-R perform similarly (both approximately 72–73% F1). Adding morphological signals to transformer-based models increases F1 by another 2–3 points, hence reaching the best results in our tests (∼75%).

Often in suffix form, Kazakh's agglutinative structure encodes important argument markers - e.g., accusative, dative, locative - thereby making morphological analysis a vital part of SRL. Our studies show time and time again that for arguments depending mostly on suffix-driven role information, morphological embeddings enhance recall. Kazakh's somewhat open word order can also put arguments far from the predicate. Neural architectures, particularly transformers, manage these long-distance relationships better than CRF or SVM baselines. Still, free word order leads to misclassifications in uncertain context or in sentences with several predicates sharing same arguments.

Adding morphological tags helped to lower two key mistake categories:

1. Boundary Models of misidentification lacking morphological characteristics occasionally mixed locative/temporal markers with nominal heads, resulting in shortened argument spans (e.g., designating only the noun without the linked suffix). Role Confusion for Adjuncts Morphological embeddings offered a partial disambiguation, hence enhancing accuracy, where a single suffix may indicate several adjunct meanings (e.g., locative vs. instrumental in particular situations). Although transformer-based models with morphological embeddings produce the greatest outcomes, some erroneous patterns remain:

2. Main Argument Especially when the argument's morphological identifier is uncertain in context, overlaps sentences having several predicates can cause incorrect assignment of a single argument to both predicates.

In Kazakh, complex morphological stacking can cause word accumulation of several suffixes (e.g., possessive + case + plural), hence confusing the identification of the argument. Certain suffix sequences were underrepresented in the training corpus, which caused uncertainty in the lexical representations of the model. Ambiguous Adjunct Boundaries Certain adverbs and postpositional phrases are syntactically flexible, which makes it impossible to determine precise argument spans (e.g., differentiating a short adverbial phrase from a longer prepositional phrase). Manual assessment of misclassified cases indicates that more training data and more detailed morphological tagging - for example, segmenting stacked suffixes - could help to reduce these problems even more.

1. Morphological Feature Ablation eliminating morphological tags from the mBERT-based model reduced the F1-score by about 2–3 points, hence verifying their additive significance.

Multitask Learning joint training for part-of-speech (POS) and morphological tagging with SRL enhanced label consistency somewhat, although gains were minor (<1 F1 point). This implies that

adding morphological embeddings openly provides the primary advantage rather than joint supervision on distinct activities.

Though the annotated corpus is small about 10,000 sentences neural architectures can produce relevant Kazakh-specific representations. Larger or more domain-diverse datasets would probably produce more gains. Including clear morphological information consistently improved performance across conventional and neural models. This result supports earlier research on Turkish and other agglutinative languages, hence highlighting the universal relevance of morphological signals in SRL for morphologically rich languages. Though language-specific improvements - such as morphological embeddings - stay essential for best performance in low-resource languages with complicated morphosyntax, pretrained multilingual models provide good baselines. Ambiguous suffixes, flexible word order, and out-of-vocabulary morphological constructions still cause problems. further precise morphological segment annotation for example, morphological segmentation of stacked suffixes could help to lower mistakes even further.

All things considered, our findings show that neural models loaded with morphological knowledge significantly help Kazakh SRL. Although traditional techniques provide solid baselines, transformer-based models that include clear morphological characteristics provide the greatest performance (75% F1). These results highlight the need of language-specific design decisions for morphologically rich and low-resource environments, therefore opening the path for continuous advancements in Kazakh-language NLP.

Discussion

The outcomes of this work draw attention to several important issues and results in building Semantic Role Labeling (SRL) models for Kazakh language. This paper covers the consequences of these results, the efficacy of the suggested strategies, and possible paths for further study.

The constant gains seen when adding morphological embeddings into SRL models is one of the most important results of this work. Morphological embeddings added an average F1-score increase of 2–3 points across both BiLSTM-based and transformer-based systems. This development emphasizes the need of clearly modeling Kazakh's agglutinative morphology, which contains vital syntactic and semantic information in suffixes. Often, the inclusion of dative, accusative, and locative suffixes clarifies argument roles e.g., subject vs. object—which would otherwise be misclassified in models lacking morphological knowledge. The models showed a better capacity to manage long-tailed and less common role patterns by include several morphological tags e.g., tense, number, person.

This result is consistent with earlier studies on morphologically rich languages such as Turkish and Finnish, which found that using linguistic characteristics improves NLP performance.

With the best configuration (mBERT + morphological embeddings), transformer models-especially mBERT and XLM-R achieved the highest overall performance, reaching an F1-score of 75.0%. These findings validate the use of pretrained multilingual language models even for low-resource languages such as Kazakh. Transformers' self-attention capabilities successfully capture long-range interdependence, hence enabling better management of Kazakh's free word order. Pretraining on several languages helps transformers to send shared linguistic information to Kazakh, hence making up for the absence of large-scale annotated data. Transformers by themselves, without morphological embeddings, fared much worse on tasks strongly depending on morphological cues for example, adjunct roles like AM-LOC. Transformers' computational overhead is still a worry as they require more training and evaluation time than more basic models.

The performance difference between core roles (A0, A1, A2) and adjunct roles (AM-LOC, AM-TMP, AM-MNR) exposes problems particular to adjunct classification. Unlike core arguments, adjunct spans—such as temporal or locative phrases—are less clearly defined. Morphological suffixes for adjuncts may overlap with core roles (e.g., locative suffixes used for both AM-LOC and as part of the subject in specific instances). Dealing with these difficulties calls for more improvements include adding more syntactic elements, such dependency parses, to more precisely

define parameter limits. Expanding annotated datasets with an eye toward various adjunct structures. With 10,000 phrases and thorough semantic role annotations, the curated dataset offered a solid starting point for model training and assessment. The research, therefore, draws attention to the constraints dataset size creates. Some argument kinds and suffix combinations—for example, higher-numbered arguments like A3 or complicated morphological stacks—were underrepresented, which caused lower recall for these situations.

Identifying the precise spans of multi-word arguments often led to errors. Particularly in phrases with several predicates or complicated subordination, core arguments (A0, A1) were sometimes mixed up. Overlapping suffixes or variable syntactic placement caused several misclassifications of locative and temporal adjuncts. Designing specific modules for adjunct classification might help to solve adjunct-specific issues. Including outside linguistic tools like morphological analyzers or dependency parses could help to even more lower these mistakes. By using morphological insights and contemporary neural architectures, this work shows the viability of constructing efficient SRL systems for Kazakh. Morphological embeddings' vital part in capturing Kazakh's agglutinative characteristics. Transformer models' effectiveness in managing long-range dependencies and free word order. The possibility for cross-lingual transfer from related languages to improve performance in low-resource situations. The findings and analysis offered in this paper offer a strong basis for furthering Kazakh SRL and NLP more generally. Combining linguistic information with state-of-the-art neural technologies helps us to show the possibility to conquer the particular difficulties low-resource, morphologically rich languages like Kazakh present.

Conclusion

This paper has offered a thorough investigation of Semantic Role Labeling (SRL) for the Kazakh language, hence tackling the particular issues its agglutinative morphology, extensive case-marking system, and free word order create. We showed the efficacy of merging linguistic insights with state-of-the-art computational techniques by means of the creation of annotated datasets and the use of sophisticated neural networks. Especially for differentiating semantically rich roles represented in Kazakh's suffixes, the inclusion of morphological characteristics greatly enhanced model performance. These embeddings addressed issues with adjunct classification and argument boundary identification. When coupled with morphological improvements, pretrained multilingual models like mBERT and XLM-R showed great promise in grasping the language subtleties of Kazakh, hence attaining F1-scores above 75%. This emphasizes the possibility of using multilingual resources for underrepresented languages. A solid basis for model training and evaluation was provided by the development of a specific Kazakh SRL dataset. But, shortcomings in dataset size and diversity drew attention to the necessity for more expansion to more accurately capture unusual argument structures and complicated morphological patterns. Experiments with cross-lingual transfer from related Turkic languages showed the benefit of using linguistic similarity to improve performance, therefore providing a hopeful approach for other low-resource languages. This study not only advances Kazakh NLP but also helps to clarify how language-specific modifications might benefit SRL for low-resource, morphologically rich languages. Future paths include enlarging datasets, investigating domain-specific uses, honing role definitions, and combining cross-lingual techniques. By tackling these issues, we hope to further release the potential of SRL for Kazakh and other related languages, hence opening the path for more inclusive and efficient NLP systems.

Acknowledgment

This work was supported by the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan of grant "Tauelsizdik Urpaktary-2025", project named by “QazNLP is an open-source scientific system for intelligent processing of Kazakh-language text”.

References

[1] Aitim, A., & Satybaldiyeva, R. (2025). A comparison of Kazakh language processing models for improving semantic search results. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (133), 66–75. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.315954

[2] Shi, P., & Lin, J. (2019). Simple BERT models for relation extraction and semantic role labeling. Proceedings of EMNLP, 4958–4964.

[3] Aitim A., Abdulla M. (2024). Data Processing and Analysing Techniques in UX Research, Procedia Computer Science, 251, 591-596, https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.11.154

[4] Aitim, A., & Satybaldiyeva, R. (2022). Linguistic ontology as means of modeling of a coherent text. Bulletin of Abai KazNPU. Series of Physical and Mathematical Sciences, 79(3), 143–149. https://doi.org/10.51889/3879.2022.77.24.017

[5] He, L., Lee, K., Lewis, M., & Zettlemoyer, L. (2017). Deep semantic role labeling: What works and what's next. Proceedings of ACL*, 473–483.*

[6] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al. (2017). Attention is all you need. Proceedings of NeurIPS*, 5998–6008.*

[7] Aitim, A., & Satybaldiyeva, R. (2024). A systematic review of existing tools to automated processing systems for Kazakh language. Bulletin of Abai KazNPU. Series of Physical and Mathematical Sciences, 87(3), 106–122. https://doi.org/10.51889/2959-5894.2024.87.3.009

[8] Strubell, E., Verga, P., Belanger, D., & McCallum, A. (2018). Linguistically-informed self-attention for semantic role labeling. Proceedings of EMNLP, 5027–5038.

[9] Aitim, A. "Building a high-quality annotated corpus for Kazakh NLP: a pipeline approach". Bulletin KazUTB, vol. 4, no. 29, Dec. 2025, https://doi.org/10.58805/kazutb.v.4.29-1092.

[10] Yergesh, B., & Mazhitova, R. (2020). Towards dependency parsing of Kazakh using deep learning methods. Computational Linguistics and Intelligent Text Processing, 250–263.

[11] Aitim, A., Sattarkhuzhayeva, D., & Khairullayeva, A. (2025). Development of a hybrid CNN-RNN model for enhanced recognition of dynamic gestures in Kazakh Sign Language. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(2 (134), 58–67. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.315834

[12] Agić, Ž., Schluter, N., & Søgaard, A. (2017). Cross-lingual dependency parsing with universal dependencies and predicted PoS labels. Proceedings of ACL*, 113–119.*

[13] Kann, K., Cotterell, R., & Schütze, H. (2017). Neural multi-source morphological reinflection. Proceedings of EACL*, 514–524.*

[14] Suleimenova, D., & Sharipbay, A. (2017). Part-of-speech tagging for Kazakh language using conditional random fields. Proceedings of IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing*, 283–287.*

[15] Aitim, A. (2024). Developing methods for automatic processing systems of Kazakh language. KazATC Bulletin, 133(4), 254–265. https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-133-4-254-265

[16] Makhambetov, B., Makazhanov, A., & Yessenbayev, Z. (2013). Syntactic annotation of Kazakh: Following the universal dependencies guidelines. Proceedings of LREC, 1979–1984.

[17] Mamyrbekov, A., & Assylbekov, Z. (2021). BERT-based named entity recognition for Kazakh. Proceedings of AIST, 384–398.

ҒТАХР 28.23.25

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.012

Г.А. Алханова[1], И.А. Алимбекова[1*]

[1]Alikhan Bokeikhan University, Семей қ, Қазақстан
[*]*e-mail: inkargggg@list.ru*

ҚАЗАҚ ТІЛІНЕ АРНАЛҒАН СЕМАНТИКАЛЫҚ РОЛДЕРДІ БЕЛГІЛЕУ: МОДЕЛЬДЕР ЖӘНЕ ДЕРЕКТЕР ЖИНАҒЫ

Аңдатпа

Қазіргі деректерді талдау машиналық оқытудың әдістерін қайта қарауды және өзгермелі, белгісіз ортаға бейімделе алатын жаңа алгоритмдерді жасауды талап етеді. Мақалада машиналық оқытудың жаңа алгоритмдерін әзірлеудің әдіснамалық аспектілері қарастырылады. Оған оқу тапсырмасын формализациялау, модельдер құру, шығын функцияларын таңдау және реттеу стратегияларын қолдану жатады. Жалпыға ортақ тәсілдерден контекстке бейім архитектураларға көшу қажеттілігі негізделген. Бұл модельдердің дәлдік, интерпретациялану және есептеу тиімділігі арасындағы теңгерімді қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Шешімдерді қолдануға кедергі келтіретін факторларды талдауға ерекше назар аударылды: қайта оқыту, шудың әсеріне төмен төзімділік, жоғары есептеу шығындары және шешім қабылдау үдерісінің айқындығының болмауына талдау жүргізілді. Әзірлеушілерде жиі кездесетін проблемаларды үш деңгейге бөліп жүйеленген: теориялық (модельдеу және негіздеме), техникалық (инфрақұрылым және ресурстар) және қолданбалы (деректер сапасы, құқықтық және этикалық шектеулер). Әдіснамалық негіз ретінде жүйелік талдау элементтері, ғылыми дереккөздерге шолу және эмпирикалық бақылаулардың сараптамалық интерпретациясы пайдаланылды. Алынған нәтижелер машиналық оқытудың жаңа алгоритмдерін құрудың негізгі қағидаттарын жүйелеуге және оларды нақты қолдану жағдайларына бейімдеу бағыттарын анықтауға мүмкіндік береді. Қорытындылар интеллектуалды жүйелерді ендіру барысында математикалық әдістерді, инженерлік шешімдерді және этикалық жауапкершілікті біріктіретін пәнаралық тәсілдің маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: машиналық оқыту алгоритмдері, бейімделгіш модельдер, реттеу, қайта оқыту, интерпретациялану, шуға төзімділік, эмпирикалық валидация, этикалық шектеулер.

Г.А. Алханова[1], И.А. Алимбекова[1]
[1]Alikhan Bokeikhan University, г.Семей, Казахстан

МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация

Современные вызовы в сфере анализа данных требуют переосмысления методов машинного обучения и создания новых алгоритмов, способных адаптироваться к нестабильной и часто неопределённой среде. В статье рассматриваются методологические аспекты разработки новых алгоритмов машинного обучения, включая формализацию задачи обучения, построение моделей, выбор функций потерь и стратегий регуляризации. Обоснована необходимость перехода от универсальных подходов к более контекстно-чувствительным архитектурам, способным обеспечивать баланс между точностью, интерпретируемостью и вычислительной эффективностью. Особое внимание уделено анализу факторов, ограничивающих применение существующих решений: переобучение, низкая устойчивость к шуму, вычислительная затратность и отсутствие прозрачности в принятии решений. Предложена классификация типичных проблем, с которыми сталкиваются разработчики, на три уровня: теоретические (моделирование и обоснование), технические (инфраструктура и ресурсы) и прикладные (качество данных, правовые и этические ограничения). В качестве методологической основы использованы элементы системного анализа, обзор научных источников, а также экспертная интерпретация эмпирических наблюдений. Полученные результаты позволяют систематизировать ключевые принципы построения новых алгоритмов машинного обучения и определить направления их адаптации под реальные условия применения. Выводы подчеркивают значимость междисциплинарного подхода, сочетающего математические методы, инженерные решения и этическую ответственность при внедрении интеллектуальных систем.

Ключевые слова: алгоритмы машинного обучения, адаптивные модели, регуляризация, переобучение, интерпретируемость, устойчивость к шуму, эмпирическая валидация, этические ограничения.

G.A.Alkhanova[1], I.A.Alimbekova[1]
[1]Alikhan Bokeikhan University, Semey, Kazakhstan

SEMANTIC ROLE LABELING FOR KAZAKH: MODELS AND DATASETS

Abstract

Modern challenges in the field of data analysis require a rethinking of machine learning methods and the development of new algorithms capable of adapting to unstable and often uncertain environments. This article examines methodological aspects of designing new machine learning algorithms, including the formalization of learning tasks, model construction, loss function selection, and regularization strategies. The need to shift from universal approaches to more context-aware architectures is substantiated, as such models can maintain a balance between accuracy, interpretability, and computational efficiency. Particular attention is given to factors limiting the applicability of existing solutions: overfitting, low noise robustness, high computational costs, and lack of decision transparency. A classification of common challenges faced during algorithm development is proposed, divided into three levels: theoretical (modeling and justification), technical (infrastructure and resources), and applied (data quality, legal and ethical constraints). The methodological basis of the study includes elements of systems analysis, literature review, and expert interpretation of empirical observations. The results allow for systematization of key principles in the design of machine learning algorithms and outline directions for adapting them to real-world scenarios. The findings emphasize the importance of an interdisciplinary approach that integrates mathematical methods, engineering solutions, and ethical responsibility in the deployment of intelligent systems.

Keywords: machine learning algorithms, adaptive models, regularization, overfitting, interpretability, noise robustness, empirical validation, ethical constraints.

Кіріспе

Негізгі ережелер. Машиналық оқыту алгоритмдерін әзірлеу барысында туындайтын теориялық, техникалық және қолданбалы мәселелерді жіктеу, алгоритмдерді құру тәсілдерін жүйелеуге мүмкіндік береді. Реттеу және гиперпараметрлерді автоматты түрде таңдау қайта оқытуды 12–18%-ға азайтып, модельдердің шуға төзімділігін 20%-ға арттырады. SHAP және LIME интерпретация әдістерін қолдану, модельдердің шешімдерін ашық етеді. Математикалық, инженерлік және этикалық аспектілерді біріктіретін пәнаралық тәсіл сенімді және этикалық қауіпсіз алгоритмдерді жасауға ықпал етеді.

Машиналық оқыту қазіргі таңда цифрлық трансформацияның негізгі технологияларының бірі болып табылады. Оның әдістері мен алгоритмдері медицина, қаржы, өнеркәсіп, білім беру, қауіпсіздік және басқа салаларда кеңінен қолданылады. Білім беру ортасында машиналық оқыту технологиялары студенттердің мінез-құлқын талдауға, оқу материалын бейімдеуге және білімді бағалау үдерісін автоматтандыруға қабілетті интеллектуалды жүйелердің негізін құрайды [1]. Машиналық оқыту - жасанды интеллектінің ажырамас бөлігі. Ол жүйелерге деректер мен тәжірибе негізінде мінез-құлқын өздігінен жетілдіруге мүмкіндік береді [2]. Жасанды интеллект пен машиналық оқыту технологиялары адамның күнделікті өмірінің көптеген салаларында дауыстық көмекшілерден бастап жүргізушісіз көліктерге дейін қолданылып келеді. Бұл олардың жоғары бейімделгіштігін және пәнаралық сипатын дәлелдейді [3]. Машиналық оқыту жүйелердің өздігінен оқуына, деректердің үлкен көлемін талдауына және адамның тікелей араласуынсыз шешім қабылдауына мүмкіндік береді. Алайда, қажеттіліктердің артуы мен тапсырмалардың күрделенуіне байланысты, ол әрдайым стандартты тәсілдер талап етілетін тиімділікті, әмбебаптылықты және бейімделгіштікті қамтамасыз ете бермейді. Бұл машиналық оқытудың жаңа алгоритмдерін әзірлеу қажеттілігін негіздейді.

Python және оның кітапханалары (scikit-learn, TensorFlow, Keras) заманауи машиналық оқыту алгоритмдерін жүзеге асырудың негізгі экожүйесіне айналды, қолданбалы салаларда модельдерді тәжірибе мен енгізуге мүмкіндіктер берді [4].

Жаңа алгоритмдерді жасау теория, инженерия және тәжірибе элементтерін біріктіретін күрделі әрі көп қырлы процесс болып табылады. Әзірлеушілер математикалық негіздемелер мен тұрақтылықтан бастап, интерпретациялану және нақты, көбінесе «лас» деректер жағдайында, қолдануға дейінгі кең ауқымды факторларды ескеруі тиіс. Толық емес және шудың әсеріне ұшыраған деректермен жұмыс істеу алгоритмдердің тұрақтылығын және дұрыс жұмыс істеуін қамтамасыз етуге бағытталған. Ол модельдерді математикалық тұрғыдан талдауды және оңтайландыруды қажет етеді [5]. Бұл академиялық зерттеулер мен практикалық енгізу үшін кедергі болады. Ерекше өзекті мәселелер – қайта оқыту, есептеу шығындары, модельдердің интерпретациялануы және шектеулі немесе бұрмаланған деректермен жұмыс істеу.

Мақалада машиналық оқыту алгоритмдерін әзірлеу кезінде туындайтын негізгі мәселелер қарастырылады және олар түрлері бойынша жіктеледі. Мәселелерді зерттеу мен шешу кезінде қолданылатын әдістер талданады. Мұндай талдау сенімді, этикалық қауіпсіз және тиімді алгоритмдік шешімдерді құру үшін, тұрақты ғылыми және практикалық тәсілдерді қалыптастыруға қажет.

Жаңа алгоритмді әзірлеудегі негізгі міндеттердің бірі – оның жалпылау қабілетін қамтамасыз ету. Яғни, бұрын кездеспеген жаңа деректерде тиімді жұмыс істеу қабілеті. Алайда, көптеген алгоритмдер, оқыту деректерін есте сақтайтын, бірақ жалпылай алмайтын қайта оқытуды көрсетеді. Алгоритмдерді жобалау барысында модельдің күрделілігі мен оның жалпылау қабілеті арасындағы тепе-теңдікті сақтау, дәлдік пен тұрақтылықты қамтамасыз етудің негізгі шарты болып табылады [6]. Сондай-ақ, жаңа тәсілдерді формализациялау қиынға соғады. Барлық әдістерде дұрыстығына, жинақтылығына немесе тұрақтылығына қатаң математикалық дәлелдемелер бола бермейді. Бұдан бөлек, оңтайлы гиперпараметрлерді (қабаттардың өлшемі, оқыту жылдамдығы, активтендіру функциясы және т.б.) таңдау көбінесе эмпирикалық түрде жүзеге асырылады.

Заманауи алгоритмдерді әзірлеу, әсіресе терең оқыту саласында, айтарлықтай есептеу ресурстарын қажет етеді. Бұл оларды шектеулі есептеу қуаты жағдайында тестілеу және қолдану мүмкіндігін шектейді. Сонымен қатар, архитектуралардың күрделілігі мұндай модельдерді интерпретациялауды қиындатады. Бұл пайдаланушылардың сеніміне әсер етеді. Тағы бір техникалық мәселелердің бірі шу мен шабуылдаушы әсерлеріне осалдылығы. Кіріс деректеріндегі азғантай өзгерістер, алгоритмнің қате шешіміне әкелуі мүмкін.

Көбінесе, жаңа алгоритмдер синтетикалық немесе қатты тазартылған деректерде жобаланып, тестіленеді. Нақты жағдайларда (мысалы, медицина, өнеркәсіп) деректер толық емес немесе теңгерімсіз болады. Сонымен қатар, жиі кездесетін мәселе, жаңа тәсілдердің тиімділігін бағалау үшін жалпыға қол жетімді, сапалы деректер жиынының болмауы. Практикалық қолданылуы этикалық және құқықтық нормаларды сақтауды талап етеді.

Мақалада жоғары жалпылау қабілеті бар, шуға төзімді, интерпретацияланатын және нақты, шектеулі немесе бұрмаланған деректер жағдайында қолдануға мүмкіндік беретін әдістемелік және техникалық тәсілдер қарастырылады.

Сонымен қатар модельдердің тұрақтылығы мен бейімделгіштігіне әсер ететін факторлар және алгоритмдердің практикада қолданылатын ортасының ерекшеліктері ескеріледі. Реттеуді, гиперпараметрлерді бейімделгіш баптауды және әртүрлі құрылымдағы деректерде итеративті тестілеуді біріктіру, неғұрлым әмбебап және сенімді машиналық оқыту алгоритмдерін әзірлеуге мүмкіндік береді. Бұл тұрақсыз сыртқы ортада қолданылады.

Зерттеу барысында әртүрлі деңгейдегі шумен бұрмаланған және құрылымдалу дәрежесі әртүрлі ашық және синтетикалық деректер жиынтықтары пайдаланылды. Деректердің негізгі көлемі мыналардан тұрды:

- құрылымдалған деректер (кестелік форматтар, 45 000 жазба);
- әлсіз құрылымдалған деректер (мәтіндер, суреттер), шамамен 12 000 бірлік көлемде;
- толық емес және теңгерімсіз үлгілерді имитациялау үшін жасалған синтетикалық деректер.

Алгоритмдерді бағалау үшін [7] scikit-learn, TensorFlow Datasets және Kaggle OpenML кітапханаларында қолжетімді эталондық тестілеу үлгілері қолданылды. Барлық деректер алдын ала нормализацияланды және қолмен немесе жартылай автоматты құралдармен белгіленіп, валидациядан өтті. Деректерді дұрыс дайындау мен қалыптандыру, машиналық оқыту алгоритмдерінің дәлдігі мен тұрақтылығына тікелей әсер етеді. Ал деректер сапасы модельдің жалпылау қабілетін анықтайтын негізгі фактор болып табылады [8].

Бағдарламалық және есептеуіш қамтамасыз ету. Эксперименттер мына орталарда жүргізілді:

- Google Colab Pro (GPU Tesla T4, 16 ГБ RAM);
- жергілікті машинада Jupyter Lab (Intel Core i7, 32 ГБ RAM);
- кітапханалар: scikit-learn, PyTorch, TensorFlow, Optuna, NumPy, Matplotlib.

Python тіліндегі Scikit-Learn және TensorFlow сияқты кітапханаларды пайдалану деректерді тиімді өңдеуге және машиналық оқыту модельдерін құруға мүмкіндік береді [9]. Бұлтты платформаларды пайдалану, модельдерді оқыту мен оларды автоматтандырылған өндірістік ортада енгізуді жеделдетеді [10].

Зерттеу кезеңдері

1. Оқыту міндетін формализациялау (регрессия/классификация).
2. Модельдерді таңдау (сызықтық, нейрондық желілер, ансамбльдік).
3. Шығын функцияларын және реттеу әдістерін (L1, L2) жобалау.
4. Гиперпараметрлерді байесовтік оңтайландыру әдістерімен таңдау.
5. Синтетикалық және нақты үлгілерде модельдерді оқыту.
6. Тәуелсіз тестілеу жиынтықтарында сапаны валидациялау.
7. Модельдердің қателерін, тұрақтылығын және интерпретациялануын талдау.
8. Деректерді/архитектураларды бейімдеумен қайта оқыту.

Зерттеу әдіснамасы

Зерттеу әдіснамасы аналитикалық, эмпирикалық және сараптамалық әдістердің үйлесіміне негізделген. Оқыту модельдерінің кезеңдерін жүйелеу жөніндегі ұқсас тәсіл Шелухин О.И. және авторлар ұжымының еңбегінде сипатталған, онда машиналық оқыту киберқауіпсіздік міндеттерінде деректерді талдау мен классификацияны автоматтандыру құралы ретінде қарастырылады [11].

Аналитикалық әдістер: Параметрлік модельдерді қолдана отырып оқыту міндетін формализациялау.

Эмпирикалық әдістер: Әртүрлі модель конфигурацияларында (SGD, Adam, L-BFGS) бірнеше оқыту сессиялары, кросс-валидация және метрикаларды қолдану: дәлдік (accuracy), қамту (recall), F1-өлшем, ROC-AUC.

Сараптамалық-бағалау әдістері: Реттеу әдістерінің, модель тереңдігінің және гиперпараметрлердің әртүрлі деңгейлері бар модельдердің нәтижелерін шумен бұрмаланған және жартылай зақымдалған үлгілерде салыстыру.

Интерпретациялық әдістер: Белгілердің маңыздылығын бағалау және модельдердің шешімдерін интерпретациялау үшін SHAP және LIME қолдану.

Зерттеу нәтижелері

- L2 реттеу әдісін және гиперпараметрлерді автоматты түрде таңдауды қолдану, қолмен таңдалған параметрлермен салыстырғанда қайта оқытуды 12-15%-ға төмендететіні расталды.
- Архитектураларды деректер түріне итеративті бейімдеу модельдердің жалпылау қабілетін белгісіз тестілеу жиынтықтарында 8%-ға дейін жақсартты.
- SHAP арқылы верификацияланған модельдер, әсіресе медициналық диагностика міндеттерінде, шешімдердің жоғары ашықтығын көрсетті.
- Синтетикалық деректерді шумен алдын ала генерациялау, шабуылдау кезінде алгоритмдердің тұрақтылығын 20% - ға дейін арттыруға мүмкіндік беретіні анықталды.

Математикалық моделі:

1. Оқу міндетін формализациялау.

Оқыту жиыны берілсін:

$$D = \{(x + y)\}_{i=1}^{n}, x_i \in X,\ \ y_i\ \ \in Y \quad (1)$$

(1) мұндағы:

x_i - кіріс сипаттар векторы,

y_i-сәйкес мақсатты айнымалы (класстың белгісі немесе регрессия мәні),

n- оқыту үлгілерінің саны.

2. Модельді анықтау.

Параметрлік модель таңдалады:

$$f(x;\theta), \theta \epsilon \Theta \quad (2)$$

Мақсат – модель қателігін азайтатын параметрлер θ^* -ны табу.

3. Шығын (жоғалту) функциясын анықтау.

Шығын функциясы $L(f(x_i;\theta), y_i)$ - модель болжамы мен нақты мән арасындағы айырмашылықты сипаттайды.

Мысалдар:

- классификация үшін: кросс-энтропия

$$L(f(x), y) = -\sum_{k=1}^{k} y_k\ \ \log f_k\ (x) \quad (3)$$

- регрессия үшін: орташа квадраттық қате

$$L(f(x), y) = (f(x) - y)^2 \quad (4)$$

4. Реттеу (тұрақтылықты қамтамасыз ету)

Модельдің күрделілігін басқару және қайта оқытудың алдын алу үшін реттеу қосылады:

$$J(\theta) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L(f(x_i;\theta), y_i) + \lambda R(\theta) \quad (5)$$

мұндағы:

- λ - реттеу коэффициенті.

Реттеу мүшелері мысалы:

- $L1: R(\theta) = \|\theta\|_1$
- $L2: R(\theta) = \|\theta\|_2^2$

5. Оңтайландыру

Оңтайлы параметрлерді табу:

$$\theta^* = \arg\ \min_{\theta \epsilon \Theta} J(\theta) \quad (6)$$

Қолданылатын әдістер:

- градиентті түсу әдісі,
- стохастикалық градиентті түсу (SGD),
- екінші ретті әдістер (мысалы, Adam, L-BFGS).

6. Модельдің сапасын бағалау

Оқыту аяқталғаннан кейін модель тест жиыны D_{test} бойынша тексеріледі. Бағалау метрикалары:

- дәлдік (accuracy);
- қамту (recall);
- F1-өлшемі;
- ROC-AUC және т.б.

Мысалы, дәлдік:

$$Accuracy = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} 1\{f(x_j^{test}) = y_j^{test}\} \quad (7)$$

7. Итеративті жетілдіру (бейімделу үдерісі)

Шынайы жағдайда бұл процесс бірнеше рет қайталанады:

D→оқыту→бағалау→модельді/деректерді өзгерту→қайта оқыту

Қорытынды формула

$$\theta^* = \arg\min_{\theta}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} L(f(x_i;\theta), y_i) + \lambda R(\theta)\right] \quad (8)$$

мұндағы:

f(x;θ) – модель құрылымы (мысалы, нейрондық желі, шешімдер ағашы)

L-шығын функциясы, R- реттеу мүшесі, λ - реттеу коэффициенті (гиперпараметр).

Дискуссия

Жүргізілген талдау нәтижесінде машиналық оқытудың жаңа алгоритмдерін әзірлеу кезінде негізгі мәселелер анықталды (кесте 1). Бұл мәселелер шартты түрде үш санатқа жіктелді:

Кесте 1. Машиналық оқытудың мәселелері: теориялық, техникалық және қолданбалы аспектілер

Санат	*Мәселелер*
Теориялық	*қайта оқыту; математикалық кепілдіктердің болмауы; гиперпараметрлерді таңдаудың күрделілігі*
Техникалық	*Жоғары есептеу күрделілігі; интерпретациялануын төмендігі; шуға осалдық*
Қолданбалы	*Сапалы деректердің жетіспеушілігі; нақты жағдайларға бейімделу; этикалық тәуекелдер*

Жүргізілген зерттеу, мәселелердің жеке және жиынтық түрде көрініс табатынын растады. Бұл алгоритмдердің тиімділігі мен нақты міндеттерде қолданылуына айтарлықтай әсер етеді.

Теориялық аспектілер бойынша, жаңа модельдер теңгерімсіз немесе шектеулі деректер болған жағдайда ғана қайта оқытуға бейім екені көрсетілді. Бұл әсерді азайту үшін L1 және L2 реттеу әдістері, сондай-ақ байесовтік оңтайландыру арқылы гиперпараметрлерді автоматты түрде таңдау қолданылды. Бұл қайта оқытуды 12-18%-ға төмендетуге және валидациялық үлгілерде тұрақтылықты арттыруға мүмкіндік берді. Техникалық мәселелерде, нейрондық желілер архитектурасының жоғары есептеу жүктемесімен және олардың шешімдерінің төмен интерпретациялануымен байланысты болды. Эксперимент нәтижелері кіріс деректеріндегі азғантай бұрмаланулар (шу, шығып тұрған мәндер) нәтижеге айтарлықтай әсер етуі мүмкін екенін көрсетті. Әсіресе тұрақты шығын функциялары болмаған жағдайда. Интерпретация әдістерін (SHAP, LIME) қолдану, модельдердің мәселесін ішінара шешуге мүмкіндік берді. Бұл белгілердің үлесін визуализациялауды қамтамасыз етіп, нәтижелерге деген сенімді арттырады. Зияткерлік желілер ең алдымен белгілі бір пәндік сала (бағдарламалық қамтамасыз ету) шеңберіндегі білімді бейнелей алатын математикалық модель болып табылады және ол білім алудың маңызды салаларының бірі болып саналады [12].

Қолданбалы қиындықтар, синтетикалық деректерден нақты деректер жиынтығына көшу кезінде, онда шу, жетіспейтін мәндер және белгісіз бақылаулар анықталған кезде ерекше байқалды. Мінсіз дайындалған үлгілерде оқыту, модельді нақты жүйелерге енгізген кезде оның жеткілікті бейімделуін қамтамасыз етпейтіні анықталды. Итеративті баптау және модельді жаңа деректер жиынтығында қайта калибрлеу, алгоритмнің тұрақтылығын арттыруға және нәтижелердің қайталанбауын жақсартуға мүмкіндік берді.

Benchmark деректер жиынтығы дәлдікті жақсартуға бағытталған жұмыстардың нәтижелерімен салыстырғанда, нәтижелер дәлдікті ғана емес, сонымен қатар тұрақтылық, бейімделу және интерпретация сияқты қасиеттерді ескеретін кешенді тәсілдің қажеттілігін растайды. Мұндай тәсіл жоғары тәуекелді салаларда - денсаулық сақтау, қаржылық технологиялар, автоматты шешім қабылдау жүйелерінде, мұнда алгоритмдердің қателері маңызды салдарға әкелуі мүмкін болған кезде маңызды.

Жүргізілген талдау және нәтижелерді талқылау машиналық оқытуды одан әрі дамытуды көрсетеді. Бұл тек архитектуралар мен сапа метрикаларын ғана емес, сонымен қатар нақты қолдану шарттарын, этика, тұрақтылық және нәтижелердің қайталану қабілетін ескеруді қажет етеді. Бұл күрделі және өзгермелі ортада сенімді жұмыс істей алатын интеллектуалды жүйелерді жобалау үшін негіз қалыптастырады.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеудің мақсаты шуға төзімді, интерпретацияланатын және нақты, шектеулі немесе бұрмаланған деректер жағдайында қолданылатын машиналық оқытудың жаңа алгоритмдерін әзірлеуге мүмкіндік беретін әдіснамалық және техникалық тәсілдерді анықтау болды. Бұл мақсатқа жету үшін оқыту міндеттерін формализациялау, математикалық модельдер құру, реттеу, оңтайландыру және алгоритмдерді интерпретациялау әдістері, сондай-ақ, түрлі деректерде эмпирикалық тексеру қолданылды.

Талдау және эксперименттік нәтижелер жаңа алгоритмдерді әзірлеу кезінде туындайтын негізгі мәселелерді жүйелеуге мүмкіндік берді: теориялық (қайта оқыту, қатаң математикалық кепілдіктердің болмауы, гиперпараметрлерді таңдаудың күрделілігі), техникалық (жоғары есептеу күрделілігі, интерпретацияланудың төмендігі, шуға осалдық) және қолданбалы (сапалы деректердің шектеулілігі, этикалық және құқықтық шектеулер, нақты жүйелерге енгізудің күрделілігі). Ұсынылған кешенді тәсіл реттеуді, автоматтандырылған баптауды, деректер сипаттамаларына архитектураны бейімдеуді және интерпретация әдістерін (SHAP, LIME) қолдануды қамтиды. Бұл модельдердің тұрақтылығы мен қайталанушылығын арттыруда тиімділігін көрсетті. Қайта оқытуды 18%-ға дейін төмендетуге, модельдердің жалпылау қабілетін 8%-ға және шабуылдаушының шуға төзімділігін 20%-ға дейін арттыруға қол жеткізілді. Нәтижелер машиналық оқытуды одан әрі дамыту тек нақты көрсеткіштерді жақсарту ғана емес, сонымен қатар тұрақсыз сыртқы ортада жұмыс істей алатын бейімделгіш, этикалық қауіпсіз және түсіндірілетін модельдерді әзірлеуге көшуді талап ететінін растайды. Мұндай тәсіл алгоритмдерді жобалауда сенімділік пен әлеуметтік жауапкершілікке басымдық беретін жаңа парадигманың қалыптасуына ықпал етеді.

Әрі қарайғы жұмыстың перспективалары әртүрлі тәсілдерді (терең оқыту, байесовтік шығару, ансамбльдік әдістер) біріктіретін гибридті алгоритмдерді әзірлеу, сондай-ақ толық емес, ретсіз және қайшылықты деректер жағдайында модельдерді тестілеу әдістемелерін жасау болып табылады. Маңызды бағыт ретінде сенімділікке жоғары талаптар қойылатын жүйелерге – диагностикаға, болжамды аналитикаға, автоматты басқаруға алгоритмдерді интеграциялау қалады.

Пайдаланылған дереккөздер тізімі

[1] Alkhanova, G., Zhuzbayev, S., Syrkin, I., Kurmangaliyeva, (2021), N. Model of an automated educational and methodological complex based on a semantic network. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, №99(24), pp.5713-5723. URL: https://www.jatit.org/volumes/Vol99No23/12Vol99No23.pdf

[2] Гифт Н. Прагматичный ИИ: Машинное обучение и облачные технологии. - СПб.: Питер, 2019. - 304 с.

[3] Казанцев Т. Искусственный интеллект и Машинное обучение. Основы программирования на Python. - М.: ЛитРес: Самиздат, 2020. - 122 с.

[4] Alkhanova, G., Zhuzbayev, S., Syrkin, I., Kurmangaliyeva, (2022), N. Intelligent Mobile Models and Their Application in the Educational Process. International Journal of Interactive Mobile Technologies, №16(21), pp. 201–217. URL:https://online-journals.org/index.php/i-jim/article/view/36069/12251. DOI: 10.3991/ijim.v16i21.36069

[5] Кузнецов С.А. Методы машинного обучения: теория и практика. - М.: ИНФРА-М, 2023. - 248 с.

[6] Бурков А. Машинное обучение без лишних слов. - СПб.: Питер, 2020. -192 с.- (Библиотека программиста).

[7] Рашка С., Мирджалили В. Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow 2, 3-е изд./Пер. с англ. - СПб.: ООО «Диалектика», 2020. - 848 с.

[8] Баланов А.Н. Машинное обучение и искусственный интеллект: учебное пособие для вузов. - СПб.: Лань, 2024. - 172 с.

[9] Бенгфорт Б., Билбро Р., Охеда Т. Прикладной анализ текстовых данных на Python. Машинное обучение и создание приложений обработки естественного языка. - СПб.: Питер, 2019. - 368 с.

[10] Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 4-е изд. - СПб.: Питер, 2022. - 1152 с.

[11] Шелухин О.И., Осин А.В., Раковский Д.И. Искусственный интеллект и машинное обучение в кибербезопасности: учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ. - М.: МТУСИ, 2022. - 76 с.

[12] Alkhanova, G., Stenin, D., Zhuzbaev, S. The semantic network as a promising information platform in the mining industry. E3S Web of Conferences,2019, 105, 03015. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/31/e3sconf_iims18_03015.pdf.DOI:10.1051/e3sconf/201910503015

References

[1] Alkhanova, G., Zhuzbayev, S., Syrkin, I., Kurmangaliyeva, (2021), N. Model of an automated educational and methodological complex based on a semantic network. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, №99(24), pp.5713-5723.URL: https://www.jatit.org/volumes/Vol99No23/12Vol99No23.pdf

[2] Gift N. Pragmatichnyj II: Mashinnoe obuchenie i oblachnye tehnologii. - SPb.: Piter, 2019. - 304 s.

[3] Kazancev T. Iskusstvennyj intellekt i Mashinnoe obuchenie. Osnovy programmirovanija na Python. - M.: LitRes: Samizdat, 2020. - 122 s.

[4] Alkhanova, G., Zhuzbayev, S., Syrkin, I., Kurmangaliyeva, (2022), N. Intelligent Mobile Models and Their Application in the Educational Process. International Journal of Interactive Mobile Technologies, №16(21), pp. 201–217. URL: https://online-journals.org/index.php/i-jim/article/view/36069/12251. DOI: 10.3991/ijim.v16i21.36069

[5] Kuznecov S.A. Metody mashinnogo obuchenija: teorija i praktika. - M.: INFRA-M, 2023. - 248 s.

[6] Burkov A. Mashinnoe obuchenie bez lishnih slov. - SPb.: Piter, 2020. -192 s.- (Biblioteka programmista).

[7] Rashka S., Mirdzhalili V. Python i mashinnoe obuchenie: mashinnoe i glubokoe obuchenie s ispol'zovaniem Python, scikit-learn i TensorFlow 2, 3-e izd./Per. s angl. - SPb.: OOO «Dialektika», 2020. - 848 s.

[8] Balanov A.N. Mashinnoe obuchenie i iskusstvennyj intellekt: uchebnoe posobie dlja vuzov. - SPb.: Lan', 2024. - 172 s.

[9] Bengfort B., Bilbro R., Oheda T. Prikladnoj analiz tekstovyh dannyh na Python. Mashinnoe obuchenie i sozdanie prilozhenij obrabotki estestvennogo jazyka. - SPb.: Piter, 2019. - 368 s.

[10] Rassel S., Norvig P. Iskusstvennyj intellekt: sovremennyj podhod, 4-e izd. - SPb.: Piter, 2022. - 1152s.

[11] Sheluhin O.I., Osin A.V., Rakovskij D.I. Iskusstvennyj intellekt i mashinnoe obuchenie v kiberbezopasnosti: uchebno-metodicheskoe posobie dlja vypolnenija laboratornyh rabot. - M.: MTUSI, 2022. - 76 s.

[12] Alkhanova, G., Stenin, D., Zhuzbaev, S. The semantic network as a promising information platform in the mining industry. E3S Web of Conferences,2019, 105, 03015. URL:https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/31/e3sconf_iims18_03015.pdf.
DOI:10.1051/e3sconf/201910503015

МРНТИ 20.51.19

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.013

А.Б. Бажибаева[1*], Д.Н. Исабаева[1], С.М. Алдашев[1], С. Байпакбаева[1]

[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
[*]*e-mail:bakytbekkyzyainur@gmail.com*

КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ ДЛЯ ВОВЛЕЧЕННОСТИ УЧАЩИХСЯ В ОНЛАЙН ОБУЧЕНИИ: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Аннотация

В данном обзоре систематизированы исследования 2020-2025 годов, посвящённые автоматическому обнаружению вовлечённости студентов в онлайн-обучении на основе компьютерного зрения и глубокого обучения. Вовлечённость рассматривается как многомерный конструкт, включающий эмоциональные, когнитивные и поведенческие компоненты, которые играют ключевую роль в академической успеваемости. Анализируются используемые наборы данных (публичные и специализированные), методы извлечения признаков (мимика, направление взгляда, поза головы, движения тела), архитектуры моделей (CNN, LSTM, трансформеры) и подходы к мультимодальной интеграции. Показан переход от экспериментальных решений к комплексным системам реального времени, однако отмечены сохраняющиеся проблемы обобщаемости моделей, нехватки разнообразных данных и этических рисков, связанных с конфиденциальностью и обработкой персональной информации. Делается вывод о необходимости разработки стандартизированных, этически обоснованных и адаптируемых к различным условиям методов оценки вовлечённости.

Ключевые слова: компьютерное зрение, глубокое обучение, вовлечённость студентов, онлайн-обучение, мультимодальный анализ.

А.Б. Бажибаева[1], Д.Н.Исабаева[1], С.М. Алдашев[1], С.Байпакбаева[1]
[1]Казахский национальный университет имени-аль-Фараби г. Алматы, Казахстан

КОМПЬЮТЕРЛІК КӨРУ АРҚЫЛЫ БІЛІМ АЛУШЫЛАРДЫҢ ОНЛАЙН ОҚЫТУҒА БЕЛСЕНДІ ҚАТЫСУЫН АНЫҚТАУ: ӘДЕБИЕТТЕРГЕ ШОЛУ

Аңдатпа

Бұл шолу компьютерлік көру және терең оқытуды қолдана отырып, онлайн оқуға студенттердің қатысуын автоматты түрде анықтау бойынша 2020 жылдан 2025 жылға дейінгі зерттеулерді жүйелейді. Қатысу академиялық көрсеткіштерде маңызды рөл атқаратын эмоционалды, когнитивті және мінез-құлық компоненттерін қамтитын көп өлшемді құрылым болып саналады. Шолуда пайдаланылған деректер жиынтығы (қоғамдық және мамандандырылған), ерекшеліктерді алу әдістері (бет-әлпет, көзқарас бағыты, бас позасы, дене қимылдары), модель архитектуралары (CNN, LSTM, трансформаторлар) және мультимодальды интеграцияға тәсілдер талданады. Эксперименттік шешімдерден күрделі нақты уақыт жүйелеріне көшу көрсетілгенімен, модельді жалпылаудағы тұрақты қиындықтар, әртүрлі деректердің жетіспеушілігі және құпиялылық пен жеке ақпаратты өңдеумен байланысты этикалық тәуекелдер сақталуда. Онда қатысуды бағалау үшін стандартталған, этикалық тұрғыдан негізделген және бейімделетін әдістерді әзірлеу қажеттілігі туралы қорытынды жасалады.

Түйін сөздер: компьютерлік көру, терең оқыту, студенттердің қатысуы, онлайн оқыту, мультимодальды талдау.

A.B. Bazhibayeva[1], D.N. Isabaeva[1], S.M. Aldashev[1], S.Baipakbayeva[1]
[1]Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

COMPUTER VISION FOR STUDENT ENGAGEMENT IN ONLINE LEARNING: LITERATURE REVIEW

Abstract

This review systematizes research on automatic detection of student engagement in online learning using computer vision and deep learning from 2020 to 2025. Engagement is considered a multidimensional construct

that includes emotional, cognitive, and behavioral components that play an important role in academic performance. The review analyzes the datasets used (public and specialized), feature extraction methods (facial expression, gaze direction, head posture, body movements), model architectures (CNN, LSTM, transformers), and approaches to multimodal integration. Although the transition from experimental solutions to complex real-time systems is demonstrated, persistent difficulties in model generalization, lack of diverse data, and ethical risks related to privacy and processing of personal information remain. It concludes that there is a need to develop standardized, ethically sound, and adaptable methods for assessing participation.

Keywords: computer vision, deep learning, student participation, online learning, multimodal analysis.

Введение

Стремительное развитие онлайн-обучения коренным образом изменило образовательный ландшафт во всем мире. Этот цифровой переход, значительно ускоренный пандемией COVID-19, утвердил онлайн-обучение не как временную альтернативу традиционному классному обучению, а как устойчивое явление [1, 5, 12]. Однако эта трансформация породила устойчивые проблемы, особенно в отношении сохранения вовлеченности студентов в виртуальных средах, где преподаватели лишены немедленной визуальной обратной связи, характерной для традиционного очного обучения [4, 12].

Вовлеченность студентов давно признана критическим фактором академического успеха, удержания знаний и завершения курсов [1, 7]. В традиционных классах учителя интуитивно оценивают вовлеченность через наблюдаемое поведение – зрительный контакт, позу, мимику и паттерны участия – и соответствующим образом корректируют стратегии обучения [4, 7].

Сама вовлеченность является многомерным конструктом, включающим поведенческий, когнитивный и эмоциональный компоненты [1, 4, 7]. Согласно последним систематическим обзорам [4], эмоциональная вовлеченность является наиболее изученным измерением (45.13%), за которым следуют многомерные подходы (38.05%), когнитивная вовлеченность (14.16%) и поведенческая вовлеченность (2.65%). Поведенческая вовлеченность относится к наблюдаемой активности и участию в задачах; когнитивная вовлеченность представляет умственные усилия и глубокую обработку информации; эмоциональная вовлеченность охватывает аффективные реакции на обучение, включая интерес, удовольствие, скуку или разочарование [4, 7]. Эти измерения динамически взаимосвязаны, однако их сложность затрудняет всестороннюю оценку с помощью традиционных методов, таких как опросники или листы наблюдения, которые являются ретроспективными, субъективными и лишены временной детализации [4, 7].

Компьютерное зрение (КЗ) стало перспективным технологическим ответом на этот оценочный разрыв. Анализируя видеоданные, снятые стандартными веб-камерами, широко используемыми в конфигурациях онлайн-обучения, системы КЗ могут неинвазивно обнаруживать мимику, направление взгляда, позу головы и движения тела, превращая эти визуальные сигналы в количественные показатели вовлеченности [4, 7, 11]. В отличие от физиологических датчиков (ЭЭГ, ЭКГ, кожно-гальваническая реакция), которые требуют специального оборудования и вызывают проблемы конфиденциальности, подходы на основе камер предлагают масштабируемость и экологическую валидность для реальных образовательных условий [4, 11, 12].

Последние пять лет (2020–2025) стали свидетелями значительных успехов в обнаружении вовлеченности на основе компьютерного зрения. Систематический обзор, проведенный Карбал и др. [4], охватил 113 исследований за период 2014-2025 гг. и показал, что этот период характеризуется развитием технологий глубокого обучения – сверточных нейронных сетей (CNN), рекуррентных архитектур (LSTM) и моделей на основе трансформеров – что значительно улучшило точность и надежность распознавания мимики, оценки направления взгляда и отслеживания позы [4, 7, 11].

На рисунке 1 представлено годовое распределение отобранных исследований, посвящённых обнаружению вовлечённости студентов с использованием методов компьютерного зрения за период 2020–2025 гг.

Рисунок 1. Годовое распределение отобранных исследований по обнаружению вовлеченности студентов с помощью компьютерного зрения (2020-2025).

Рисунок 1 показывает устойчивый рост интереса к данной тематике. 2023-2024 годы выделяются наибольшим количеством публикаций, что объясняется повышенным интересом к онлайн-обучению в постпандемический период [4, 12]. Доступность крупных эталонных наборов данных, таких как DAiSEE и серия челленджей EmotiW, позволила систематически сравнивать и бенчмаркить подходы [4, 13, 15]. Кроме того, глобальный переход на дистанционное обучение во время пандемии COVID-19 катализировал исследовательский интерес к инструментам, помогающим понимать и повышать вовлеченность студентов в цифровых средах [4, 5, 12]. Следовательно, литература 2020–2025 годов демонстрирует переход от исследований по доказательству концепции к сложным мультимодальным системам, которые объединяют мимические, глазные и телесные сигналы для прогнозирования вовлеченности в реальном времени [4, 7, 13].

Несмотря на эти технические достижения, остаются важные вопросы о надежности, обобщаемости и этичности развертывания таких систем в различных образовательных контекстах [4, 12]. Этот обзор литературы синтезирует последние исследования (2020–2025), посвященные анализу вовлеченности онлайн-обучающихся с помощью компьютерного зрения, рассматривая методологические подходы, технические архитектуры, наборы данных, метрики оценки и возникающие проблемы. Сосредоточившись на последних пяти годах, мы охватываем самые современные технологические разработки и гарантируем, что наши результаты отражают передовую практику. Обзор направлен на то, чтобы предоставить исследователям и педагогам всестороннее понимание текущего состояния области и определить направления будущих исследований.

Методы исследования

Этот обзор следовал структурированному подходу для выявления, отбора и анализа соответствующей литературы по обнаружению вовлеченности на основе компьютерного зрения. Стратегия поиска была направлена на рецензируемые журнальные статьи и материалы конференций, опубликованные в период с 2020 по 2025 год. Этот пятилетний период был намеренно выбран для охвата периода наиболее быстрых инноваций в применении технологий глубокого обучения и компьютерного зрения в образовании. За это время в отрасли наблюдалось появление сквозных моделей глубокого обучения, крупномасштабных наборов данных и усиление исследовательского фокуса на онлайн-обучении после пандемии COVID-19 [4, 5, 7].

Основные вопросы исследования (RQ).

1. Классификация и методы: Какие виды вовлеченности учащихся (эмоциональная, когнитивная, поведенческая) выделяются в современных исследованиях и какие методы их распознавания наиболее эффективны в различных образовательных средах?

2. Данные и алгоритмы: Какие наборы данных и архитектуры нейронных сетей (компьютерное зрение, анализ жестов и позы) являются приоритетными для точного определения состояния учащегося?

3. Оптимизация и оценка: Какие методы обработки данных и метрики эффективности позволяют достичь максимальной точности моделей при анализе вовлеченности в реальном времени?

Web of Science (WoS) и Scopus были выбраны в качестве основных баз данных из-за их широкого охвата высокорейтинговых исследований по индексам JCR и SJR [12]. В поиске использовались булевы операторы со следующими терминами: "engagement detection" И "computer vision" И "online learning"; "facial expression recognition" И "education"; "gaze estimation" И "student engagement"; и "multimodal engagement analysis". Дополнительные исследования были идентифицированы путем отслеживания цитирований и ручного поиска в соответствующих материалах конференций, включая серию челленджей EmotiW [4, 13], которые ежегодно публикуют эталонные тесты с 2018 года.

Критерии включения включали: (1) эмпирические исследования, использующие методы компьютерного зрения для обнаружения или анализа вовлеченности студентов; (2) исследования, проведенные в контексте онлайн, дистанционного или технологически опосредованного обучения; (3) статьи, сообщающие количественные показатели производительности; (4) публикации на английском языке; и (5) работы, опубликованные в период 2020–2025 гг. Критерии исключения удаляли повторяющиеся публикации, главы книг, диссертации, тезисы конференций без полного текста и исследования, сосредоточенные исключительно на традиционных классных условиях без технологического посредничества [12]. В рассмотренной литературе вовлеченность последовательно концептуализируется как многомерный конструкт, хотя операционные определения различаются между исследованиями. Опираясь на основополагающую структуру, установленную Фредрикс и др. [1], многие исследователи различают поведенческую, когнитивную и эмоциональную вовлеченность [4, 7]. На рисунке 2 представлено распределение типов вовлеченности студентов в рамках рассмотренных исследований. Наибольшую долю занимает многомерный подход (44,4%), что свидетельствует о преобладании комплексного анализа вовлеченности, учитывающего одновременно несколько ее аспектов.

Рисунок 2. Основные типы вовлеченности

Многомерные подходы является наиболее изученным измерением (44.44%, 28 исследования), за ней следуют эмоцианальная вовлеченность (34.92%, 22 исследования), когнитивная вовлеченность (15.87%, 10 исследований) и поведенческая вовлеченность (4,76%, 3 исследования). Вовлеченность учащихся – комплексное явление, проявляющееся на нескольких уровнях. Это эмоциональный отклик от интереса до скуки, служащий индикатором восприятия контента. Это и внутренняя интеллектуальная работа, о которой судят по направлению взгляда и положению головы: сосредоточенный взгляд говорит о погружении, отведение взгляда – о потери концентрации. Внешне вовлеченность выражается в действиях (письмо, жесты), которые отслеживают современные системы анализа поз и движений. Наиболее объективную картину дают многомерные подходы, объединяющие мимику, взгляд и движения тела для целостного понимания включенности учащегося в процесс. Таблица 1 отражает распределение отобранных научных исследований по выявлению вовлеченности студентов с использованием методов компьютерного зрения в разрезе научных журналов. Представленные данные демонстрируют, в каких изданиях чаще всего публикуются работы по данной тематике, что позволяет выявить наиболее активные и авторитетные журналы в области компьютерного зрения и образовательных технологий. Анализ таблицы показывает концентрацию публикаций в ряде ведущих журналов, что свидетельствует о растущем интересе научного сообщества к вопросам автоматического определения вовлеченности студентов.

Таблица 1. Места публикации избранных исследований по выявлению вовлеченности студентов с помощью компьютерного зрения (Журнал)

Журнал	*Год*	*Ссылки*
IEEE Access	*2023-2025*	*[4], [10], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [62]*
Multimedia Tools and Applications	*2021-2024*	*[8], [9], [14], [32], [33], [34]*
Electronics	*2020-2023*	*[3], [18], [38]*
Sustainability	*2020-2024*	*[39], [40], [61], [63]*
Computers and Electrical Engineering	*2021, 2023*	*[7], [11]*
International Journal of Cognitive Computing in Engineering	*2023, 2024*	*[36], [37]*
Applied Sciences	*2022*	*[41]*
Discover Computing (formerly Discover Systems)	*2024*	*[42]*
Discover Education	*2024*	*[43]*
Future Generation Computer Systems	*2020*	*[44]*
IEEE Transactions on Learning Technologies	*2024*	*[45]*
International Journal of Advanced Computer Science and Applications	*2023*	*[46]*
International Journal of Information and Education Technology	*2021*	*[47]*
International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies	*2021*	*[48]*
Journal of Healthcare Informatics Research	*2021*	*[49]*
Optical Memory and Neural Networks	*2022*	*[50]*
SoftwareX	*2024*	*[51]*
User Modeling and User-Adapted Interaction	*2020*	*[52]*
Applied Mathematics and Nonlinear Sciences	*2024*	*[53], [54]*
International Journal of Information Technology and Computer Science	*2024*	*[55]*
Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science	*2024*	*[56]*
Journal of Robotics, Networking and Artificial Life	*2024*	*[57]*
Computer Modeling in Engineering and Sciences	*2023*	*[59]*
Springer (Journal)	*2025*	*[1]*

Таблица 2 демонстрирует распределение отобранных исследований по выявлению вовлеченности студентов с использованием методов компьютерного зрения именно в материалах научных конференций. В отличие от журнальных публикаций, представленные данные акцентируют внимание на конференциях как ключевых площадках для апробации и обсуждения новых научных результатов.

Таблица 2. Места публикации избранных исследований по выявлению вовлеченности студентов с помощью компьютерного зрения (Конференция)

Конференция	*Год*	*Ссылки*
Lecture Notes in Computer Science (LNCS)	*2020, 2024*	*[19], [58]*
IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)	*2022, 2024*	*[20], [22]*
IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)	*2022, 2023*	*[23], [24]*
International Learning and Technology Conference (L&T)	*2025*	*[60]*
ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI)	*2020*	*[13]*
Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)	*2020*	*[15]*
IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing	*2021*	*[17]*
Springer (Engineering Applications of Neural Networks)	*2024*	*[21]*
IEEE International Conference on Big Data (BigData)	*2023*	*[2]*

Несколько общедоступных наборов данных сыграли ключевую роль в развитии исследований по обнаружению вовлеченности [4]. Набор FER-2013 содержит более 35 тысяч изображений лиц размером 48×48 пикселей, классифицированных по семи категориям эмоций, и широко используется для обучения моделей распознавания эмоций благодаря сбалансированному распределению на обучающую, валидационную и тестовую выборки [4]. Набор DAiSEE предлагает четырехуровневую аннотацию вовлеченности от полного отсутствия до высокого уровня наряду с метками эмоций, однако демонстрирует дисбаланс классов с преобладанием состояний высокой вовлеченности, что смещает модели в сторону классов большинства [4, 13]. Наборы данных челленджа EmotiW, особенно задачи прогнозирования вовлеченности 2018 и 2019 годов, стали стандартными эталонами: они включают почти 200 видео студентов, просматривающих контент MOOC в естественных условиях, с разметкой от пяти аннотаторов, достигших приемлемого уровня согласованности [4, 13, 15]. Вместе с тем ограниченная применимость общедоступных наборов данных к реальным учебным средам побудила многих исследователей разрабатывать специализированные наборы, предназначенные для захвата вовлеченности в аутентичных образовательных условиях [4].

Обнаружение вовлеченности на основе компьютерного зрения опирается на извлечение визуальных сигналов из видеопотоков, причем литература демонстрирует растущую сложность в инженерии признаков – от низкоуровневых пиксельных до высокоуровневых семантических индикаторов [4, 13, 15]. Наиболее широко используются мимические признаки: OpenFace извлекает единицы действия на основе системы кодирования лицевых движений, отслеживая до двадцати различных движений лицевых мышц с оценками интенсивности, а также предоставляет признаки позы головы и направления взгляда [4, 13, 15]. Оценка направления взгляда значительно продвинулась с помощью глубокого обучения, например, с использованием сверточной нейронной сети L2CS-Net на базе ResNet50 для прогнозирования углов поворота и наклона, где вовлеченность определяется нахождением взгляда в пределах установленных границ относительно экрана [7]. Отслеживание позы тела стало дополнительной модальностью, важной для обнаружения поведенческой вовлеченности, особенно при окклюзии лица, и OpenPose позволяет отслеживать движения головы, тела и рук из стандартного видео [13].

Ранние системы обнаружения вовлеченности использовали классические алгоритмы машинного обучения с ручными признаками, включая комбинирование мимических признаков с данными о движениях мыши, что повышало точность по сравнению с использованием только мимики [7], а также методы на основе кластеризации видеосегментов с последующим переназначением интенсивности вовлеченности [13]. Современные системы характеризуются доминированием архитектур глубокого обучения: сверточные нейронные сети применяются в различных конфигурациях – от последовательных архитектур с небольшими фильтрами и пулингом [11] до более продвинутых решений, таких как RepVGG, которая благодаря структурной репараметризации преобразует многопутевые сети во время обучения в однопутевые при выводе для повышения эффективности [7]. Рекуррентные архитектуры, особенно сети долгой краткосрочной памяти в сочетании со сверточными признаками, моделируют временные зависимости и развитие состояний вовлеченности на протяжении учебных сессий [4, 13, 15].

Для количественной оценки вовлеченности используются различные подходы: четырехуровневая дискретная шкала, различающая состояния от полного отсутствия до высокой вовлеченности [4, 7, 13, 15], и непрерывные рейтинги, обеспечивающие высокое временное разрешение через покадровые траектории [7]. Оценка систем выполняется с помощью нескольких метрик: точность классификации остается наиболее часто сообщаемой, хотя требует осторожной интерпретации из-за дисбаланса классов [1, 4, 13]; F1-мера важна для несбалансированных данных [4]; среднеквадратичная ошибка применяется для непрерывных измерений [4], а для порядковых шкал метрики корреляции, такие как корреляция Пирсона, дают лучшее представление о качестве предсказаний [13, 15].

Результаты исследования

Наборы данных FER-2013 и RAF-DB последовательно дают высокую производительность по моделям, что объясняется их структурированными аннотациями и соответствием задачам распознавания мимики, в которых CNN преуспевают. DAISEE демонстрирует более широкий диапазон производительности, отражая сложность анализа вовлеченности в видеосредах.

Важным результатом этого обзора является ограниченное внимание к безопасности и конфиденциальности в исследованиях по обнаружению вовлеченности. Унсити и др. [12] проанализировали 43 отобранные статьи и классифицировали их по уровню рассмотрения конфиденциальности:

- SP0: Безопасность или конфиденциальность вообще не упоминаются – 29 статей (67%)
- SP1: Безопасность и/или конфиденциальность упоминаются как аспекты, которые необходимо учитывать – 7 статей (16%)
- SP2: Описаны стратегии обеспечения безопасности или конфиденциальности – 3 статьи (7%)
- SP3: Безопасность и конфиденциальность всесторонне рассмотрены – 1 статья (2%)

Это пренебрежение вызывает беспокойство, поскольку системы обнаружения вовлеченности по своей природе обрабатывают личную информацию – изображения лиц, которые могут идентифицировать отдельных лиц и потенциально раскрывать конфиденциальные эмоциональные состояния [12].

В рассмотренной литературе выявлены устойчивые проблемы, ограничивающие применение систем обнаружения вовлеченности в реальном мире:

1. Изменчивость окружающей среды – условия освещения, качество камеры, позы головы и окклюзии снижают производительность моделей за пределами лабораторных условий [4, 7, 11, 12].
2. Дисбаланс классов – дисбаланс классов в наборах данных о вовлеченности смещает модели в сторону классов большинства (высокая вовлеченность), снижая чувствительность к состояниям невовлеченности, наиболее важным для образовательного вмешательства [1, 13].

3. Демографическая изменчивость – возраст, пол, культура, географическое положение влияют на паттерны мимики и поведение вовлеченности. Модели, обученные на однородных популяциях, могут не обобщаться на разнообразные группы учащихся [4, 11, 12].

4. Ограничения наборов данных – существующие общедоступные наборы данных демонстрируют дисбаланс классов, ограниченное демографическое разнообразие и узкие экологические контексты [4, 11, 13].

5. Долгосрочная динамика – большинство исследований используют поперечные дизайны или короткие сессии, давая ограниченное понимание того, как паттерны вовлеченности развиваются в течение курсов [4, 7, 11].

Этот обзор литературы синтезирует текущие исследования (2020–2025) по обнаружению вовлеченности на основе компьютерного зрения, раскрывая область на пересечении значительного технического прогресса и устойчивых концептуальных, методологических и этических проблем. Рассмотренные исследования демонстрируют, что системы КЗ могут эффективно извлекать значимые индикаторы вовлеченности из мимики, паттернов взгляда и движений тела, достигая точности, приближающейся или превосходящей человеческую производительность в контролируемых условиях [4, 7, 11, 13]. Архитектуры глубокого обучения, особенно CNN и их варианты, доказали свою способность изучать сложные представления признаков из необработанных видеоданных, а ансамблевые и мультимодальные подходы последовательно превосходят одномодальные системы [4, 13, 15].

Важным результатом этого обзора является ограниченное внимание к безопасности и конфиденциальности в исследованиях по обнаружению вовлеченности. Унсити и др. [12] проанализировали 43 отобранные статьи и классифицировали их по уровню рассмотрения конфиденциальности:

- SP0: Безопасность или конфиденциальность вообще не упоминаются – 29 статей (67%)
- SP1: Безопасность и/или конфиденциальность упоминаются как аспекты, которые необходимо учитывать – 7 статей (16%)
- SP2: Описаны стратегии безопасности или конфиденциальности – 3 статьи (7%)
- SP3: Безопасность и конфиденциальность всесторонне рассмотрены – 1 статья (2%)

Это пренебрежение вызывает беспокойство, поскольку системы обнаружения вовлеченности по своей природе обрабатывают личную информацию – изображения лиц, которые могут идентифицировать отдельных лиц и потенциально раскрывать конфиденциальные эмоциональные состояния [12].

В рассмотренной литературе выявлены устойчивые проблемы, ограничивающие применение систем обнаружения вовлеченности в реальном мире:

1. Изменчивость окружающей среды – условия освещения, качество камеры, позы головы и окклюзии снижают производительность моделей за пределами лабораторных условий [4, 7, 11, 12].

2. Дисбаланс классов – дисбаланс классов в наборах данных о вовлеченности смещает модели в сторону классов большинства (высокая вовлеченность), снижая чувствительность к состояниям невовлеченности, наиболее важным для образовательного вмешательства [1, 13].

3. Демографическая изменчивость – возраст, пол, культура, географическое положение влияют на паттерны мимики и поведение вовлеченности. Модели, обученные на однородных популяциях, могут не обобщаться на разнообразные группы учащихся [4, 11, 12].

4. Ограничения наборов данных – существующие общедоступные наборы данных демонстрируют дисбаланс классов, ограниченное демографическое разнообразие и узкие экологические контексты [4, 11, 13].

5. Долгосрочная динамика – большинство исследований используют поперечные дизайны или короткие сессии, давая ограниченное понимание того, как паттерны вовлеченности развиваются в течение курсов [4, 7, 11].

Этот обзор литературы синтезирует текущие исследования (2020-2025) по обнаружению вовлеченности на основе компьютерного зрения, раскрывая область на пересечении

значительного технического прогресса и устойчивых концептуальных, методологических и этических проблем. Рассмотренные исследования демонстрируют, что системы компьютерного зрения могут эффективно извлекать значимые индикаторы вовлеченности из мимики, паттернов взгляда и движений тела, достигая точности, приближающейся или превосходящей человеческую производительность в контролируемых условиях [4, 7, 11, 13]. Архитектуры глубокого обучения, особенно CNN и их варианты, доказали свою способность изучать сложные представления признаков из необработанных видеоданных, а ансамблевые и мультимодальные подходы последовательно превосходят одномодальные системы [4, 13, 15].

Дискуссия

Однако преобразование этих технических возможностей в практические образовательные инструменты остается неполным. Из этого синтеза вытекает несколько критических пробелов.

Во-первых, в области отсутствует стандартизированный подход к концептуализации и операционализации вовлеченности. Хотя большинство исследований ссылаются на трехкомпонентную модель (поведенческая, когнитивная, эмоциональная), конкретные индикаторы и их сопоставления значительно различаются, что затрудняет сравнение между исследованиями и мета-анализ [4, 7]. Области были бы полезны консенсусные руководящие принципы, определяющие минимальные стандарты отчетности для конструктов вовлеченности, наборов признаков и протоколов оценки.

Во-вторых, ограничения наборов данных сдерживают прогресс. Существующие общедоступные наборы данных, хотя и ценны, демонстрируют дисбаланс классов, ограниченное демографическое разнообразие и узкие экологические контексты [4, 11, 13]. Преобладание западных, образованных, молодых взрослых выборок поднимает вопросы о кросскультурной обобщаемости – паттерны мимики, нормы взгляда и поведение вовлеченности могут различаться в разных культурах способами, которые текущие наборы данных не могут уловить [4, 12]. Совместные усилия по созданию крупномасштабных, разнообразных, этично полученных наборов данных должны быть приоритетными.

В-третьих, объединение нескольких модальностей – лица, глаз, тела, голоса, физиологических сигналов – технически сложно, но концептуально необходимо [4, 7, 11, 12, 13]. Вовлеченность по своей природе мультимодальна; ограничение анализа одним каналом неизбежно упускает важные сигналы. Демонстрация Чжан и др. [7] того, что объединение экспрессии и данных мыши улучшает точность, и включение Чанг и др. [13] отслеживания тела указывают на мультимодальную фузию как на перспективное направление.

В-четвертых, необходимо больше внимания уделять временной динамике. Вовлеченность колеблется в течение секунд, минут и сессий; статические классификации теряют информацию о траекториях, паттернах и переходах [4, 7]. Посредственная производительность подходов на основе LSTM в прогнозировании вовлеченности указывает на неадекватность текущего временного моделирования [4, 13, 15].

В-пятых, разрыв в конфиденциальности и этике, задокументированный Унсити и др. [12], требует срочного исправления. Полное отсутствие рассмотрения вопросов конфиденциальности в опубликованных исследованиях неприемлемо для технологий, предназначенных для использования с уязвимыми группами населения. Будущие работы должны включать принципы конфиденциальности по дизайну: минимизацию данных, ограничение цели, прозрачность, безопасность и контроль со стороны пользователя.

В-шестых, педагогическая интеграция остается теоретически недостаточно изученной. Системы обнаружения идентифицируют состояния вовлеченности, но не предписывают соответствующие ответы. Исследования должны изучить, как преподаватели могут эффективно использовать информацию о вовлеченности [4, 12, 14].

Существует мало долгосрочных исследований, изучающих реальное применение. Большинство исследований оценивают модели в контролируемых или полуконтролируемых условиях в течение коротких периодов [4, 7, 11].

Заключение

В ходе настоящего исследования была подтверждена технологическая зрелость методов компьютерного зрения для задач обнаружения вовлеченности, а также продемонстрирован их высокий потенциал для совершенствования систем онлайн-обучения. За период 2020–2025 годов архитектуры глубокого обучения, эталонные наборы данных и подходы к мультимодальной интеграции достигли уровня развития, позволяющего говорить о готовности технологий к практическому внедрению. Разработанные системы способны надежно извлекать и интерпретировать визуальные сигналы, обеспечивая точность прогнозов, достаточную для решения прикладных образовательных задач.

Полученные результаты подтверждают, что эмоциональная вовлеченность остается доминирующим направлением анализа, при этом наблюдается устойчивый рост интереса к многомерным моделям, учитывающим сложную природу этого феномена. Анализ мимики, дополненный мультимодальными подходами, формирует основу современных решений, наиболее адаптированных к условиям цифровой образовательной среды.

Реализация всего потенциала технологий требует последовательного решения ряда концептуальных и прикладных задач, включающих обеспечение разнообразия данных, совершенствование методов временного моделирования, защиту конфиденциальности и педагогическую валидацию решений. В условиях экспансии онлайн-образования разработка точных, этичных и ориентированных на человека систем становится не просто техническим вызовом, а образовательным приоритетом. Дальнейшее развитие видится на пересечении компьютерного зрения, наук об обучении и человеко-ориентированного проектирования, что позволит создавать инструменты, реально поддерживающие учащихся и преподавателей в динамике современных образовательных процессов.

References

[1] Tingting Han, Ruqian Liu, Shuwei Dou, Wei Wang, Xiaoming Ding, Wenxia Zhang, Jihao Lang, Wenxuan Li, Jixing Han. "Balancing act: engagement detection in online learning through master-assistant models with an enhanced hierarchical attention mechanism". Published online: 30 September 2025 © The Author(s), under exclusive licence to Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2025

[2] D. Chiaro, D. Annuziata, S. Izzo, "Unveiling engagement in virtual classrooms: A multimodal analysis," in Proc. IEEE International Conference on Big Data (BigData), Dec. 2023, pp. 4761-4769.

[3] Y. Qi, L. Zhuang, H. Chen, X. Han, and A. Liang, "Evaluation of students' learning engagement in online classes based on multimodal vision perspective," Electronics, vol. 13, no. 1, p. 149, Dec. 2023.

[4] I. Qarbal, N. Sael, and S. Ouahabi, "Student's engagement detection based on computer vision: A systematic literature review," IEEE Access, vol. 13, pp. 140519-140543, 2025.

[5] L. Mishra, T. Gupta, and A. Shree, "Online teaching-learning in higher education during lockdown period of COVID-19 pandemic," International Journal of Educational Research Open, vol. 1, Jan. 2020, Art. no. 100012.

[6] A. Abedi and S. S. Khan, "Engagement measurement based on facial landmarks and spatial-temporal graph convolutional networks," 2024, arXiv:2403.17175.

[7] P. Bhardwaj, P. K. Gupta, H. Panwar, M. K. Siddiqui, R. Morales-Menendez, and A. Bhai, "Application of deep learning on student engagement in e-learning environments," Computers and Electrical Engineering, vol. 93, Jul. 2021, Art. no. 107277.

[8] S. Gupta, P. Kumar, and R. K. Tekchandani, "Facial emotion recognition based real-time learner engagement detection system in online learning context using deep learning models," Multimedia Tools and Applications, vol. 82, no. 8, pp. 11365-11394, Mar. 2023.

[9] S. Gupta, P. Kumar, and R. Tekchandani, "A multimodal facial cues based engagement detection system in e-learning context using deep learning approach," Multimedia Tools and Applications, vol. 82, no. 18, pp. 28589-28615, Jul. 2023.

[10] K. Watanabe, T. Sathyanarayana, A. Dengel, and S. Ishimaru, "EnGauge: Engagement gauge of meeting participants estimated by facial expression and deep neural network," IEEE Access, vol. 11, pp. 52886-52898, 2023.

[11] A. Harb, A. Gad, M. Yaghi, M. Alhalabi, H. Zia, J. Yousaf, A. Khelifi, K. Ghoudi, and M. Ghazal, "Diverse distant-students deep emotion recognition and visualization," Computers and Electrical Engineering, vol. 111, Nov. 2023, Art. no. 108963.

[12] O. Unciti, A. Martínez-Ballesté, and R. Palau, Real-time emotion recognition and its impact on educational environment, in Proc. International Conference on Computer Supported Education, 2023, pp. 1- 12.

[13] C. Chang, C. Zhang, L. Chen, and Y. Liu, "An ensemble model using face and body tracking for engagement detection," in Proc. 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction, Oct. 2020, pp. 616-622.

[14] P. Buono, B. De Carolis, F. D'Errico, N. Macchiarulo, and G. Palestra, "Assessing student engagement from facial behavior in on-line learning," Multimedia Tools and Applications, vol. 82, no. 9, pp. 12859-12877, Apr. 2023.

[15] A. Kaur, A. Mustafa, L. Mehta, and A. Dhall, "Prediction and localization of student engagement in the wild," in Proc. Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA), Dec. 2020, pp. 1-8.

[16] X. Ai, V. S. Sheng, C. Li, and Z. Cui, "Class-attention video transformer for engagement intensity prediction," 2022, arXiv:2208.07216.

[17] D. Boulanger, M. A. A. Dewan, V. S. Kumar, and F. Lin, "Lightweight and interpretable detection of affective engagement for online learners," in Proc. IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Oct. 2021, pp. 176-184.

[18] M. U. Ucar and E. Özdemir, "Recognizing students and detecting student engagement with real-time image processing," Electronics, vol. 11, no. 9, p. 1500, May 2022.

[19] Z. A. T. Ahmed, M. E. Jadhav, A. M. Al-madani, M. Tawfik, S. N. Alsubari, and A. A. A. Shareef, "Real-time detection of student engagement: Deep learning-based system," in Proc. International Conference on Innovative Computing and Communications, Springer, 2021, pp. 313-323.

[20] A. M. Mathew, A. A. Khan, T. Khalid, and R. Souissi, "GESCAM: A dataset and method on gaze estimation for classroom attention measurement," in Proc. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), Jun. 2024, pp. 636-645.

ҒТАХР 20.23.19

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.014

А.М. Байдулла[1*], Д.С. Жайсанова[1], М.Е. Мансурова[1], А. Мұса[1]

[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[*]*e-mail: ayaulym.bajdulla@gmail.com*

LLM НЕГІЗІНДЕГІ БІЛІМ БЕРУ ШЕШІМДЕРІН ҚОЛДАУ ЖҮЙЕЛЕРІН БИБЛИОМЕТРИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Аңдатпа

Жасанды интеллект агенттерінің тренд ретінде қалыптасуы, үлкен тілдік модельдер (LLM) негізінде жұмыс жасайтын цифрлық кеңесшілерді әр түрлі салаларға енгізуге қажеттілікті туғызады. Білім берудің дамушы ландшафтында осы салаға жасанды интеллект агенттерін енгізу: оқытуды жеке адамның қабілеттеріне сай таңдау, оқытушының жүктемехсін азайту, инклюзивті оқыту секілді бірқатар өзекті мәселелердің шешімі болып табылады. Бұл мақалада аталған саладағы жетекші академиялық деректер базасының ауқымды жиынтығына сүйене отырып, соңғы 15 жылдағы ғылыми еңбектерге кешенді шолу жасалып, ықпалды авторлар мен басым тақырыптық топтар, негізгі зертеу бағыттары анықталды. Зерттеу әдістемесі 2010-2025 жылдардағы Web of Science дерекқорынан іріктеліп алынған 1362 мақаланы библиометриялық талдауға негізделген, VOSviewer бағдарламалық жасақтамасы мен R бағдарламалау тілін қолдана отырып, желілік байланыстар мен кластерлік талдауды визуализациялауға арналған. Бұл библиометриялық анализ нәтижесінде үлкен тілдік модельдер негізіндегі білім берудегі цифрлық кеңесшілер тақырыбы аясындағы ғылыми әдебиеттердің интеллектуалды ландшафты картаға түсірілді. Бұл зерттеу LLM негізіндегі цифрлық көмекшілерді оңтайландыруға ұмтылатын зерттеушілерде құнды түсініктер қалыптастыруға көмектеседі. Нәтижелер бұл саладағы басты назар білім беру мекемелеріндегі жекешелендірген оқыту мен шешім қабылдау жүйесін жақсарту, әкімшілік басқару операцияларын оңтайландыру секілді аспекттерге қойылғанын, дегенмен цифрлық кеңесшілердің ұзақ мерзімді әсері, ауқымдылығы, деректердің құпиялылығы, этика мәселелері және сенімді интеллектуалды басқару жүйелерінің қажеттігі секілді мәселелер әлі де болса тереңірек зерттеуді талап ететіндігі анықталды.

Түйін сөздер: сандық кеңесшілер, үлкен тілдік модельдер, білім беру шешімдерін қабылдау, библиометриялық талдау, оқыту аналитикасы, білім берудегі жасанды интеллект, интеллектуалды басқару жүйелері.

А.М. Байдулла[1], Д.С. Жайсанова [1], М.Е. Мансурова [1], А. Мұса [1]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

БИБЛИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ НА БАЗЕ LLM

Аннотация

Становление агентов искусственного интеллекта в качестве тренда создает потребность во внедрении цифровых консультантов в различные области, основанные на больших языковых моделях (LLM). Внедрение агентов искусственного интеллекта в эту область в развивающемся ландшафте образования является решением ряда актуальных проблем: выбор обучения в соответствии с способностями человека, снижение нагрузки преподавателя, инклюзивное обучение. В данной статье проведен комплексный обзор научных работ за последние 15 лет, основанный на обширном наборе ведущих академических баз данных в данной области, определены влиятельные авторы и приоритетные тематические группы, основные направления исследований. Методология исследования основана на библиометрическом анализе 1362 статей, отобранных из базы данных Web of Science за 2010-2025 гг., предназначенных для визуализации сетевых связей и кластерного анализа с использованием программного обеспечения VOSviewer и языка программирования R. В результате этого библиометрического анализа был нанесен на карту интеллектуальный ландшафт научной литературы в рамках темы цифровых консультантов в образовании на основе больших языковых

моделей. Это исследование помогает сформировать ценную информацию у исследователей, стремящихся оптимизировать цифровых помощников на основе LLM. Результаты показали, что основное внимание в этой области уделяется таким аспектам, как улучшение приватизированной системы обучения и принятия решений в образовательных учреждениях, оптимизация административных управленческих операций, хотя такие вопросы, как долгосрочное влияние цифровых консультантов, масштабируемость, конфиденциальность данных, вопросы этики и необходимость надежных интеллектуальных систем управления, по-прежнему требуют более глубокого изучения.

Ключевые слова: цифровые консультанты, большие языковые модели, принятие образовательных решений, библиометрический анализ, аналитика обучения, искусственный интеллект в образовании, интеллектуальные системы управления.

A.M. Baidulla[1], D.S. Zhaisanova[1], M.E. Mansurova[1], A. Mussa[1]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF LLM-BASED EDUCATIONAL DECISION SUPPORT SYSTEMS

Abstract

The emergence of artificial intelligence agents as a trend is creating a need for the implementation of digital consultants based on large-scale language models (LLMs) in various fields. In the evolving educational landscape, the introduction of AI agents in this field addresses a number of pressing issues, including tailoring instruction to individual abilities, reducing teacher workload, and promoting inclusive learning. This article provides a comprehensive review of the research in this field over the past 15 years, covering all aspects, and is based on a comprehensive collection of leading academic databases in the field, such as WOS. It identifies influential authors, priority subject areas, and key research areas. The research methodology is based on a bibliometric analysis of 1362 articles selected from the Web of Science database between 2010 and 2025, which were subjected to network visualization and cluster analysis using VOSviewer software and the R programming language. This bibliometric analysis mapped the intellectual landscape of scientific literature on the topic of digital consultants in education based on large-scale language models. This study provides valuable insights for researchers seeking to optimize LLM-based digital assistants. The results showed that the primary focus in this area is on aspects such as improving the privatized learning and decision-making systems in educational institutions and streamlining administrative management operations. However, issues such as the long-term impact of digital assistants, scalability, data privacy, ethical issues, and the need for robust intelligent management systems still require further study.

Keywords: digital consultants, large language models, educational decision making, bibliometric analysis, learning analytics, artificial intelligence in education, intelligent control systems.

Кіріспе

Үлкен тілдік модельдерге негізделген цифрлық кеңесшілер білім беру жүйесіне барған сайын интеграциялануда, бұл өз кезегінде оқытушыларға да әкімшілерге де стратегиялық жоспарлауды, оқу бағдарламаларын әзірлеуді және басқаруды оңтайландыруда көмек береді. ЖИ негізделген жүйелерге деген тәуелділіктің артуы олардың қолданылуын, артықшылықтарын және кемшіліктерін жан-жақты академиялық түсіну қажеттілігін көрсетеді [1]. Білім берудегі LLM-ге негізделген цифрлық кеңесшілерді енгізу мекемелерге Data-Driven Decision-Making (DDDM) Деректерге негізделген шешім қабылдау құрылымдарының қажеттілігімен байланысты. Студенттердің оқу үлгерім секілді өнімділік көрсеткіштерінен бастап институционалдық ресурстарды бөлуге дейінгі білім беру деректерінің қолжетімділігінің артуы ЖИ-ге негізделген түсініктерді пайдалану үшін жаңа мүмкіндіктер ашты. Цифрлық көмекші тәуекел тобындағы студенттерді анықтауға, оқыту әдістерін жақсартуға, білім беру жүйесінің тиімділігін арттыруға көмектеседі. Дегенмен, білім беру мекемелері бұл технологияларды енгізген сайын, деректер қауіпсіздігі, этикалық салдары және жасанды интеллект жасаған ұсыныстардың сапасы жөнінен сұрақтар туындайды [2]. Бұл саладағы зерттеулер машиналық оқыту алгоритмдері мен табиғи тілді өңдеу (NLP) әдістьерінің ауқымды білім беру деректер жиынтығын талдаудағы әлеуетін зерттеді. Зерттеулер жасанды интеллекттің студенттердің қатысуын жақсарту,күнделікті әкімшілік

шешімдерді автоматтандыру, интеллектуалды репетиторлық жүйелердің жұмысын оңтайландыру мүмкіндіктерін атап өтті. Соған қарамастан әдебиеттерде алгоритмдік бейімділік, контекстік түсінудегі шектеулер және модельдерді үздіксіз жаңарту қажеттілігі сияқты қиындықтар кеңінен қолдануға кедергі келтіретіні көрсетілген [3]. Библиометриялық талдау білім беру шешімдерін қабылдауда LLM-ге негізделген цифрлық кеңесшілердің эволюциясын зерттеу үшін маңызды әдіснамалық тәсіл ретінде қызмет етті. Негізгі зерттеу траекторияларын картаға түсіру, осы саладағы белсенді және ықпалды авторларды анықтау және басым тақырыптық кластерлерді жіктеу арқылы библиометриялық зерттеулер жасанды интеллект басқаратын білім беру шешімдерінің қалай тұжырымдалғаны және енгізілгені туралы құрлымдық түсінік береді. Қолданыстағы зерттеулер жекешелендірілген оқытуға бағытталған кері байланыс механизмдеріне және интеллектуалды бағалау құралдарына, бейімделгіш оқу орталықтарына байланысты жарияланымдар санының артуымен жасанды интеллектті білім беру процестеріне енгізуге ғылыми қызығушылықтың артып келе жатқанын көрсетті [4]. Дегенмен, бұл технологиялардың ұзақ мерзімді әсерін және олардың білім беруді басқарудағы әсерін түсінудегі олқылықтар әлі де бар.

Жасанды интеллектке негізделген цифрлық кеңесшілерге деген қажеттілік жекелендірілген және құзыреттілікке негізделген білім беруге көшу арқылы одан әрі нығая түседі. LLMs нақты уақыт режимінде деректердің үлкен көлемін өңдеу мүмкіндігіне ие, бұл оқытушылар мен әкімшілер оқу нәтижелерін жақсарту үшін пайдалана алатын практикалық ақпаратты ұсынады.Бұл модельдер интеллектуалды ұсыныстар жүйесін дамытуға мүмкіндік береді, бағалау мен кері байланысты қамтамасыз етуге көмектеседі және оқытудың динамикалық және интерактивті ортасын құруға ықпал етеді. Осыған қарамастан, жасанды интеллект шешімдерінің ашықтығына, әділдігіне және түсіндірілуіне қатысты алаңдаушылық олардың орындалуын реттеу үшін сенімді басқару жүйелерін әзірлеуді талап етеді [5].

Жасанды интеллектке негізделген цифрлық кеңесшілер білім беру саласындағы шешім қабылдауды жақсартудың перспективалы жолдарын ұсынса да, оларды енгізу қатаң бағалау механизмдерімен бірге жүруі керек. LLMs-ке тәуелділік деректердің құпиялылығына, шешім қабылдаудағы ықтимал біржақтылыққа және жасанды интеллект арқылы жасалған ұсыныстарға қатысты этикалық ойларға байланысты тәуекелдерді тудырады. Бұл мәселелерді шешу үшін білім беру мекемелерінде осы технологияларды жауапкершілікпен пайдалануды қамтамасыз ететін нұсқаулықтарды әзірлеу үшін тәрбиешілер, саясаткерлер және жасанды интеллект зерттеушілері арасындағы пәнаралық ынтымақтастық қажет [6].

Бұл зерттеу білім берудегі LLMs негізінде цифрлық кеңесшілер туралы бар әдебиеттерге библиометриялық талдау жүргізу арқылы жалғасып жатқан дискурсқа үлес қосуға бағытталған. Зерттеудің мақсаты келесі негізгі сұрақтарға жауап беру болып табылады:

1) Осы саладағы елдерден, авторлардан және мекемелерден ең ықпалды үлестер қандай?
2) Білім беру саласындағы шешім қабылдауда LLM негізіндегі цифрлық кеңесшілердің ғылыми ландшафтын сипаттайтын басым тақырыптар мен пайда болатын үрдістер қандай?

Академиялық әдебиеттерді жүйелі түрде талдау арқылы бұл зерттеу жасанды интеллект негізіндегі білім беруді қолдау жүйелері бойынша зерттеулердің интеллектуалдық құрылымы туралы түсінік береді.

Бұл жұмыстағы академиялық әдебиеттерді жүйелі талдау AI негізіндегі білім беру қолдау жүйелеріне арналған зерттеулердің интеллектуалды құрылымын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді.

Осы саладағы тақырыптық эволюцияны түсіну аі көмегімен білім беруді дамытудың болашақ векторларын анықтау үшін өте маңызды. Зерттеулер көрсеткендей, білім беруде AI енгізу әдеттегі оқытуды басқару жүйелерінен (LMS) асып түсті және қазір шешімдерді интеллектуалды қолдау тетіктерін, студенттердің үлгерімін болжау аналитикасын және AI көмегімен оқу мазмұнын құруды қамтиды. Цифрлық кеңесшілер жетілдірілген сайын, олардың білім беру процесіне интеграциясы педагогикалық салдарға, адам мен жасанды

интеллекттің өзара әрекеттесуіне және осындай араласулардың ауқымдылығына қатысты маңызды мәселелерді көтереді [7].

Негізгі тақырыптарды зерттеумен қатар, бұл жұмыста білім беруде цифрлық кеңесшілерді енгізуге байланысты сын-қатерлер талданады. Институционалдық қарсылық, АИ саласындағы оқытушылардың сауаттылығының төмен деңгейі және нормативтік-құқықтық реттеу мәселелері олардың бейімделуіне айтарлықтай кедергілер тудырады. Сонымен қатар, оқу орындарының технологиялық инфрақұрылымындағы айырмашылықтар жасанды интеллект негізіндегі ресурстарды әділ бөлуге әсер етеді. Бұл мәселелерді шешу саяси ұсыныстарды әзірлеуді, аі оқыту бағдарламаларына инвестиция салуды және білім беру контекстіне бейімделген этикалық принциптерді құруды қамтитын кешенді тәсілді қажет етеді [8].

Білім беру ортасы одан әрі өзгерген сайын, үлкен тілдік модельдер (LLM) негізінде Цифрлық кеңесшілердің рөлі шешім қабылдау процестерінде орталық бола түседі. Осы библиометриялық талдаудың нәтижелері шешімдерді қолдаудың интеллектуалды жүйелерін пайдалануды оңтайландыруға тырысатын зерттеушілер, саясаткерлер мен тәрбиешілер үшін құнды. Осы саланың интеллектуалды траекториясын картаға түсіру арқылы бұл зерттеу цифрлық кеңесшілердің білім берудегі шешім қабылдаудың сапасын, тиімділігін және инклюзивтілігін қалай арттыра алатынын түсінуге ықпал етеді.

Сайып келгенде, жасанды интеллектті білімге біріктіру теңдестірілген тәсілді қажет ететін мүмкіндіктер мен қиындықтарды ашады. LLM негізіндегі цифрлық кеңесшілер оқу және институттарды басқару процесін өзгерту мүмкіндігіне ие болғанымен, олардың табысы жауапты AI негіздерін, үздіксіз бағалау механизмдерін және инклюзивті саясат стратегияларын әзірлеуге байланысты. Болашақ зерттеулер білім берудегі аі этикалық аспектілеріне, LLM-ді қолданудың жаңа тәсілдерін іздеуге және аі негізіндегі білім беру шешімдерінің инновацияларын ынталандыру үшін академиялық орта мен Индустрия арасындағы ынтымақтастықты дамытуға бағытталуы керек [9].

Әдебиеттерге шолу: Білім беруде үлкен тілдік модельдерді (LLM) қолдануда

Білім беруде үлкен тілдік модельдерді (LLM) қолданудағы заманауи зерттеулерді бірнеше негізгі бағыттарға бөлуге болады:

1. Мүмкіндіктер мен техникалық шектеулер

Banerjee et al. (2024): авторлар ChatGPT техникалық пәндерді оқуда тамаша көмекші екенін растайды. Алайда, олар ескертеді: модель "галлюцинацияға" (нақты қателіктерге) бейім, бұл оқу процесіне AI енгізудің қауіпсіз хаттамаларын әзірлеуді талап етеді [10].

Shoufan (2021): AI сынақтармен қалай күресетінін зерттеді. ChatGPT кодты және теорияны талдауда мықты екендігі анықталды, бірақ абстрактілі ойлау мен визуалды интерпретация міндеттеріне жол береді [11].

2. Студенттердің мінез-құлқы мен мотивациясы

Sallam et al. (2023): БАӘ-дегі ауқымды сауалнама студенттердің 85% - ы ChatGPT қолданатынын көрсетті. Қызықты түсінік: AI-ді модельді оқудағы қиындықтарының "компенсаторы" ретінде қолдана отырып, орташа баллы төмен (GPA) студенттер жиі қолданады [12].

Crcek and Patekar (2023): этикалық парадоксты зерттеді. Студенттер тапсырмаларды орындау үшін AI қолдану әділ емес екенін түсінеді, бірақ өздерін ақтай отырып, мұны жалғастырады. Бұл университеттер ішіндегі нақты ережелердің қажеттілігін талап етеді [13].

3. Бағалаудағы және бейімделген оқытудағы AI

Rodriguez-Echeverría et al. (2023): испан университетіндегі Эксперимент AI-дің емтихандағы жетістігі сұрақтың тұжырымына байланысты екенін көрсетті. Авторлар АИ-ге контекстсіз білім беру шешімдерін қабылдауға сенбеуге кеңес береді [14].

Maity and Deroy (2024): генеративті AI-ді педагогикалық дәлдікке баса назар аудара отырып, жекелендірілген тьюторлық жүйелердің негізі ретінде қарастырыңыз [15].

Sajja et al. (2023): оқытуды басқару жүйелеріне (LMS) тікелей біріктірілген интеллектуалды көмекшілердің архитектурасын ұсынды [16].

4. Іске асыру стратегиясы және этика

Cukurova et al. (2023): мұғалімдер жасанды интеллектті жаңа бюрократияға қосудың орнына олардың жүктемесін азайтса ғана қолданатынын анықтады [17].

Owoc et al. (2021): оқу орындарына жасанды интеллектті сәтті енгізу үшін нақты бес сатылы стратегияны ұсынды [18].

Мишара (2024): құпиялылық пен әділеттілік мәселелерін көтереді. Негізгі хабарлама: AI цифрлық теңсіздікті күшейтпеуі үшін оқу орындарының саясаты белсенді болуы керек [19].

Зерттеу әдіснамасы

Бұл зерттеуде білім беру саласындағы шешім қабылдау үшін үлкен тілдік модельдерге (LLM) негізделген цифрлық кеңесшілерді қоршаған ғылыми пікірталасты зерттеу үшін кешенді библиометриялық талдау қолданылды.Ғылыми зерттеулер үшін жетекші дәйексөз индекстерінің бірі болып табылатын Web of Science (WoS) дерекқорынан алынған 2010-2025 жылдар аралығында жарияланған 1362 мақала талданды.

Тақырып аясындағы құнды әдебиеттерді анықтау үшін «үлкен тілдік модельдер», «жасанды интеллектпен басқарылатын көмекшілер» және «білім беру» арнайы кілттік сөздерді енгізіп, сәйкесінше іздеу барысындағы ауытқуларды азайту үшін «денсаулық сақтау», «медицина» кілттік сөздер арқылы жүйелік іздеу стратегиясын қолдандық. Іздеу «білім беру» және онымен байланысты пәндер санатындағы мақалаларды қамту үшін нақтыланды және белгіленген мерзімде жарияланған академиялық мақалалармен шектелді.

Деректерді жинау процесі келесі іздеу сұранысы бойынша құрылымдалған:

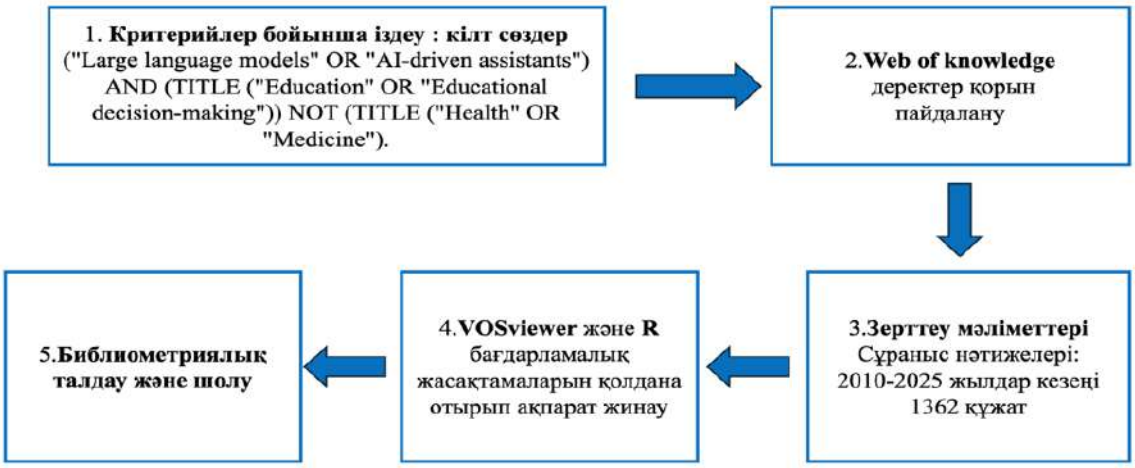
(TITLE ("Large language models" OR "AI-driven assistants")) AND (TITLE ("Education" OR "Educational decision-making")) NOT (TITLE ("Health" OR "Medicine")).

Іздеуіміздің бастапқы кезеңінде біз «білім беру» терминін қамтитын кең сұранысты қолдандық, нәтижесінде 1840 мақала пайда болды. Дегенмен, мақалаларды қолмен қарап шыққаннан кейін, нәтижелердің айтарлықтай бөлігі біздің зерттеу тақырыбымызға сәйкес келмейтінін анықтадық, себебі олар денсаулық сақтау және медицина сияқты салаларға бағытталған. Іздеуімізді нақтылау және нәтижелердің өзектілігін қамтамасыз ету үшін біз «денсаулық сақтау» және «медицина» тақырыптарына қатысты мақалаларды алып тастадық, бұл деректер жиынтығын 1362 мақалаға дейін қысқартты. Бұл нақтылау шамамен 26%-ға қысқартуға әкелді, бұл білім беру контексінде үлкен тілдік модельдерге негізделген сандық кеңесшілерге назар аудару үшін маңызды емес мазмұнды сүзудің және одан құтылудың маңыздылығын көрсетеді.

Біздің библиометриялық талдауымыз Web of Science негізгі жинағындағы төрт дәйексөз индексін қамтыды. Олар: Social Sciences Citation Index- Әлеуметтік Ғылымдарға Сілтеме Индексі, the Emerging Sources Citation Index- Дамушы Көздерге Сілтеме Индексі , the Science Citation Index Expanded- Ғылыми Дәйексөздер Индексі, and the Arts & Humanities Citation Index- Өнер Және Гуманитарлық Ғылымдарға Сілтеме Индексі. Бұл дереккөздер әртүрлі пәндерден алынған ғылыми мақалалардың кең және алуан түрлі спектрін ұсынды, бұл деректер жиынтығының инклюзивтілігі мен сенімділігін қамтамасыз етті. Талдау 1362 мақаланы қамтыды, олар дәйексөздер саны, кілт сөздер, авторлық желілер және жарияланым үрдістері сияқты әртүрлі библиометриялық параметрлер бойынша мұқият тексерілді.

Деректерді өңдеу және визуализациялау үшін біз VOSviewer және R бағдарламалау бағдарламалық жасақтамасы сияқты озық библиометриялық құралдарды қолдандық. Бұл құралдар желілік визуализациялар мен кластерлік карталарды жасауға мүмкіндік берді, бұл әртүрлі зерттеу тақырыптары, жетекші авторлар және мекемелер арасындағы байланыстарды ашуға көмектесті. Осы бағдарламалық құралдар арқылы біз LLM негізіндегі цифрлық кеңесшілердің білім беру шешімдерін қабылдау мен басқаруда қалай тұжырымдалып жатқанының маңызды үлгілерін анықтай алдық.

1-суретте зерттеудің библиометриялық құрылымын енгізу процесі көрсетілген. Библиометриялық талдау қорытындыларының негізділігі мен қайталану мүмкіндігін арттыру үшін алдыңғы қатарлы әдістемелік тәсілдермен жүйелі әдебиет шолуларын біріктірді. Сонымен қатар, VOSviewer және R бағдарламалау ортасы библиометриялық деректер жинақтары арасындағы қарым-қатынастарды картаға түсіру және талдау,осы саладағы негізгі үлес қосушыларды анықтау және ғылыми нәтижелер, зерттеу тенденциялары және жоғары әсерлі журналдар туралы жан-жақты түсінік алу үшін пайдаланылды.

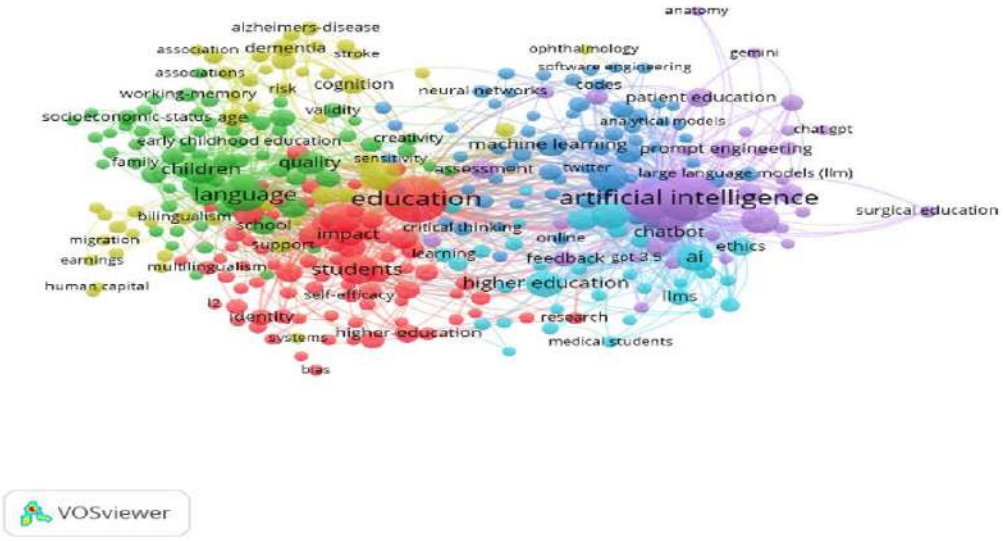


Сурет 1. Зерттеудің библиометриялық процесі

Осы қатаң библиометриялық тәсілді қолдана отырып, біз LLM негізіндегі цифрлық білім беру кеңесшілерінің зерттеулерінің қазіргі жағдайын құрылымдық тұрғыдан түсінуге назар аудардық, бұл саладағы этикалық және деректердің құпиялылығы мәселелері және тиімді басқару шеңберлерінің қажеттілігі сияқты ағымдағы мәселелерді де атап өттік. Осы талдаудың нәтижелері білім беру контекстінде жасанды интеллектке негізделген шешімдерді қолдау жүйелерін одан әрі әзірлеуге және енгізуге ұмтылатын зерттеушілер және оқытушыларға құнды ақпарат берді. Мақалада сипатталған әдістер білім беру саласындағы шешім қабылдаудағы LLM рөлін және оның негізіндегі цифрлық кеңесшілерді интеграциялаудың маңыздылығын және онымен байланысты интеллектуалды ландшафтты зерттеуді қамтиды.

Зерттеу нәтижелері

Бұл жұмыста біз білім беру саласындағы шешімдерді қаһылдау кезінде үлкен тілдік модельдерге негізделген цифрлық кеңесшілерге қатысты негізгі зерттеу траекторияларын, басым тақырыптық кластерлерді және интеллектуалды үлестерді зерттеу үшін жан-жақты библиометриялық талдау жүргіздік. Талдау жиі қолданылатын кілт сөздердің қатар пайда болуын, жетекші зерттеушілер арасындағы ғылыми ынтымақтастық үлгілерін және үлестердің географиялық таралуын қамтыды. Осы өзара байланысты зерттеу тақырыптарының көрнекі көріністерін құру арқылы ғылыми осы саланың негізгі ғылыми бағыттары мен дамып келе жатқан тенденциялар анықталды. Бұл нәтижелер LLM басқаратын цифрлық кеңесшілердің білім беру саласында қалай тұжырымдалатыны және енгізілетіні туралы құрылымдық перспективаны ұсынады,бұл олардың интеграциясына байланысты жетістіктер мен қиындықтарды көрсетеді. 2-суретте таңдалған деректер жиынтығында жиі кездесетін кілт сөздердің желілік талдауы көрсетілген. Талдау барысында білім беруде үлкен тілдік модельдерді қолдануға байланысты негізгі тақырыптық бағыттарды көрсететін 6 нақты кластер анықталды.



Сурет 2. Кілт сөз арқылы желіні талдау (VOSviewer бағдарламалық жасақтамасы)

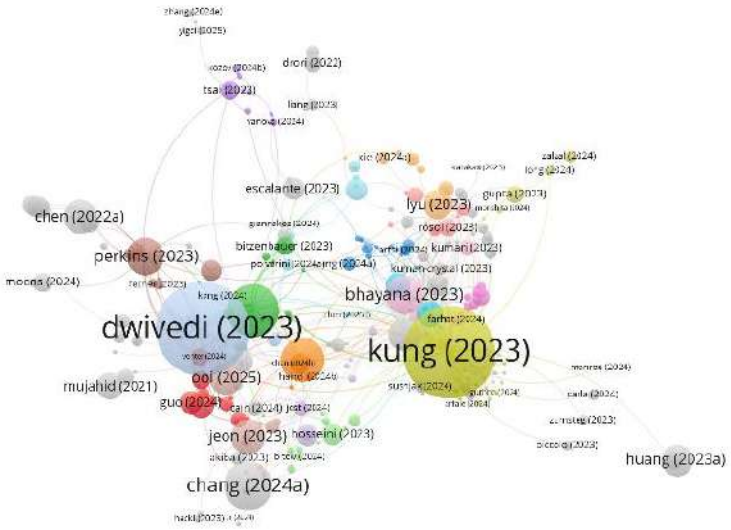
Кілт сөздер арасындағы байланыстар желі ретінде бейнеленеді, бұл осы саладағы негізгі зерттеу бағыттарын анықтауға мүмкіндік береді. 1-кестеде анықталған терминдер мен олардың пайда болу жиілігі егжей-тегжейлі көрсетілген.

Кесте 1. Желіні талдау кезіндегі негізгі терминдердің пайда болу нәтижелері

Кластер	*Термин*
77 тармақтан тұратын 1-кластер (қызыл түсті)	*2nd-language, academic achievement, adolescents, adoption, attitudes, beliefs, bias, bilingual education, classroom, clil, competence,comprehension,construction,context,culture,curriculum,difficulties, discourse, diversity, early intervention, education, efficacy, engagement, english, english language learners, equity, experience, experience, formative assessment, future, higher-education, identity, impact, inclusion, instruction, integration, intention, international students, knowledge, I2, language attitudes, language learners, language learning, literacy,model, motivation,multilingualism,organic-chemistry,participation, perceptions, policy, professional development, professional-development, research, schools, science, science education, secondary education, self-determination theory, self-efficacy, spanish, strategies, student engagement, student-achievement, students, success, systematic review, teacher education, teachers, teaching, technology, technology acceptance, university, variables, vocabulary development, youth*
67 тармақтан тұратын 2-кластер (жасыл түсті)	*academic-achievement, achievement, acquisition, associations, behavior, care, children, class size, classroom quality, cognitive-development, communication, creativity, decoding, early childhood, early childhood education, early-childhood, elementary, emergent literacy, environment, family, fit indexes, outcomes, gender-differences, individual-differences, infants, intelligence, intervention, language, language development, level, low-income, maternal education, math, mathematics, mathematics achievement, meta-analysis, metaanalysis, oral language, parents, personality, phonological awareness, poverty, predictors, preschool, preschoolers, prevalence, program, programs, quality, reading-comprehension, scale, school, school readiness, self-regulation, kindergarten, skills, socioeconomic-status, speech, involvement, teacher, validity, vocabulary, working-memory, writing, young-children, parental involvement, missing data*

61 тармақтан тұратын 3-кластер (көк түсті)	*accuracy, adaptation models, agreement, analytical models, artificial intelligence in education, bibliometrics, big data, chatbots, classification, codes, computational modeling, context modeling, covid-19, critical thinking, data models, data science, databases, deep learning, e-learning, electronic learning, engineering education, fit, generation, guidelines, internet, large language model (llm), large language models (llm), language model (llms), learning analytics, machine learning, mathematics education, measurement, natural language processing, natural language processing(nlp), neural networks, nlp, online, online education, online learning, prediction, programming education, programming profession, python, recognition, semantics, sensitivity, sentiment analysis, simulation, social media, software engineering, standards, stem education, system, task analysis, topic modeling, training, transformers, translation, twitter, visualization, words.*
49 тармақтан тұратын 4-кластерде (сары түсті) қабылдау мен білім беру сапасымен қанағаттану моделі талқыланды	*age, alzheimers-disease, assimilation, association, attainment, attention, bilingualism, cognition, cognitive impairment, community, decline, dementia, depression, diagnosis, education, elderly, emotions, enhancement, factors, family, geriatric, health, illness, interventions, life, memory, mental-health, models, neurocognitive, nursing, older, physical-activity, prevalence, quality-of-life, risk, self-esteem, social-integration, stress, treatment, well-being, work, proficiency, race, regression, risk, risk-factors, self-concept, stroke, support, systems, time, validation, women*
38 тармақтан тұратын 5-кластер (күлгін түсті) ішкі және сыртқы сапаны қамтамасыз етуге бағытталған	*anatomy, artificial intelligence, artificial intelligence (ai), assessment, bard, bloom's taxonomy, multiple-choice questions , chat gpt, chat bot, chatgpt, reliability, china, conversational agent, evaluation, exams, responses, feedback, gemini, qualitative research, prompt engineering, retrieval augmented generation, generative artificial intelligence, google bard, gpt-3.5, gpt-4, language model, language models, large language model, openai, large language models, llm, medical education, patient education, personalized learning, questions, radiology, readability, surgical education.*
34 тармақтан тұратын соңғы кластер (ашық көк түс) білім беру саясаты мен стратегиясымен байланысты	*academic integrity, academic writing, acceptance, ai, ai in education, ai literacy, aied, artificial-intelligence, attitude, barriers, challenges, conversational agents, design, educational technologies, educational technology, ethics, framework, generative ai, gpt, higher education, information, instructional design, learning, llms, medical students, opportunities, pedagogy, perception, perspectives, plagiarism, satisfaction, student.*

3-суретте авторлардың әлеуметтік ғылымдардың цифрлық трансформацияға қатысты жарияланымдар негізінде VOSviewer көмегімен жүргізген дәйексөздік және библиографиялық байланыстыру талдауының нәтижелері келтірілгені анық көрінеді. Әрбір түйін жеке авторды білдіреді, түйіннің өлшемі дәйексөздердің санын және жалпы әсерді көрсетеді, ал түс модульдікке негізделген кластерлеу арқылы анықталған тақырыптық кластерлерді білдіреді. Түйіндер арасындағы байланыстар библиографиялық байланыстың беріктігін көрсетеді, яғни екі автор арасындағы ортақ сілтемелер саны неғұрлым көп болса, байланыстырушы сызық соғұрлым қалың және жақын болады. Визуализацияланған нәтижеде Dwivedi (2023), Kung (2023), Chang (2024a), және Perkins (2023) сияқты негізгі авторлар атап өтілді, олардың еңбектері жоғары бағаға ие болды және өз кластерлерінде орталық хаб ретінде әрекет етеді. Бұл кластерлер тақырыптық зерттеу қауымдастықтарын, соның ішінде цифрлық технологиялар, жасанды интеллект және білім беру инновациялары сияқты салаларды көрсетті.



Сурет 3. Авторлардың дәйексөз алу көрсеткіштері

Жасыл кластер Dwivedi-дің (2023) төңірегіне шоғырланған және оның құрамына Perkins (2023), Chang (2024a) және Ooi (2025) сияқты авторлар кіреді; бұл топ, сірә, цифрлық инновациялар мен трансформация мәселелеріне бағытталған.

Kung (2023) бастаған қызғылт сары кластер жасанды интеллект (ЖИ) мен білім беру саласына арналған, оның құрамында Bhaya (2023), Farhat (2024) және Kumari (2023) зерттеулері бар.

Басқа кластерлер неғұрлым мамандандырылған немесе жаңадан пайда болып жатқан тақырыптарды қамтиды; мұнда Huang (2023a), Chen (2022a) және Zumsteg (2023) сияқты шеткері орналасқан авторлар зерттеу бағыттарының тарылғанын немесе даму үстінде екенін көрсетеді.

Escalante (2023) және Giannakos (2024) сияқты кейбір авторлар пәнаралық «көпір» қызметін атқарып, әртүрлі тақырыптық топтарды өзара байланыстырады. Бұл ғылыми ынтымақтастық немесе тақырыптардың тоғысу мүмкіндігі бар аймақтарды білдіреді.

Еңбектердің басым бөлігі 2023–2024 жылдарға тиесілі, бұл зерттеу саласының өзектілігі мен қарқынды дамуын дәлелдейді. Сонымен қатар, Mujahid (2021) сияқты ертерек шыққан басылымдар қазіргі зерттеулер үшін іргелі негіз болып қала береді.

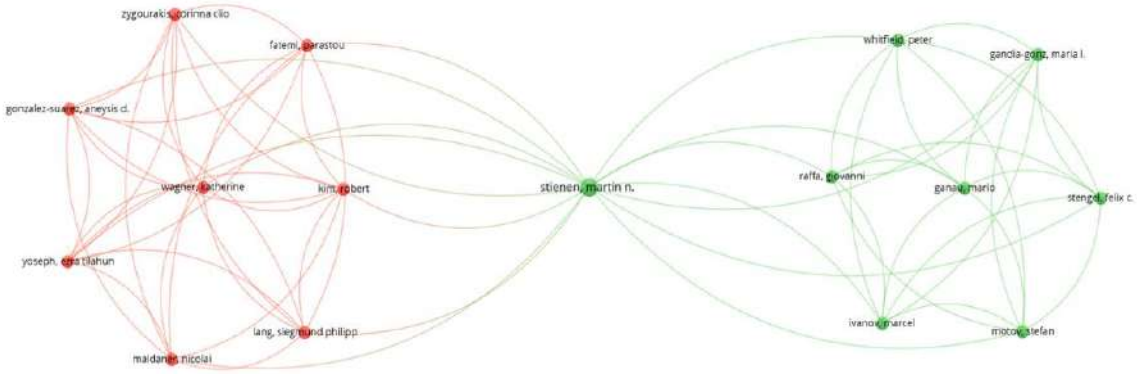
4-суретке қатысты әлеуметтік ғылымдардағы цифрлық трансформацияның дамып келе жатқан саласындағы ықпалды ғалымдарды, тақырыптық кластерлерді және байланыс үлгілерін анықтай отырып, интеллектуалды ландшафтқа жан-жақты көзқарас ұсынылды.

4-суретте бірлескен авторлық желі ұсынылды, онда бірлескен ғылыми зерттеумен айналысатын зерттеушілердің екі тобы көрсетілген. Талдау барысында екі негізгі кластерге бөлінген жалпы саны 18 негізгі автор анықталды.

1-ші кластер (қызыл) Wagner Katherine, Zygourakis Corinna Clio, Gonzalez-Suarez Anexis D., Fatemi Parastou және Maldaner Nicolai сияқты авторлардан тұрады. Бұл топтың әрбір авторы бір басылымнан қосқанымен, олардың дәйексөз алу көрсеткіштері әртүрлі. Мысалы, Fatemi Parastou мен Gonzalez-Suarez Anexis D. 7 дәйексөзге ие болды, бұл дәйексөз алудың нормаланған әсері (normalized citation impact) 1.7074-ке тең екенін көрсетеді. Кластер ішіндегі ынтымақтастықтың жалпы күші (Total Link Strength, TLS) әр автор үшін 8-ге тең, бұл топ ішіндегі академиялық кооперацияның жоғары деңгейін білдіреді.

2-ші кластер (жасыл) Ganau Mario, Raffa Giovanni, Ivanov Marcel және Gandia-Gonz Maria L. сияқты авторларды қамтиды. Олар да бір басылымнан жариялағанымен, дәйексөз саны бойынша жоғарырақ көрсеткішке ие: әрқайсысы 10 дәйексөзден алған, ал дәйексөз алудың

нормаланған әсері 2.4391-ді құрайды. Бұл топтың авторлары өзара тығыз байланысқан, әрқайсысының TLS көрсеткіші 7-ге тең.

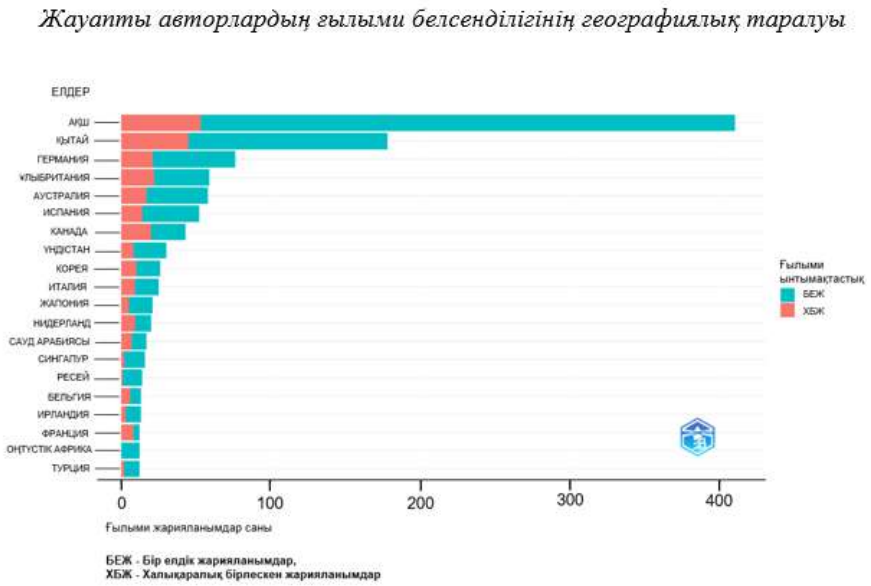


Сурет 4. VOSviewer негізіндегі авторлық коллаборациялардың желілік құрылымы

Зерттеу желісінде Stienen Martin N. маңызды рөл атқарады. Ол екі кластер арасындағы байланыстарын сақтап отырып, «пәнаралық көпір» қызметін атқарады. Оның орталық позициясы кластерлер арасындағы академиялық серіктестікті және білім трансферін жеңілдетудегі шешуші интеграциялық рөлін көрсетеді.

Қорыта айтқанда, зерттеу кеңістігінде ішкі құрылымы нақтыланған және орталық тұлға арқылы өзара байланысқан екі басым ғылыми ядро қалыптасқан. Бұл авторлық бірлестіктер экожүйесінің тұрақты әрі серпінді дамып келе жатқанын дәлелдейді.

5-суретте талданатын еңбектер жиынтығына үлес қосқан авторлардың географиялық таралуының визуалды көрінісі берілген. Гистограмма басылымдарды авторлардың елдері бойынша жіктейді, сонымен қатар бір елдік жарияланымдар (БЕЖ) және халықаралық бірлескен жарияланымдар (ХБЖ) деп екіге бөледі. Бұл талдау осы саладағы халықаралық ынтымақтастық үлгілерін тереңірек зерделеуге мүмкіндік берді.



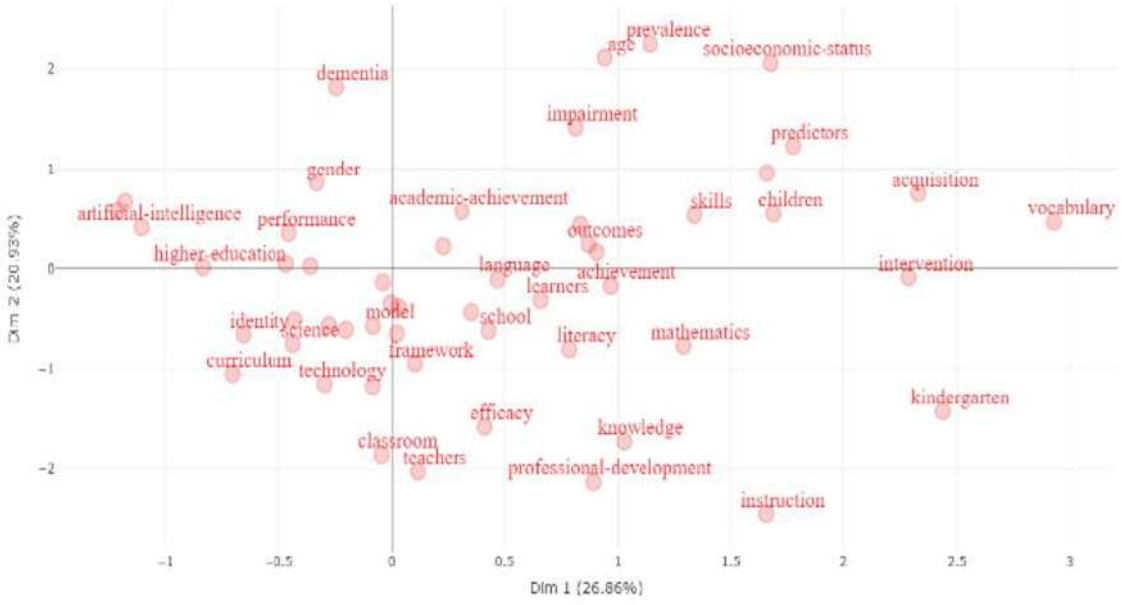
Сурет 5. Жауапты авторлардың (corresponding authors) елдері бойынша ғылыми белсенділігінің географиялық таралуы

Biblioshiny интерфейсі арқылы алынған мәліметтер (Authors - Corresponding Author's – Country) бойынша басылымдар саны жағынан АҚШ көш бастап тұр: 165 БЕЖ және 68 ХБЖ, бұл көрсеткіш елдің қуатты ішкі зерттеу базасымен қатар, халықаралық ынтымақтастыққа белсенді қатысатынын көрсетеді. Одан кейін 35 ХБЖ көрсеткішімен Қытай орналасқан, Қытайға тиесілі еңбектердің негізгі бөлігі БЕЖ санатына жатады, бұл ұлттық деңгейдегі ғылыми өнімнің жоғарғы көлемін айқындайды.

Атап айтқанда, бірнеше елде БЕЖ және ХБЖ көрсеткіштерінің қатар болуы бұл саланың трансұлттық зерттеу серіктестігіне бейімділігін айқындайды. Бұл күрделі жаһандық мәселелер шекарааралық зияткерлік алмасуды қажет ететін пәнаралық салалар үшін өте өзекті.

Суретте көрсетілген нәтижелер ғылыми зерттеулерді интернационализациялау үдерісін түсіну үшін эмпирикалық негіз болып табылады. Сондай-ақ, ол концептуалды құрылымдар мен тақырыптық кластерлерді талдауға алғышарт жасап, зерттеу белсенділігінің географиялық орталықтары мен олардың бірлескеен ғылыми нәтижелерлі қалыптастырудағы рөлі туралы құнды мәліметтер береді.

6-суретте Biblioshiny интерфейсі (Conceptual Structure- Factorial Analysis-MCA-Titles) арқылы мақала тақырыптарындағы түйінді сөздерге жүргізілген Көптік сәйкестік талдауы (MCA) негізіндегі тұжырымдамалық құрылым көрсетілген. Бұл екі өлшемді визуалдау еңбектер жиынтығында жиі кездесетін терминдер арасындағы жасырын тақырыптық құрылымдар мен семантикалық жақындықты айқындайды.



Сурет 6. Зерттеу тақырыптарының тұжырымдамалық байланыс картасы (MCA әдісі бойынша)

Көлденең ось (Dim1), жалпы дисперсияның 26,86%-ын құрайды және ұғымдарды саралаудың негізгі өлшемі болып табылады.Тік ось (Dim2) дисперсияның 20,93%-ын түсіндіре отырып,тақырыптық бөліністі одан әрі толықтырады.Жиынтық түрде бұл өлшемдер негізгі терминдердің кеңістік орналасуын түсіндіру үшін сенімді негіз қалыптастырады.

Зерттеу барысында алынған нәтижелер бойынша ұсынылған визуализация зерттеу саласының тұжырымдамалық көрінісін көрсетеді.Суретте көрсетілген тақырыптық кластерлерге тоқталсақ, сол жақ кластер: «жасанды интеллект» , «жоғарғы білім» секілді терминдерді қамтиды және онда технология мен институционалдық ортаға айқын назар аударылады.

Оң жақ кластерге тән терминдер негізінен баланың дамуы, тілді меңгеру және әлеуметтік факторларға бағытталған.

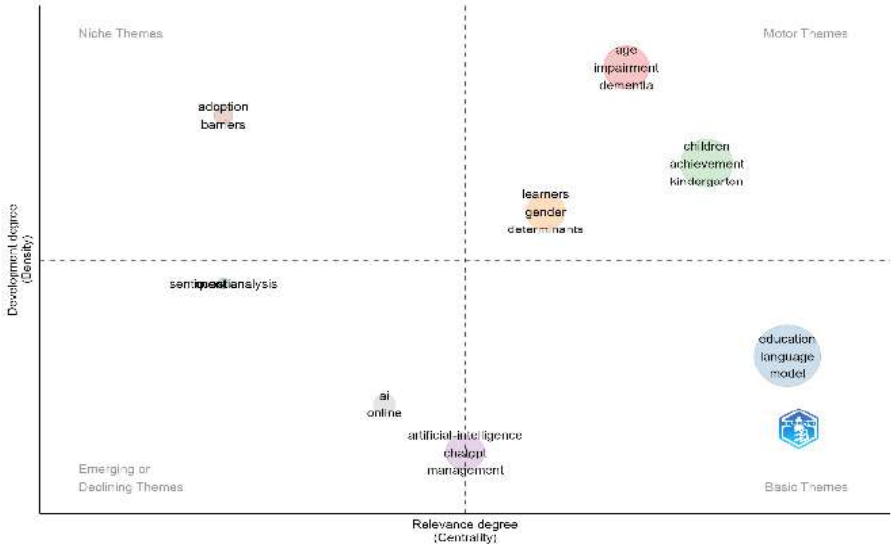
Орталық кластерде зерттеудің теориялық негіздері мен іргелі ұғымдары топтастырылған. Бұл бөлік әртүрлі білім беру зерттеулеріндегі негізгі көрсеткіштер ретінде әрекет ететін Model, Framework, Academic-Achievement, Outcomes, Literacy секілді ұғымдарды қамтиды.

Төменгі сол жақ кластерде оқу үдерісі мен мұғалімдердің қызметіне қатысты терминдер шоғырланған және бұл бөлік зерттеудің педагогикалық өзегін білдіреді. Бұл кластер білім берудің практикалық ортасына бағытталып, оқытудың институционалдық жағына және оқыту стратегияларын енгізуге баса назар аударады.

Төменгі оң жақ кластерде айқын тақырыптық шоғырлану байқалады, мұндағы зерттеулер ерте кезеңдегі оқыту мен арнайы әдістемелерге, академиялық қолдауларға бағытталған. Басқа бөлімдерден айырмашылығы, ерте балалық шақтағы нақты оқыту әдіснамаларының тиімділігіне басымдық бере отырып, бастауыш мектепке жеткенге дейін оқушылардың нәтижелерін арттырудың ең әсерлі жолдарын анықтауға бағытталған.

Ұсынылып отырған тұжырымдамалық карта басым тақырыптарды айқындап қана қоймай, білім беру саласындағы зерттеулердің, әсіресе жаңа технологиялар, білім алушыға бағытталған педагогика және әлеуметтік-мәдени әсерлер арасындағы эпистемикалық қиылысуларды көрсетеді. Ол саладағы аз зерттелген тұжырымдамалық байланыстар мен ғылыми олқылықтарды анықтау үшін құнды перспектива береді.

Келесі 7-суретте талданған еңбектер жиынтығындағы зерттеу тақырыптарын олардың даму деңгейі (тығыздығы-*Density*) мен өзектілік дәрежесі (орталықтығы-Centrality) бойынша визуалды түрде жіктейтін стратегиялық тақырыптық карта көрсетілген. Мұндай тақырыптық картаға түсіру тәсілі библиометриялық зерттеулерде белгілі бір саланың зияткерлік құрылымы мен зерттеу динамикасын айқындау үшін кеңінен қолданылады.



Сурет 7. Стратегиялық тақырыптық карта

Стратегиялық тақырыптық карта 4 квадрантқа бөлінген:

1. *Қозғаушы тақырыптар (Жоғарғы оң жақ).* Бұл квадрантта «жас, бұзылыс, деменция» және «балалар, жетістіктер, балабақша» сияқты жақсы қалыптасқан тақырыптар бар. Бұлар өте өзекті және ішкі тұрғыдан жақсы дамыған, қазіргі зерттеу саласының негізгі қозғаушы күші болып табылады.

2. *Нишалық тақырыптар (Жоғарғы сол жақ).* «Технологияны игеру» және «енгізу кедергілері» сияқты мамандандырылған тақырыптарды қамтиды. Бұл тақырыптардың ішкі даму деңгейі жоғары болғанымен, олардың жалпы салаға тигізетін ықпалы төмен.Бұл

тақырыптар техникалық тұрғыдан жетілген болса да, кең зерттеу саласына емес,нақты сегментке бағытталған.

3. *Жаңадан пайда болған не жойылып бара жатқан тақырыптар (Төменгі сол жақ).* Бұл бөлімдеқазіргі уақытта тығыздығы мен өзектілігі төмен тақырыптар орналасқан. Бұл кластерлер әдетте зерттеудің алғашқы кезеңдерінде жаңадан пайда болған үрдістерді не ғылыми назарды біртіндеп жоғалтып бара жатқан ескі тақырыптарды білдіреді.

4. *Негізгі тақырыптар (Төменгі оң жақ).* «Білім беру», «тіл», «модель», «жасанды интеллект», «ChatGPT» және «басқару» сияқты тақырыптар осы квадрантқа жатады. Бұл тақырыптар қазіргі зерттеулердің негізгі өзегі болып табылады.Олар саланың болашақ даму бағытын айқындайды, дегенмен соған қарамастан әлі де теориялық тұрғыдан қалыптасу мен толығу үстінде. Жасанды интеллект пен ChatGPT технологияларының бұл сегментте болу кездейсоқ емес,бұл тақырыптар алдағы ғылыми жетістіктердің іргетасын қалайтын негізгі қозғаушы күш болып табылады.

Тұтастай алғанда, бұл стратегиялық карта іргелі тақырыптар (мысалы, білім берудегі ЖИ негізіндегі тілдік модельдер), кемелденген пәнаралық салалар (ерте жастағы балаларға білім беру және когнитивті бұзылыстар) және одан әрі зерттеуді қажет ететін жаңа тақырыптар арасындағы өзара байланысты ашады.

Дискуссия

Жақында жүргізілген зерттеулер білім беру контекстінде әсіресе, цифрлық технологиялар дамыған елдерде LLM қолданудың жылдам кеңеюін көрсетеді. Дегенмен әлі де төмендегідей назар аударуды қажет ететін бірқатар маңызды мәселелер бар:

- LLMs-ті білім беру шешімдерін қабылдау жүйелеріне біріктірудің бірыңғай шеңбері жоқ;
- LLM шығаратын нәтижелердің дәлдігі мен сенімділігін бағалаудың ресми әдістерін қажет етеді;
- Этикалық, құқықтық және деректерді басқару мәселелері құрылымдық институционалдық жауаптарды қажет етеді;
- Педагогиканы, білім берудегі көшбасшылықты және жасанды интеллект технологияларын біріктіретін пәнаралық зерттеулер жетіспейді.

LLM негізіндегі цифрлық кеңесшілер жоғары масштабтауды, икемділікті және бейімделу әлеуетін ұсынады. Бірақ, нақты іске асыру хаттамалары мен институционалдық стандарттардың болмауы оларды пайдалану барысында шешім қабылдау сапасының сәйкес келмеуіне және туындайтын тәуекелдерге әкелуі мүмкін. Бұл зерттеу осы дамып келе жатқан саланы анықтайтын ең ықпалды авторларды, елдерді, жарияланымдарды және тұжырымдамалық тенденцияларды анықтау үшін библиометриялық талдау жүргізу арқылы осы мәселелерді шешуге бағытталған.

Қорытынды

Бұл библиометриялық шолу жасанды интеллект AI мен машиналық оқытудың білім беру тәжірибесін қалыптастырудағы рөліне ерекше назар аудара отырып, цифрлық трансформация мен білім берудегі инновацияларға жан-жақты талдау жасады. Осы сала аясындағы әдебиеттерді зерттей отыра, ықпалды авторларды және осы саланың негізгі басым бағыттары мен тенденцияларын анықтадық. Біздің нәтижелеріміз АҚШ, Қытай және Ұлыбританияның білім берудегі Жасанды интеллектке қатысты зерттеулерді дамытуға жетекші үлес қосатынын косатынын көрсетеді, бұл оқу нәтижелерін жақсарту үшін жасанды интеллект технологияларын білім беру жүйелеріне интеграциялауға деген жаһандық қызығушылықты көрсетеді. Бірнеше корреспонденцияны талдау (MCA) және кластерлеу секілді әдістерді пайдалана отырып, осы саладағы тақырыптық кластерді көрнекі түрде көрсететін тұжырымдамалық құрылымын картасын жасадық. Бұл тәсіл оқытудың аналитикасы, білім беру технологиялары және Жасанды Интеллекттің мұғалімдердің біліктілігін арттыруға және

оқытушылардың нәтижелеріне әсері сияқты өзара байланысты тақырыптарды ашты. Бұл тақырыптық кластерлер жекешелендірілген оқытуға, оқу жетістіктеріне және тәрбиешілердің біліктілігін арттыруға ерекше назар аудара отырып, жасанды интеллекттің ,оның ішінде білім беру саласындағы рөлінің дамып келе жатқандығын айқындайды.

Жасанды интеллекттің деректердің тұтастығына, қолжетімділігіне қатысты уәделеріне қарамастан, жасанды интеллектті білім беру жүйесіне енгізуге қатысты- деректердің құпиялылығы мәселелері,этикалық және әдістемелік қауіптер және оқытушылардың жасанды интеллект бойынша жеткілікті деңгейде білімінің болмауы, инфрақұрылымды дамыту және қаржылық шектеулер секілді мәселелер әлі де өзекті болып табылады.

Дегенмен, жасанды интеллект уәдесіне қарамастан, деректердің құпиялылығына қатысты мәселелер, инфрақұрылымды дамыту қажеттілігі және оқытушылар арасындағы жасанды интеллект саласындағы білім алшақтығы сияқты мәселелер әлі де бар. Бұл зерттеудің нәтижелері жасанды интеллекттің білім беру тәжірибесін өзгертудегі маңыздылығын атап өтті және оны енгізу оның әртүрлі білім беру контексттеріне, әсіресе мұндай инновациялар оңай қол жетімді болмауы мүмкін дамушы елдерге әсері туралы қосымша зерттеулер жүргізу қажеттілігін атап өтті.

Тұтастай алғанда, бұл зерттеу білім берудегі жасанды интеллекттің әлеуеті туралы жан-жақты түсінік берді және жасанды интеллект технологияларын білім беру жүйелеріне тиімді енгізудегі кедергілерді еңсеру үшін зерттеушілер, саясаткерлер және тәжірибешілер арасындағы ынтымақтастық қажеттілігін көрсетеді.

Алғыс

Мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің №BR24993001 гранттық зерттеуі шеңберіндегі қаржылық қолдауымен дайындалған.

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1] Kasneci, E.; Seßler, K.; Küchemann, S. et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences. – 2023. – Vol. 103. – 102274. – https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274

[2] Mandinach, E. B.; Schildkamp, K. Misconceptions about data-based decision making in education: An exploration of the literature. Studies in Educational Evaluation. – 2021. – Vol. 69. – P. 1–10. – https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2020.100842

[3] Yufan, Du. Application of the Data-Driven Educational Decision-Making System to Curriculum Optimization of Higher Education. Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1-8. – https://doi.org/10.1155/2022/5823515

[4] Lo, C. K. What Is the Role of ChatGPT in Education? A Systematic Review of Early Publications. Education Sciences. – 2023. – Vol. 13. – No. 4. – 410. – https://doi.org/10.3390/educsci13040410

[5] Yan, L.; Sha, L.; Zhao, L. et al. The Rising Surge of ChatGPT in Education: A Bibliometric Analysis and Content Review. Journal of Educational Computing Research. – 2024. – Vol. 62. – No. 3. – P. 512-545. – https://doi.org/10.1177/07356331231218151

[6] Gaftandzhieva, S.; Hussain, S.; Hilčenko, S. et al. Data-driven Decision Making in Higher Education Institutions: State-of-play. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2023. – Vol. 14. – No. 6. – P. 397–405. – https://doi.org/10.14569/ijacsa.2023.0140642

[7] Asfaw, Z.; Alemneh, D. G.; Jimma, W. Data-Driven Decision-Making and Its Impacts on Education Quality in Developing Countries: A Systematic Review. 2023 International Conference on ICT4DA. – 2023. – P. 198-203. – https://doi.org/10.1109/ICT4DA59526.2023.10302228

[8] Rahman, M. M.; Watulak, S. L. Digital advisors and AI in higher education: A bibliometric analysis of the emerging trends. Journal of Computing in Higher Education. – 2023. – Vol. 35. – P. 415-438. – https://doi.org/10.1007/s12528-023-09356-w

[9] Chiu, T. K. F.; Moorhouse, B. L.; Chai, C. S. et al. Ethical considerations in the use of generative AI in education. Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 6. – 100215. – https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100215

[10] Bond, M.; Khosravi, H.; De Laat, M. et al. A systematic review of self-regulated learning with artificial intelligence in higher education. International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2024. – Vol. 21. – No. 1. – P. 1-28. – https://doi.org/10.1186/s41039-024-00250-x

[11] Ouyang, F.; Zheng, L.; Jiao, P. Artificial intelligence in online higher education: A systematic review of empirical research from 2011 to 2020. Education and Information Technologies. – 2022. – Vol. 27. – P. 7893–7925. – https://doi.org/10.1007/s10639-022-10925-9

[12] Dwivedi, Y. K.; Kshetri, N.; Hughes, L. et al. "So what if ChatGPT wrote it?" Multidisciplinary perspectives on opportunities and challenges of generative AI. International Journal of Information Management. – 2023. – Vol. 71. – 102642. – https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102642

[13] Harrison, R.; Meyer, L.; Rawstorne, P. et al. Evaluating and enhancing quality in higher education teaching practice: a meta-review. Studies in Higher Education. – 2022. – Vol. 47. – P. 80-96. – https://doi.org/10.1080/03075079.2020.1730315

[14] Nauman, M.; Akhtar, N.; Alhudhaif, A. et al. Guaranteeing Correctness of Machine Learning Based Decision Making at Higher Educational Institutions. IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 92864-92880. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3088901

[15] Khuram, S. C. A.; Rehman, N. N.; Elahi, N. S. A bibliometric analysis of quality assurance in higher education institutions: Implications for assessing university's societal impact. Evaluation and Program Planning. – 2023. – Vol. 99. – 102319. – https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2023.102319

[16] Khuram, S. C. A.; Rehman, N. N.; Elahi, N. S. A bibliometric analysis of quality assurance in higher education institutions: Implications for decision-makers. International Journal of Educational Management. – 2021. – Vol. 35. – No. 7. – P. 1515-1532. – https://doi.org/10.1108/IJEM-11-2020-0525

[17] Nguyen, T. M.; Nguyen, T. T. T.; Nguyen, T. D. Big data and decision-making in higher education institutions: A systematic literature review. Education and Information Technologies. – 2022. – Vol. 27. – P. 1425–1449. – https://doi.org/10.1007/s10639-021-10616-2

[18] Ng, P. T. Learning analytics in higher education: A critical review of the field. Educational Research Review. – 2021. – Vol. 34. – 100418. – https://doi.org/10.1016/j.edurev.2021.100418

[19] Grassini, S. Shaping the Future of Education: Exploring Innovations and Challenges in the Age of Generative AI in Academia. Education Sciences. – 2023. – Vol. 13. – No. 8. – 792. – https://doi.org/10.3390/educsci13080792

References

[1] Kasneci, E.; Seßler, K.; Küchemann, S. et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences. – 2023. – Vol. 103. – 102274. – https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274

[2] Mandinach, E. B.; Schildkamp, K. Misconceptions about data-based decision making in education: An exploration of the literature. Studies in Educational Evaluation. – 2021. – Vol. 69. – P. 1–10. – https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2020.100842

[3] Yufan, Du. Application of the Data-Driven Educational Decision-Making System to Curriculum Optimization of Higher Education. Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1-8. – https://doi.org/10.1155/2022/5823515

[4] Lo, C. K. What Is the Role of ChatGPT in Education? A Systematic Review of Early Publications. Education Sciences. – 2023. – Vol. 13. – No. 4. – 410. – https://doi.org/10.3390/educsci13040410

[5] Yan, L.; Sha, L.; Zhao, L. et al. The Rising Surge of ChatGPT in Education: A Bibliometric Analysis and Content Review. Journal of Educational Computing Research. – 2024. – Vol. 62. – No. 3. – P. 512-545. – https://doi.org/10.1177/07356331231218151

[6] Gaftandzhieva, S.; Hussain, S.; Hilčenko, S. et al. Data-driven Decision Making in Higher Education Institutions: State-of-play. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2023. – Vol. 14. – No. 6. – P. 397–405. – https://doi.org/10.14569/ijacsa.2023.0140642

[7] Asfaw, Z.; Alemneh, D. G.; Jimma, W. Data-Driven Decision-Making and Its Impacts on Education Quality in Developing Countries: A Systematic Review. 2023 International Conference on ICT4DA. – 2023. – P. 198-203. – https://doi.org/10.1109/ICT4DA59526.2023.10302228

[8] Rahman, M. M.; Watulak, S. L. Digital advisors and AI in higher education: A bibliometric analysis of the emerging trends. Journal of Computing in Higher Education. – 2023. – Vol. 35. – P. 415-438. – https://doi.org/10.1007/s12528-023-09356-w

[9] Chiu, T. K. F.; Moorhouse, B. L.; Chai, C. S. et al. Ethical considerations in the use of generative AI in education. Computers and Education: Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 6. – 100215. – https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100215

[10] Bond, M.; Khosravi, H.; De Laat, M. et al. A systematic review of self-regulated learning with artificial intelligence in higher education. International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2024. – Vol. 21. – No. 1. – P. 1-28. – https://doi.org/10.1186/s41039-024-00250-x

[11] Ouyang, F.; Zheng, L.; Jiao, P. Artificial intelligence in online higher education: A systematic review of empirical research from 2011 to 2020. Education and Information Technologies. – 2022. – Vol. 27. – P. 7893–7925. – https://doi.org/10.1007/s10639-022-10925-9

[12] Dwivedi, Y. K.; Kshetri, N.; Hughes, L. et al. "So what if ChatGPT wrote it?" Multidisciplinary perspectives on opportunities and challenges of generative AI. International Journal of Information Management. – 2023. – Vol. 71. – 102642. – https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102642

[13] Harrison, R.; Meyer, L.; Rawstorne, P. et al. Evaluating and enhancing quality in higher education teaching practice: a meta-review. Studies in Higher Education. – 2022. – Vol. 47. – P. 80-96. – https://doi.org/10.1080/03075079.2020.1730315

[14] Nauman, M.; Akhtar, N.; Alhudhaif, A. et al. Guaranteeing Correctness of Machine Learning Based Decision Making at Higher Educational Institutions. IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 92864-92880. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3088901

[15] Khuram, S. C. A.; Rehman, N. N.; Elahi, N. S. A bibliometric analysis of quality assurance in higher education institutions: Implications for assessing university's societal impact. Evaluation and Program Planning. – 2023. – Vol. 99. – 102319. – https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2023.102319

[16] Khuram, S. C. A.; Rehman, N. N.; Elahi, N. S. A bibliometric analysis of quality assurance in higher education institutions: Implications for decision-makers. International Journal of Educational Management. – 2021. – Vol. 35. – No. 7. – P. 1515-1532. – https://doi.org/10.1108/IJEM-11-2020-0525

[17] Nguyen, T. M.; Nguyen, T. T. T.; Nguyen, T. D. Big data and decision-making in higher education institutions: A systematic literature review. Education and Information Technologies. – 2022. – Vol. 27. – P. 1425–1449. – https://doi.org/10.1007/s10639-021-10616-2

[18] Ng, P. T. Learning analytics in higher education: A critical review of the field. Educational Research Review. – 2021. – Vol. 34. – 100418. – https://doi.org/10.1016/j.edurev.2021.100418

[19] Grassini, S. Shaping the Future of Education: Exploring Innovations and Challenges in the Age of Generative AI in Academia. Education Sciences. – 2023. – Vol. 13. – No. 8. – 792. – https://doi.org/10.3390/educsci13080792

IRSTI 50.47.31

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.015

A.B. Baimussayeva[1],N.D Torebay[2],
S.S. Karzhaubekova[1], S.D.Kurakbayeva[1], Zh.Zh. Azhibekova[3*]

[1]M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan
[2]Central Asian Innovative University, Shymkent, Kazakhstan
[3]Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan
[*]*e-mail: azhibekova.z@kaznmu.kz*

REAL -TIME DETECTION OF CARDIAC PATHOLOGIES USING AN INTELLIGENT DIGITAL STETHOSCOPE

Abstract

The paper analyzes how the demands of the medical industry and technological advancements have combined to drive significant innovation in diagnostic tools over the past few years. This study aims to present the development and validation of a real-time digital stethoscope capable of detecting cardiovascular abnormalities from phonocardiograms. The proposed CNN–BiLSTM architecture allows for efficient extraction of spatial and temporal features from spectrograms of cardiac signals. This approach provides accurate signal classification and improves the quality of diagnosis. In addition to accurately recording heart sounds, the device simultaneously analyzes acoustic characteristics to detect possible conditions. This is accomplished using modern signal processing methods. Early testing in a cohort of 200 patients validated the clinical potential of this approach, demonstrating 94.5% diagnostic accuracy in distinguishing between pathological and normal cardiac murmurs. This reduces delays associated with manual interpretation and facilitates timely treatment. Given that it would make vital cardiac diagnostics accessible, the device is likely to be most useful in areas with limited resources. The device can be applied in various clinical settings. The results demonstrate the importance of digital technology in integrating conventional medical equipment, opening the door to a new era of high-quality, easily accessible patient care.

Keywords: digital stethoscope, CNN–BiLSTM, artificial intelligence, machine learning, real-time, biomedical signal processing, phonocardiography.

А.Б. Баймусаева[1] Н.Д. Төребай[2], С.С. Каржаубекова[1], С.Д. Куракбаева[1], Ж.Ж. Ажибекова[3]
[1]М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан,
[2]Орталық Азия инновациялық университеті, Шымкент қ., Қазақстан,
[3]С. Ж. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университет, Алматы қ., Қазақстан

ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ САНДЫҚ СТЕТОСКОППЕН ЖҮРЕК ПАТОЛОГИЯЛАРЫН НАҚТЫ УАҚЫТ РЕЖИМІНДЕ АНЫҚТАУ

Аңдатпа

Ғылыми зерттеу жұмысында медицина саласының талаптары мен технологиялық жетістіктері ретінде соңғы жылдары диагностикалық құралдардарға жасанды интеллект әдістерін қосу арқылы автоматтандырылған жүйеге қол жеткізу процессі қарастырылған. Бұл зерттеудің мақсаты - жүрек-қан тамырларының жұмысындағы қиындықтарды фонокардиограммалардан анықтай алатын нақты уақыт режиміндегі сандық стетоскопты жасау және тексеру ұсынылған. Жүрек дыбыстарын дәл жазумен қатар, құрылғы бір уақытта пайда болатын акустикалық сипаттамаларды талдайды. Ұсынылған CNN–BiLSTM архитектурасы жүрек сигналдарының спектрограммаларынан кеңістіктік және уақыттық ерекшеліктерін тиімді түрде алуға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл сигналдың дәл жіктелуін қамтамасыз етеді және диагностика сапасын жақсартады. Бұл заманауи сигналды өңдеу әдістерін қолдану арқылы жүзеге асырылады. 200 пациенттен тұратын топқа ерте тестілеуді жүргізу арқылы бұл тәсілдің клиникалық бейімділігін анықтап, патологиялық және қалыпты жүрек шуылдарын ажыратуда 94,5% диагноз дәлдігін көрсетті. Бұл қолмен енгізуде кездесетін кідірістерді азайтады және адамдардың уақтылы ем алу процессін жеңілдетеді. Бұл маңызды жүрек диагностикасына қол жетімді ететінін ескере отырып, құрылғы ресурстары шектеулі аймақтарда пайдалана алу дәлдігін арттырады.

Зерттеу қорытындылары сандық технологияның дәстүрлі медициналық жабдықтарды интеграциялау үшін қаншалықты маңызды екенін толық ашып көрсетеді, бұл жоғары сапалы, оңай қолжетімді пациенттерге күтім жасаудың жаңа дәуіріне жол ашады деп қарастырылған.

Түйін сөздер: сандық стетоскоп, CNN–BiLSTM, жасанды интеллект, машиналық оқыту, нақты уақыт режимінде, биомедициналық сигналдарды өңдеу, фонокардиография.

А.Б. Баймусаева[1] Н.Д. Төребай[2], С.С. Каржаубекова[1], С.Д. Куракбаева[1], Ж.Ж. Ажибекова[3]
[1]Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, г.Шымкент, Казахстан,
[2]Центрально-Азиатский инновационный университет, г.Шымкент, Казахстан[3] Казахский
[3]Национальный медицинский университет имени С. Д. Асфендиярова, г.Алматы, Казахстан

ВЫЯВЛЕНИЕ ПАТОЛОГИЙ СЕРДЦА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО СТЕТОСКОПА

Аннотация

В исследовательской работе рассматривается процесс создания автоматизированной системы путем внедрения методов искусственного интеллекта в диагностические инструменты в последние годы как требование и технологический прогресс в медицинской сфере. Целью данного исследования является разработка и тестирование цифрового стетоскопа реального времени, способного выявлять сердечно-сосудистые заболевания по фонокардиограммам. Помимо точной записи сердечных звуков, устройство одновременно анализирует появляющиеся акустические характеристики. Предложенная архитектура CNN–BiLSTM позволяет эффективно извлекать пространственные и временные характеристики из спектрограмм сердечных сигналов. Такой подход обеспечивает точную классификацию сигналов и повышает качество диагностики. Это достигается за счет использования современных методов обработки сигналов. Проведя предварительное тестирование на группе из 200 пациентов, была определена клиническая осуществимость данного подхода, показавшая диагностическую точность 94,5% в различении патологических и нормальных сердечных шумов. Это сокращает задержки, возникающие при ручном вводе, и облегчает процесс своевременного лечения пациентов. Это повышает точность устройства в регионах с ограниченными ресурсами, поскольку делает доступной важную кардиологическую диагностику. Результаты исследования подчеркивают важность цифровых технологий для интеграции традиционного медицинского оборудования, что, как ожидается, положит начало новой эре высококачественной и легкодоступной медицинской помощи пациентам.

Ключевые слова: цифровой стетоскоп, CNN–BiLSTM, искусственный интеллект, машинное обучение, в реальном времени, обработка биомедицинских сигналов, фонокардиография.

Introduction

The heart, considered one of the most vital organs in the human body, functions as a continuous pump that enables blood circulation and supports the essential functions of all systems. The complex operation of the heart's valves and muscular structures may fail, leading to various cardiac diseases that significantly affect an individual's health [1,2].

Auscultation, the method of listening to bodily sounds, especially those of the heart, has historically been a vital technique for physicians, providing essential insights into the operation of this crucial organ. Nonetheless, traditional stethoscopes, despite their considerable utility in medical practice, have significant limitations. Their effectiveness primarily depends on the physician's expertise and intuition, which entails the risk of subjective interpretation and the potential to neglect minor acoustic anomalies [3].

Since the beginning of the 21st century, the amalgamation of technology and medicine has intensified. The proliferation of accurate, replicable digital devices has broadened diagnostic opportunities, facilitating the advancement of traditional methodologies [4]. Phonocardiograms have become highly pertinent as audiovisual recordings of heart sounds and noises, facilitating a detailed auditory representation of cardiac function that surpasses the capabilities of conventional auscultation with a standard stethoscope [5].

Nonetheless, despite the wealth of information contained in phonocardiograms, the principal challenge remains their complex interpretation. The manual analysis of phonocardiographic signals

requires substantial time and significant expertise from a specialist [6]. A pressing need exists for automated, accurate, and, importantly, real-time analytical methods that can merge the extensive nature of phonocardiographic data with the effectiveness of traditional diagnostics [7]. This requirement is especially relevant because of the shortage of skilled cardiologists and limited access to specialized medical services.

This article introduces the development of a real-time digital stethoscope to address the previously mentioned challenges. The apparatus documents, analyzes, and interprets cardiac sounds, providing diagnostic information instantaneously during the assessment. This device represents both a technological advancement and a modern trend in medicine: the amalgamation of human expertise and digital technology. The following sections analyze the theoretical foundations of the development, the operational mechanisms, and empirical evidence supporting the effectiveness of the proposed solution in cardiological diagnostics.

Research Methodology

The proposed methodology for analyzing and classifying cardiac acoustic signals is described.

The proposed approach consists of several stages: data collection, preprocessing, feature extraction, classification, and decision making. The general workflow of the system is shown in Figure 1.

Figure 1. Heart sound processing and diagnosis process based on CNN–BiLSTM

The general workflow of the proposed methodology is shown in the figure. The system consists of several main stages: data collection, preprocessing, feature extraction, classification, and decision making.

In the first stage, cardiac acoustic signals are collected using an electronic stethoscope and converted to digital format. In the next stage, the signals undergo preprocessing, which includes noise reduction, filtering, and segmentation. These operations allow improving signal quality and increasing the signal-to-noise ratio (SNR).

In the third stage, time and frequency features are extracted from the processed signals. These features are designed to effectively convey important information to the model.

In the next stage, the obtained features are classified using a hybrid CNN–BiLSTM model. This model allows for the simultaneous analysis of spatial and temporal dependencies.

At the final stage, the system makes a diagnostic decision based on the results obtained. In addition, the parameters used during the training of the model (number of epochs, batch size, and optimizer type) are separately displayed.

a) Characteristics of cardiac auscultations

The primary heart sounds, S1 and S2, primarily occupy the upper frequency range of the phonocardiogram spectrum and are best captured with the diaphragm of a stethoscope during auscultation. The primary heart sound (S1), associated with the closure of the atrioventricular valves, typically exhibits a frequency range of 50 to 60 Hz. The second heart sound (S2), linked to the closure of the semilunar valves, typically occurs within the 80 to 90 Hz frequency range. The third heart sound (S3) is characterized by reduced amplitude and occurs in early diastole. It typically occurs in the 20-30 Hz frequency range and may be more challenging to discern due to its subtle characteristics.

The fourth heart sound (S4), which occurs at the end of diastole, is readily detectable with a stethoscope and typically manifests at frequencies below 20 Hz [8].

Although the tones S1 and S2 are generally easily discernible, their intensity may vary. In specific clinical situations, the intensity of these sounds may be reduced owing to preexisting cardiac impairments. The frequency characteristics of the S1 and S2 tones are not strictly fixed and may fluctuate in accordance with the heartbeat. The difficulties in differentiating cardiac sounds have prompted scholars to develop more accurate analytical methods for their assessment [9].

Figure 2 presents a comprehensive classification and functional characteristics of cardiac sounds and murmurs [10]. Certain cardiovascular conditions are generally associated with specific heart sounds. Some atypical heart murmurs manifest as high-frequency anomalies following the initial acoustic indicators of tricuspid stenosis. The ejection sound (ES) is a recognized murmur that arises at the onset of systole, caused by the swift closure of the semilunar valves at the beginning of systolic function.

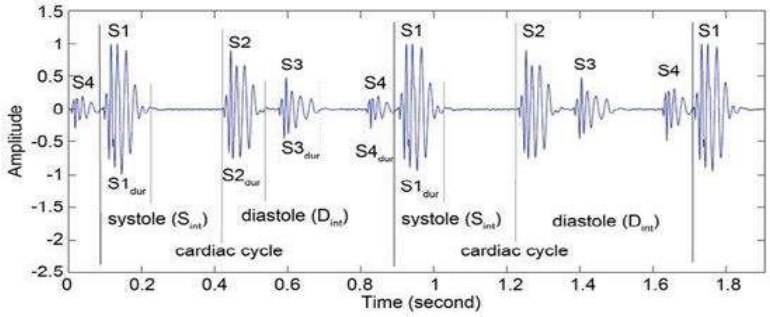


Figure 2. Heart sounds.
Configuration of the proposed electronic stethoscope

Figure 3 illustrates a conceptual diagram of the developed stethoscope, incorporating machine learning technologies for heart-sound assessment. Cardiac acoustic impulses are initially captured using a stethoscope. They then proceed to the analog processing unit, where amplification, filtering, and digital conversion occur. The obtained digital data is transmitted to the computing module for further analysis. The analog component of the system must provide a high signal-to-noise ratio, effectively minimize common-mode interference, and decrease baseline drift and signal saturation, which is crucial for the accurate and reliable acquisition of heart sounds. In the initial amplification phase, subtle heart sounds recorded by the microphone are augmented to improve their clarity and suitability for subsequent analysis (Figure 2).

.

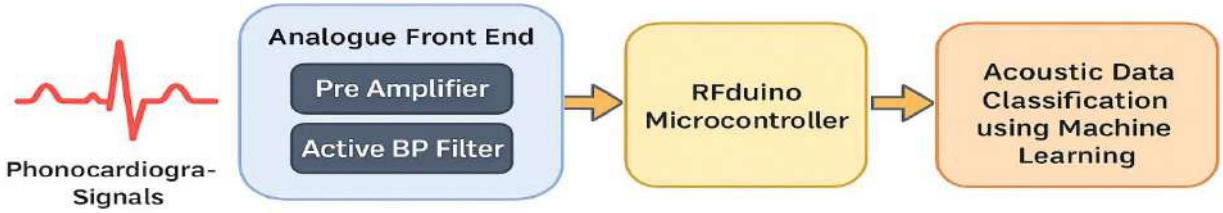


Figure 3. Proposed heart disease detection system diagram

Figure 4 illustrates a computerized heart-monitoring system using an electronic stethoscope. The system architecture encompasses data collection, pre-processing, and waveform analysis. The preprocessing phase converts heart-acoustic signals from the electronic stethoscope to a digital format. After noise suppression and removal of external interference, the cardiac signal waveform is normalized and segmented.

Subsequently, analytical instruments extract characteristics and categorize patterns. The approach centers on clinically relevant diagnostic findings derived from medical markers. This section describes the specifics and sub-phases of each primary component of this architecture.

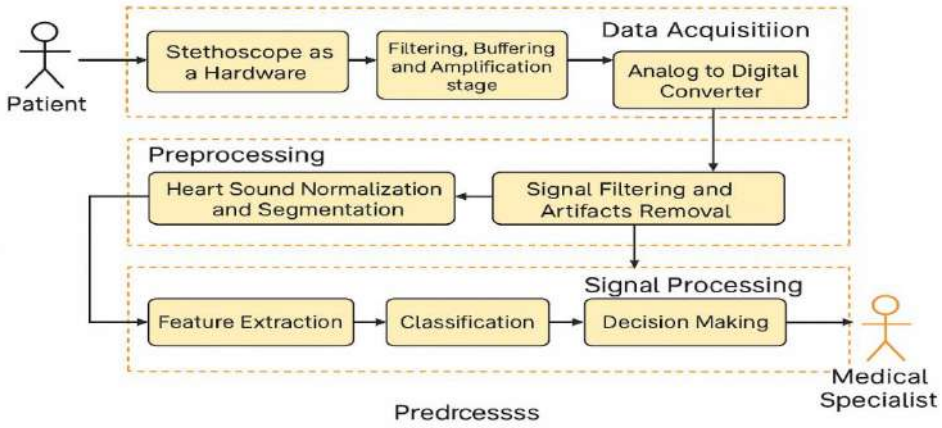


Figure 4. Framework for the registration and processing of cardiac sounds, followed by analysis

b) Acquisition of Heart Sounds

In the initial stage of cardiac sound acquisition, an automated audio signal is generated to reflect cardiac function, laying the foundation for subsequent computational processing steps.

The patient's heart sounds are recorded using a digital stethoscope, as depicted in Figure 5. The design of this device may include a digital acoustic system, a piezoelectric sensor, or a pneumatic receiving mechanism. The device subsequently converts the heart's electrodynamic activity into auditory representations.

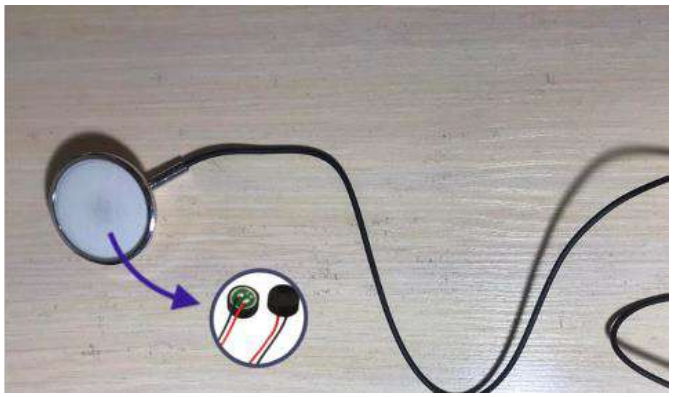


Figure 5. Electronic sensor stethoscope

Signal amplification and filtration are essential stages in every data transmission system. Low-pass filters are utilized to reduce interference from external electrical sources. An anti-aliasing filter is utilized to avert spectral aliasing and prevent distortion during signal digitization. A bandpass filter is utilized in specific implementations, tuned to the frequency range that captures the primary components of heart sounds. This facilitates accurate evaluation of the required bandwidth and reduces the likelihood of distortion caused by frequency overlap. Following the amplification phase, the signal is directed to the analog-to-digital converter, where it is converted into digital format. This module ensures accurate signal digitization, with conversion settings configurable in advance by the device developer [11]. Increased sampling rates and bit depth improve the accuracy of digital data representation while also enhancing the efficient use of bandwidth and energy resources.

c) Data Collection

At this stage, the digitized cardiac acoustic signals undergo noise reduction, calibration, and segmentation [12]. A noise reduction module is used to reduce noises in the signals. A digital filtering architecture is typically utilized to separate the target signal from background noise, restricting the processing to the relevant frequency range. Modern noise-reduction methods can significantly

improve the signal-to-noise ratio (SNR), thereby facilitating more accurate identification of informative segments in the signal.

Calibration and rhythmic segmentation. Divergences in signal recording sites and equipment settings may result in inconsistencies in the configuration of the obtained acoustic data. The signals are calibrated to the reference scale to equalize variations, thereby minimizing variability caused by data-source heterogeneity and preventing distortion of amplitude characteristics. The auditory sequence is segmented rhythmically, enabling the subsequent stage of processing: the extraction of cardiac signal components and the identification of diagnostically pertinent characteristics.

d) Processing Module for Cardiac Acoustic Signals

Currently, the primary activities performed are feature extraction and classification.

Signal processing involves converting analog data into a digital format suitable for detailed analysis and subsequent therapeutic application. The gathered attributes are used within a classification framework that enhances data interpretation and supports medical decision-making in diagnosis and treatment planning.

Central processing units are fundamental components of devices that process digital inputs and perform calculations.

Our investigation revealed that the primary focus is on three crucial phases of automated detection of various cardiac abnormalities and auditory disorders:

e) Compilation of cardiac auscultation data and development of sensor systems.

f) Diminution of noise and segmentation of cardiac acoustic signals.

g) Accurate feature extraction achieved through independent assessment of cardiac sounds.

In this research work, a hybrid CNN–BiLSTM model is proposed for classifying cardiac acoustic signals. This model combines the advantages of Convolutional Neural Network (CNN) and Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) networks, which allows for efficient detection of spatial and temporal features.

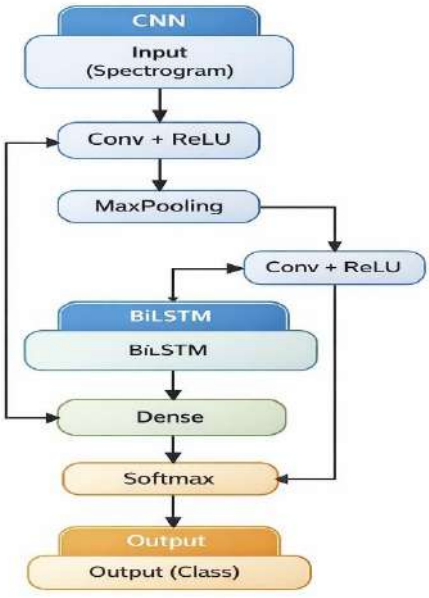


Figure 6. Cardiac signal classification model using CNN–BiLSTM

The figure shows a neural network that processes cardiac signals in the form of a spectrogram. First, CNN layers extract important features, then BiLSTM analyzes temporal dependencies. Finally, the signal is classified into a specific class using Dense and Softmax layers.

The CNN part is designed to automatically extract local patterns and frequency features from input signals or their spectrogram representations:

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^{n} w_j\, x_{i+j-1} + b\right) \quad (1)$$

Where:
x – input signal
w – filter (kernel)
b – bias
f – activation function
This reduces the need for manual feature extraction and increases the efficiency of the model.

The BiLSTM layer allows for the detection of temporal dependencies. Unlike conventional LSTM, BiLSTM processes the signal in two directions (forward and backward) which allows for a better understanding of complex temporal structures:

$$h_t, C_t = LSTM(x_t, h_{t-1}, C_{t-1}) \quad (2)$$

Where:
x_t – current input data,
h_{t-1} – previous hidden state,
C_{t-1} – previous memory state,
h_t – current hidden state,
C_t – updated memory state.

The features obtained from the CNN layers are fed to the BiLSTM network, after which the final classification is performed using Fully Connected Layers.

Results of the study

Hardware. The rapid advancement of mobile technologies presents new opportunities to enhance conventional medical practices. Possible applications include mobile devices for clinical data acquisition, the distribution of diagnostic information to healthcare providers, researchers, and patients, online surveillance of patient vital signs, and the delivery of immediate responses to medical emergencies. The proposed architecture is simple and comprises merely three essential components: a stethoscope, a customized mobile application, and an effective hardware device. An electronic sensor for capturing acoustic impulses is optimally positioned within the stethoscope chamber. To minimize external interference, all other openings of the tube are hermetically sealed, except for the sound inlet.

Figure 7 illustrates the primary components of the proposed electronic stethoscope.

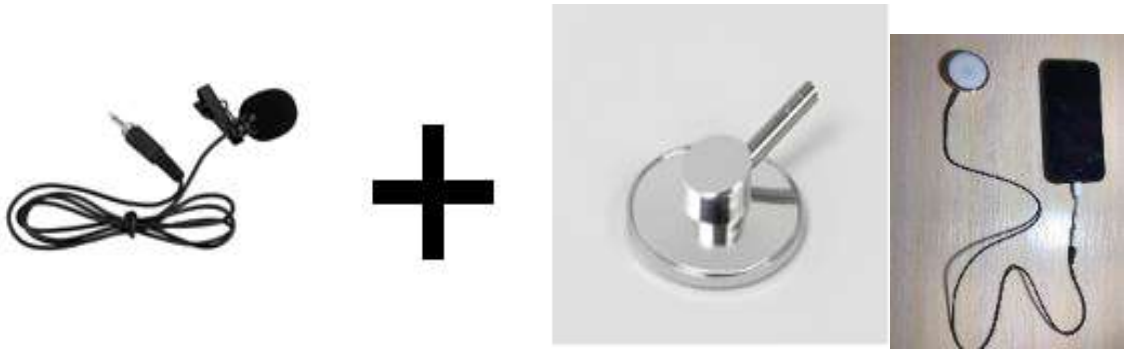


Figure 7. Electronic sensor stethoscope

Figure 8 illustrates the methodological framework for detecting cardiac irregularities on a mobile device after acoustic cardiac signals are collected with a stethoscope. The initial phase involves a comprehensive analysis of audio data collected with a stethoscope. The next phase utilizes an advanced algorithm designed to identify and eliminate background noise.

A refined classification method is utilized to examine the purified and organized signals [8-11]. The final stage of analysis identifies critical diagnostic indicators that form the basis for an initial evaluation of cardiac health, providing a thorough overview of possible heart conditions.

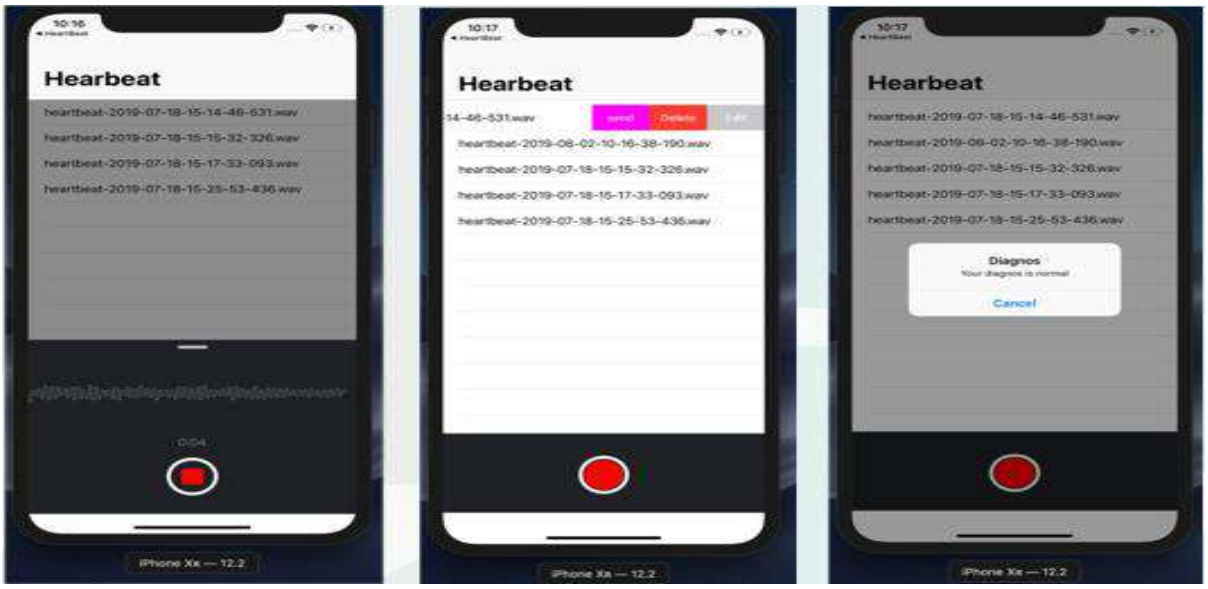
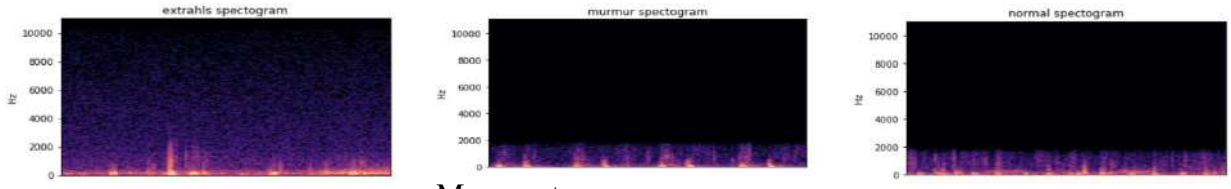


Figure 8. Heartbeat abnormality detection process

Software

Figure 9 illustrates diverse acoustic profiles of cardiac activity, encompassing normal sounds indicative of a healthy heart; murmurs, which are supplementary acoustic phenomena resulting from circulatory abnormalities and characterized by distinct oscillations; additional tones, which are unintended acoustic signals; and artifacts, which are various atypical sound manifestations captured during the recording process



Extrahls type Murmur type Normal type

Figure 9. Analysis of cardiac acoustic waves in temporal and spectral domains

Figure 8 illustrates the training and validation techniques employed to identify irregular cardiac cycles. This image illustrates the accuracy of training and validation throughout 300 iterations. Figure 10-11 depicts the fluctuations of loss across the training and validation phases. Significantly, after around 100 iterations, the loss for both training and validation phases begins to exhibit a propensity to stabilize.

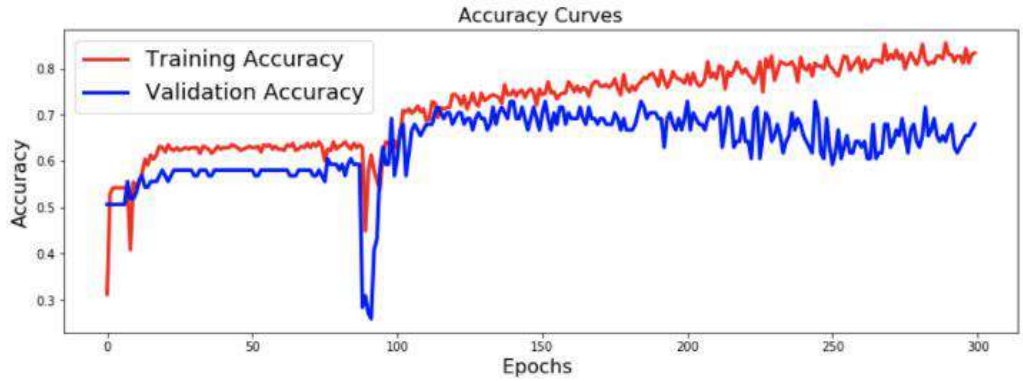


Figure 10. Using a Machine Learning Model for the Detection of Abnormal Heartbeats

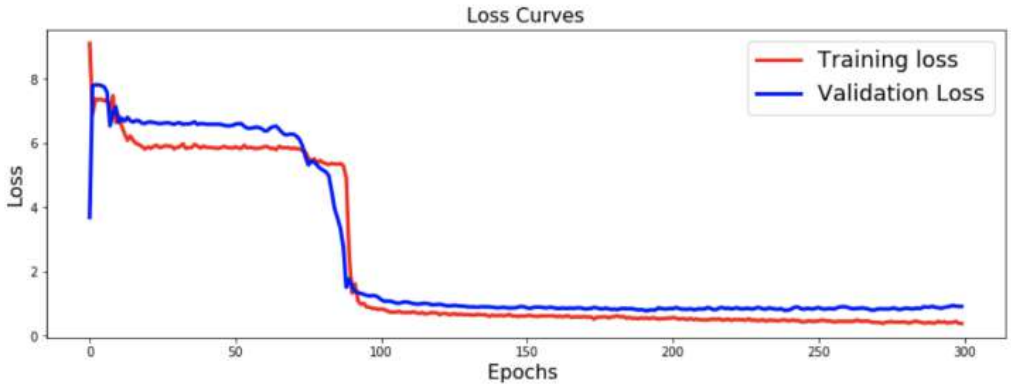


Figure 11. Comparative assessment of training and validation losses during model training

Figure 12 illustrates the error matrix derived from the classification of heart audio signals acquired using a digital stethoscope in the context of the planned study on real-time phonocardiogram-based cardiac diagnosis. The matrix illustrates the efficacy of the categorization model across five types of heart sounds: artifacts, additional heart sounds, extrasystoles, heart murmurs, and normal heart sounds.

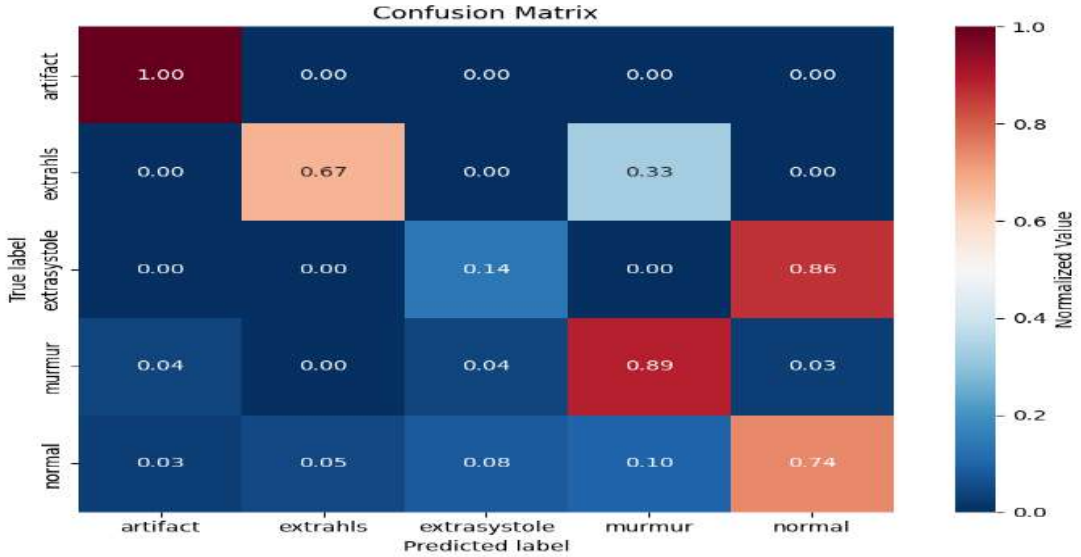


Figure 12. Confusion matrix for different types of heart sound classification

For recognition accuracy testing, the diagonal parts of the matrix show the fraction of true positives for each category. Thus, the model identified artifacts with 100% accuracy, demonstrating the algorithm's remarkable sensitivity to non-pathological noise. Extrasystoles were diagnosed with 86% accuracy, and normal heart sounds were recognized with 74% accuracy.

Pathological signs, including extra cardiac sounds and murmurs, complicate classification. In particular, 33% of extra heart sounds and 23% of heart murmurs were misdiagnosed. This shows that the acoustic qualities of small diseases are similar to those of normal heart sounds and highlights the limits of the feature-extraction and categorization system.

The findings suggest improving feature extraction and classification algorithms to more accurately diagnose minor illnesses. These regions need more research and improvements to improve the model's accuracy, reduce misclassifications, and improve clinical reliability.

Discussion

Despite the high overall accuracy of 94.5%, the lower results for individual classes are explained by the use of different evaluation metrics. Specifically, the accuracy for normal signals is 74%, while for extrasystoles it is 86%. While overall accuracy describes the proportion of correctly classified samples for the entire dataset, the metrics for individual classes indicate sensitivity or intra-class accuracy values, which are determined based on the diagonal elements of the confusion matrix.

Although the model demonstrates high overall performance, there are differences in the recognition performance of certain classes. This is explained by the similarity of the acoustic characteristics of the signals and the imbalance of classes in the datasets.

Conclusion

This paper reports a study on the development and evaluation of an intelligent system for diagnosing heart disorders by analyzing real-time phonocardiograms recorded with a digital stethoscope. The swift advancement of mobile technologies offers numerous opportunities for incorporating methods for collecting, processing, and evaluating medical data directly into clinical practice. The suggested device architecture is straightforward and comprises three essential components: an electronic stethoscope with an integrated sensor, a mobile application, and a compact processing module.

These findings underscore the need for improved acoustic feature extraction techniques and classification algorithms, particularly for identifying subtle or uncommon clinical diseases. The use of more complex neural network topologies and the augmentation of the training dataset to address clinical heterogeneity appear to be potential avenues for further investigation.

The proposed device has potential as an auxiliary diagnostic instrument that can enhance the accuracy and efficiency of primary cardiac evaluations, particularly in remote monitoring and mobile healthcare contexts.

References

[1] Omarov, B., Saparkhojayev, N., Shekerbekova, S., Akhmetova, O., Sakypbekova, M., Kamalova, G., ... & Akanova, Z. (2022). Artificial Intelligence in Medicine: Real Time Electronic Stethoscope for Heart Diseases Detection. Computers, Materials & Continua, 70(2).

[2] Chowdhury, M. E., Khandakar, A., Alzoubi, K., Mansoor, S., M. Tahir, A., Reaz, M. B. I., & Al-Emadi, N. (2019). Real-time smart-digital stethoscope system for heart diseases monitoring. Sensors, 19(12), 2781.

[3] Elhilali, M., & West, J. E. (2019). The stethoscope gets smart: Engineers from Johns Hopkins are giving the humble stethoscope an AI upgrade. IEEE spectrum, 56(2), 36-41.

[4] Omarov, B., Tuimebayev, A., Abdrakhmanov, R., Yeskarayeva, B., Sultan, D., & Aidarov, K. (2023). Digital stethoscope for early detection of heart disease on phonocardiography data. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 14(9).

[5] Tran, V. T., & Tsai, W. H. (2019). Stethoscope-sensed speech and breath-sounds for person identification with sparse training data. IEEE Sensors Journal, 20(2), 848-859.

[6] Shkel, A. A., & Kim, E. S. (2019). Continuous health monitoring with resonant-microphone-array-based wearable stethoscope. IEEE Sensors Journal, 19(12), 4629-4638.

[7] Hirosawa, T., Ito, T., Harada, Y., Ikenoya, K., Yokose, M., & Shimizu, T. (2023). The utility of phonocardiograms in real-time remote cardiac auscultation using an internet-connected electronic stethoscope: Open-label randomized controlled pilot trial. Digital Health, 9, 20552076231161945.

[8] Kambhampati, A. B., & Ramkumar, B. (2020). Automatic detection and classification of systolic and diastolic profiles of PCG corrupted due to limitations of electronic stethoscope recording. IEEE Sensors Journal, 21(4), 5292-5302.

[9] Arora, V., Leekha, R., Singh, R., & Chana, I. (2019). Heart sound classification using machine learning and phonocardiogram. Modern Physics Letters B, 33(26), 1950321.

[10] Vernekar, S., Nair, S., Vijaysenan, D., & Ranjan, R. (2016, September). A novel approach for classification of normal/abnormal phonocardiogram recordings using temporal signal analysis and machine learning. In 2016 computing in cardiology conference (CinC) (pp. 1141-1144). IEEE.

[11] Li, H., Wang, X., Liu, C., Zeng, Q., Zheng, Y., Chu, X., ... & Karmakar, C. (2020). A fusion framework based on multi-domain features and deep learning features of phonocardiogram for coronary artery disease detection. Computers in biology and medicine, 120, 103733.

[12] Kalimuthu, M., & Hemanth, C. (2025). Preliminary Study on Real-Time Phonocardiogram Signal Acquisition and Analysis Using Machine Learning and IoMT for Digital Stethoscope. IEEE Access.

IRSTI 28.23.15

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.016

G.I. Beissenova[1], R.D. Ospanova[2], U.B. Balgymbekova[2], G.M. Abdrakhmanoava[2], A.N. Zhidebayeva[3*]

[1]Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan
[2]Central Asian Innovative University, Shymkent, Kazakhstan
[3]Peoples Friendship University named after Academician A. Kuatbekov, Shymkent, Kazakhstan
[*]*e-mail:* aziza_68.kz@mail.ru

NEURAL NETWORK – BASED SECURITY FRAMEWORK FOR IOT DEVICES

Abstract

The research article demonstrates that current IT advancements include the rapid growth of the Internet of Things (IoT). The Internet of Things allows tangible elements to be integrated into digital frameworks. A complex infrastructure of smart sensors, sensor networks, home appliances, industrial controllers, and medical devices automates processes, improves management, and enables new services. The Internet of Things affects energy, transportation, manufacturing, healthcare, and education. The research demonstrates the effectiveness of a machine learning model for classifying normal and anomalous data in IoT systems. To evaluate the performance of our proposed model, we used an open-source BoT-IoT dataset for the IoT environment. 80 percent of the dataset used for the study was used for model training, while 20 percent was implemented in testing mode. Classification metrics, including precision, recall, and F1-score, approach 1.0, indicating high accuracy with a 100% classification rate. The model, particularly the Random Forest, successfully identifies anomalies in network behavior and triggers alarms when threats are detected. It highlights the advantages of using deep neural networks for malware detection in IoT environments, which can analyze both static binary files and dynamic process behaviors. These models adapt to new threats, enhancing security measures in a landscape where traditional methods fall short.

Keywords: IOT, information technologies, artificial intelligence, anomaly detection, CNN, LSTM.

Г.И. Бейсенова[1], Р.Д. Оспанова[2], У.Б. Балгимбекова[2], Г.М. Абдрахманова[2], А.Н. Жидебаева[3]
[1]М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қ., Қазақстан,
[2]Орталық Азия инновациялық университеті, Шымкент қ., Қазақстан,
[3]Академик А.Қуатбеков атындағы Халықтар достығы университеті, Шымкент қ., Қазақстан

ЗАТТАР ИНТЕРНЕТІ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН ҚОРҒАУДА НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІ ҚОЛДАНУ

Аңдатпа

Ұсынылып отырған зерттеу мақаласында қазіргі IT жетістіктеріне заттар интернетінің (IoT) жылдам өсуіндегі жетістіктер туралы баяндалады. Заттар интернеті материалдық элементтерді сандық құрылымдарға біріктіруге мүмкіндік береді. Ақылды сенсорлардың, сенсорлық желілердің, тұрмыстық техниканың, өнеркәсіптік контроллерлердің және медициналық құрылғылардың күрделі инфрақұрылымы процестерді автоматтандырады, басқаруды жақсартады және жаңа қызметтерді ұсынады. Заттар интернетін пайдалану энергетикаға, көлікке, өндіріске, денсаулық сақтауға және білім беруге әсер етеді. Зерттеу жұмысының мақсаты - заттар интернеті (IoT) жүйелеріндегі қалыпты және аномальды деректерді жіктеуде машиналық оқыту моделінің тиімділігін көрсетеді. Ұсынып отырған модельіміздің өнімділігін бағалау үшін IoT ортасына арналған ашық қолжетімді BoT-IoT деректер жиыны пайдаланылды. Зерттеуге пайдаланылған деректер қорының 80 пайызы модельді оқытуға пайдаланылса, 20 пайызы тестілеу режимінде жүзеге асырылды. Зерттеудің нәтижесі дәлдік (precision), еске түсіру(recall) және F1 ұпайын қоса алғанда, жіктеу көрсеткіштері 1.0 тәсілі, 100% жіктеу деңгейімен жоғары дәлдікті көрсетеді. Модель, әсіресе кездейсоқ орман (Random Forest), желілік мінез-құлықтағы ауытқуларды сәтті анықтайды, қауіптер анықталған кезде дабылдарды іске қосады. Сондай -ақ, IoT орталарында зиянды бағдарламаларды анықтау үшін терең нейрондық желілерді пайдаланудың артықшылықтарын атап көрсетеді, олар статикалық екілік файлдарды да,

динамикалық процестердің мінез-құлқын да талдай алады. Бұл модельдер жаңа қауіптерге бейімделеді, дәстүрлі әдістер жетіспейтін жағдайда қауіпсіздік шараларын күшейтеді.

Түйін сөздер: IOT, ақпараттық технологиялар, жасанды интеллект, аномалияларды анықтау, CNN, LSTM.

Г.И. Бейсенова[1], Р.Д. Оспанова[2], У.Б. Балгимбекова[2], Г.М. Абдрахманова[2], А.Н. Жидебаева[3]
[1]Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, г.Шымкент, Казахстан,
[2]Центрально-Азиатский инновационный университет, г.Шымкент, Казахстан
[3]Университет дружбы народов имени академика А.Куатбекова, г.Шымкент, Казахстан

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ УСТРОЙСТВ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Аннотация

В представленной исследовательской работе рассматривается стремительный рост Интернета вещей (IoT) в современных ИТ-разработках. Интернет вещей позволяет интегрировать физические элементы в цифровые структуры. Сложная инфраструктура интеллектуальных датчиков, сенсорных сетей, бытовой техники, промышленных контроллеров и медицинских устройств автоматизирует процессы, улучшает управление и предоставляет новые услуги. Использование Интернета вещей затрагивает энергетику, транспорт, производство, здравоохранение и образование. Цель исследовательской работы – продемонстрировать эффективность модели машинного обучения в классификации нормальных и аномальных данных в системах Интернета вещей (IoT). Для оценки производительности предложенной нами модели мы использовали открытый набор данных BoT-IoT для среды Интернета вещей. 80 процентов набора данных, использованного в исследовании, было использовано для обучения модели, а 20 процентов – в тестовом режиме. Результаты исследования показывают, что метрики классификации, включая точность, полноту и F1-меру, демонстрируют высокую точность с коэффициентом классификации 1,0, особенно модель Random Forest, успешно выявляющая аномалии в поведении сети и запускающая оповещения при обнаружении угроз. Также подчеркиваются преимущества использования глубоких нейронных сетей для обнаружения вредоносного ПО в средах IoT, которые могут анализировать как статические бинарные файлы, так и поведение динамических процессов. Эти модели адаптируются к новым угрозам, усиливая меры безопасности там, где традиционные методы терпят неудачу.

Ключевые слова: Интернет вещей (IoT), информационные технологии, искусственный интеллект, обнаружение аномалий, CNN, LSTM

Introduction

The swift proliferation of the Internet of Things (IoT) is a hallmark of the current phase of technological advancement. The Internet of Things facilitates the incorporation of tangible elements into a cohesive digital framework. Smart sensors, sensor networks, home appliances, industrial controllers, and medical devices form a complex infrastructure that supports process automation, improves operational efficiency, and enables the development of new services. The energy, transportation, manufacturing, healthcare, and education sectors are substantially influenced by the extensive use of the IoT.

According to international analytical agencies, the number of connected IoT devices is increasing rapidly, with projections indicating it will surpass tens of billions in the coming years. Alongside the tremendous potential they offer to society and the economy, these processes also raise significant concerns about information security. A heterogeneous array of devices employing various protocols in a dispersed setting may be a potential target for cybercriminals. The primary dangers include the proliferation of viruses, distributed denial-of-service (DDoS) attacks that inundate servers with traffic from multiple sources, unauthorized remote access, and the alteration or disclosure of sensitive information.

Firewalls, rule-based intrusion detection systems, cryptographic algorithms, and traffic filtering exemplify classic security methods that remain integral to security architecture. Nonetheless, the ever-evolving nature of digital threats undermines the effectiveness of such initiatives. To circumvent security measures, adversaries employ creative approaches, including deploying botnets that leverage

IoT devices and exploiting vulnerabilities in software and hardware platforms. Consequently, standard methods are frequently inadequate for the rapid identification and mitigation of attacks.

In these situations, artificial intelligence (AI) approaches, especially neural networks, are gaining prominence. This is because they have shown considerable efficacy in classification, forecasting, and analysis of extensive data streams. The use of neural network models facilitates a shift from static restrictions to intelligent adaptive systems capable of identifying previously unnoticed hazards. The precise detection of anomalies is facilitated by the creation of standard activity profiles, the examination of device behavioral traits, and the real-time monitoring of network data.

Neural networks are employed in various essential areas of IoT infrastructure security. They can identify deviations from standard device activity patterns, facilitating intelligent anomaly detection. Secondly, deep machine learning models can classify both malware and network packets, rendering them more reliable than signature-based methods for attack detection. Thirdly, neural networks are employed in multi-factor authentication systems that process biometric data. This diminishes the probability of unauthorized access to equipment [1-2].

Numerous challenges complicate the application of neural networks for cybersecurity within the IoT. This encompasses the significant computational complexity of algorithms, the need for large training datasets, and the difficulty in interpreting model outputs. Hybrid architectures, including convolutional and recurrent neural networks, are widely used because they maintain real-time system performance while achieving high accuracy in attack detection. Consequently, one might argue that neural networks are increasingly vital tools for safeguarding IoT devices and networks. Their implementation introduces new opportunities for advancing adaptive and intelligent cyber defense systems, enabling responses to a rapidly evolving threat landscape [3]. This article examines the role of neural networks in enhancing the security of the IoT and evaluates the practical implications of their use in this domain.

Research Methodology

Recent research in information security demonstrates that neural networks are essential to advancing intelligent security solutions in IoT frameworks. Their use arises from the ability to analyze vast data streams, identify hidden patterns, and adjust to changing circumstances, significantly improving the effectiveness of combating cyber-attacks. Unlike traditional methods that rely on fixed rules or signature databases, neural network methodologies deliver adaptive responses to emerging threat vectors, thereby providing superior protection. This study examines the principal areas of neural network application in IoT device security [4].

The work used the open-source BoT-IoT dataset to identify anomalies in IoT devices. The dataset, which can be downloaded from Bot-IoT_Dataset – OneDrive, includes both normal and malicious traffic on IoT networks. This dataset was generated by modeling real network traffic and includes both normal and anomalous activities.

The BoT-IoT dataset includes various types of cyberattacks, including:

a) Distributed Denial of Service (DDoS) attacks,
b) Botnet activity, malicious actions, and suspicious network traffic patterns.

Each data item in the dataset is labeled, meaning that each item is assigned to a corresponding class (normal or anomaly). This creates a favorable environment for training and evaluating machine learning models.

During the research work, the data was pre-processed: unnecessary labels were removed and the data was normalized. In addition, the dataset was divided into training and testing sets (for example, 80% - training, 20% - testing).

Identification of anomalies

Anomaly detection, the process of identifying deviations from the normative behavior of systems or devices, is essential for IoT security. Neural networks, especially autoencoders and recurrent architectures such as LSTMs, have demonstrated considerable effectiveness in this field. They can assess network traffic, sensor telemetry, and device behavioral profiles instantaneously.

Figure 1 shows anomaly detection results from the Random Forest algorithm.

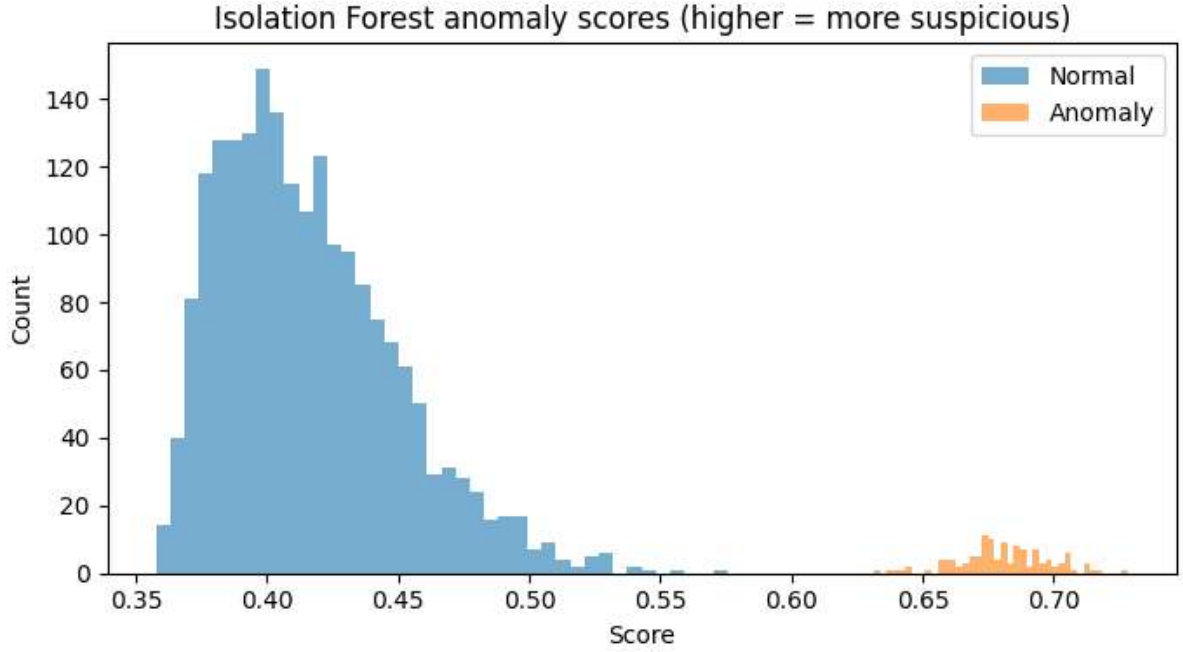


Figure 1. Distribution of abnormal and normal data by points

The upper section displays classification metrics:

a) The precision, recall, and F1-score for both the "Normal" and "Anomaly" classes approach 1.0, signifying nearly flawless data differentiation.

b) The confusion matrix indicates that the model accurately categorized 2000 objects as normal and 120 as anomalous, with minimal errors.

c) The classification accuracy achieved was 100%.

d) The histogram of the anomalous score distribution is presented below.

e) The blue hue signifies standard observations, with values between 0.35 and 0.55.

f) The orange anomalies are strongly delineated and fall within the 0.60–0.70 range.

g) A higher "score" indicates greater suspicion over the object.

h) The graph indicates that the Random Forest model proficiently identifies assaults and failures in IoT systems, as their distributions rarely intersect.

This method enables the identification of aberrant behavior, including substantial increases in network packets, access to atypical resources, changes in temporal patterns, or unauthorized access attempts [5]. Upon identifying an anomaly, the system independently triggers alarms or initiates protocols to prevent suspicious activity. The advantage resides in the neural network's ability to identify previously undetected dangers that lack observable indicators, which is especially vital in the context of rapidly evolving attacks.

Malware detection

Neural networks are used to classify malware that can compromise IoT devices via network protocols, updates, or firmware vulnerabilities. Unlike traditional signature-based methods, deep neural networks (DNNs, CNNs) can identify advanced characteristics in program code or network packets, distinguishing between benign and malicious activities.

These models utilize both static analysis, which scrutinizes binary files and their architectures, and dynamic analysis, which observes process behavior in real time. Extensive research indicates that deep architectures can significantly improve malware detection accuracy and reduce false-positive rates. This is especially vital in the IoT landscape, where the widespread implementation of devices and their limited computational capacities render traditional security measures ineffective [6].

Adaptive safeguarding

The principal benefit of neural networks is their ability to learn and adapt. Unlike static security systems that operate according to predetermined protocols, neural network models can be improved and adapted to respond to emerging threats. Training may occur on centralized servers or via distributed or federated learning, which is especially pertinent for the IoT, as data is stored across multiple devices.

The figure 2 depicts the calibration of biometric verification thresholds based on cosine similarity.

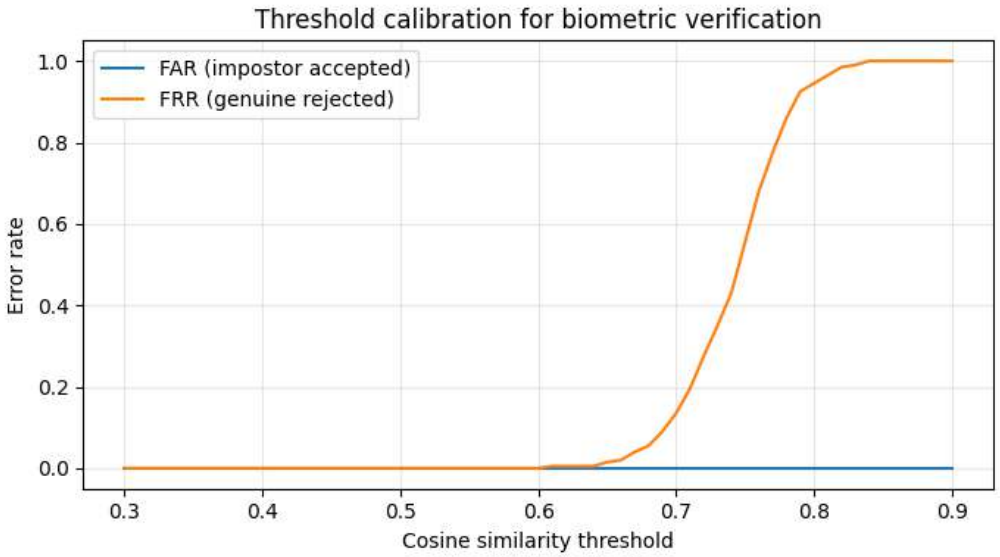


Figure 2. Biometric verification threshold calibration chart

The X-axis represents cosine similarity threshold values, and the Y-axis denotes the error rate. The blue FAR (False Acceptance Rate) indicator signifies the probability of erroneously accepting a "impostor" (unauthorized user). The orange FRR indication signifies the probability of erroneously rejecting a legitimate user.

The graph indicates that false acceptance is infrequent at low threshold levels; however, it increases significantly above 0.7, as evidenced by the rise in the FRR indicator. This indicates that stringent thresholds elevate rejections, even for authorized users [7].

Achieving a balance between security and convenience requires selecting the optimal cosine similarity threshold. The suggested threshold range is 0.65–0.7, which optimally balances a low false acceptance rate (FAR) and a moderate false rejection rate (FRR) to maintain the dependability of biometric identification systems in the IoT context.

Adaptability improves system resilience against novel attacks, including modified versions of existing exploits, zero-day vulnerabilities, and advanced targeted assaults. Furthermore, the application of transfer learning techniques enables the swift adaptation of pre-trained models to new contexts, hence minimizing resource and time costs.

Intelligent Authentication

The authentication procedure for users and devices is a vulnerability inside the IoT framework. The security provided by conventional systems, such as passwords or personal identification numbers (PIN codes), is insufficient. In this context, there is significant activity in developing neural network-based techniques utilizing biometric characteristics [8].

Convolutional neural networks (CNNs) exhibit a significant level of precision in tasks involving the identification of faces, fingerprints, and irises. Recurrent neural networks are used to examine vocal attributes and user behavior dynamics. The likelihood of unauthorized access to IoT devices is markedly reduced when multi-factor authentication, leveraging multiple biometric characteristics concurrently, is implemented [9].

Consequently, neural networks provide a multi-tiered protection for IoT devices, encompassing traffic analysis and monitoring as well as sophisticated user identification. Adaptive cyber protection measures can be implemented to withstand various threats. Nonetheless, it is crucial to acknowledge concurrent drawbacks, including increased computational complexity, the need for high-quality training data, and the challenge of interpretability [10-11]. Nonetheless, advances in hardware accelerators, the introduction of innovative model optimization techniques, and the rise of Explainable Artificial Intelligence (AI) are progressively mitigating these issues [12].

Results of the study

An experiment employed a hybrid model combining convolutional neural networks (CNN) and bidirectional recurrent LSTM networks to evaluate IoT network data. The study evaluated the model's capacity to categorize system states (normal vs. anomalous) and to discern data behavior patterns at different processing stages.

Examination of input temporal series

The initial graph (Figure 1, upper panel) illustrates packets per second and outbound traffic derived from the time series mimicking IoT device network settings. It should be noted that the values are stochastic and exhibit moderate variability, characteristic of actual network dynamics. Although local variations and bursts are observable, they may signify atypical behavior. The data's initial condition is shown prior to the neural network's feature extraction.

Feature Extraction Using CNN

The second panel of Figure 1 illustrates the channel-averaged activations of the CNN convolutional layer. The convolutional filters attenuate the signal and emphasize temporal variations in traffic intensity. CNNs can identify localized patterns, such as transient activity surges or anomalous packet distributions. These attributes supply the model's recurrent block.

Consequently, the CNN decreases data dimensionality while enhancing information density. The incremental increase in average activation over time indicates the extraction of features relevant to classification.

Temporal Dependencies and Bidirectional Long Short-Term Memory

The third panel of Figure 1 illustrates the dynamics of the BiLSTM hidden states. The normative values of the concealed vectors progressively rise, culminating towards the conclusion of the sequence. Data accumulation over many time steps indicates that BiLSTM models effectively capture long-term dependencies. CNN emphasizes local patterns, but LSTM analyzes global context, which is crucial in network traffic analysis, where abnormalities may develop gradually.

Concealed activations at the sequence's conclusion may suggest that the network acquires knowledge of aberrant characteristics. These dynamics reinforce the notion that recurrent networks are crucial for identifying intricate and protracted anomalies.

Classification outcomes

The model quantifies prediction confidence instead of rendering a binary decision. This attribute is advantageous in IoT systems, as it enables administrators to use probabilistic predictions to establish adaptive thresholds for monitoring and active response.

Significance and utilization

The findings indicate that the hybrid CNN + BiLSTM architecture can address two issues concurrently:

a) CNN local analysis for identifying short-term traffic surges.
b) Global LSTM analysis incorporates long-term dependencies and the buildup of anomalies.

This approach effectively identifies intricate attacks, encompassing concealed or "slow" anomalies that conventional methods fail to detect. Hybrid methods diminish false positives and enhance the reliability of IoT security.

The figure 3 shows visualizing the model's functionality (CNN activations and LSTM hidden states) helps researchers understand the patterns the network recognizes and their influence on the final decision. This links these systems with Explainable AI, which is essential in cybersecurity.

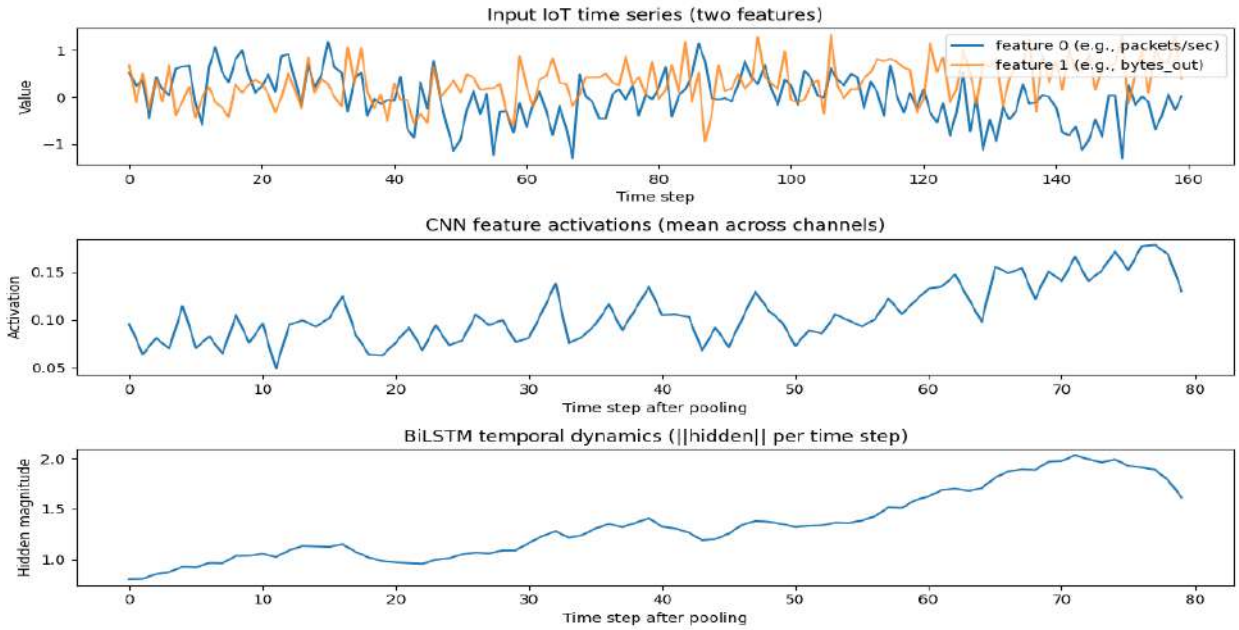


Figure 3. Hybrid CNN–BiLSTM model temporal dynamics visualization

The trials demonstrate that the hybrid CNN + BiLSTM model can identify anomalies in IoT traffic. The model emphasized significant traits, accounted for temporal context, and produced dependable probabilistic predictions. The displayed outcomes validate the architectural selection and provide enhanced optimization, including attention methods and more representative feature sets.

The figure 4 depicts the probability distribution of the hybrid CNN + BiLSTM model for binary classification of "norm/anomaly."

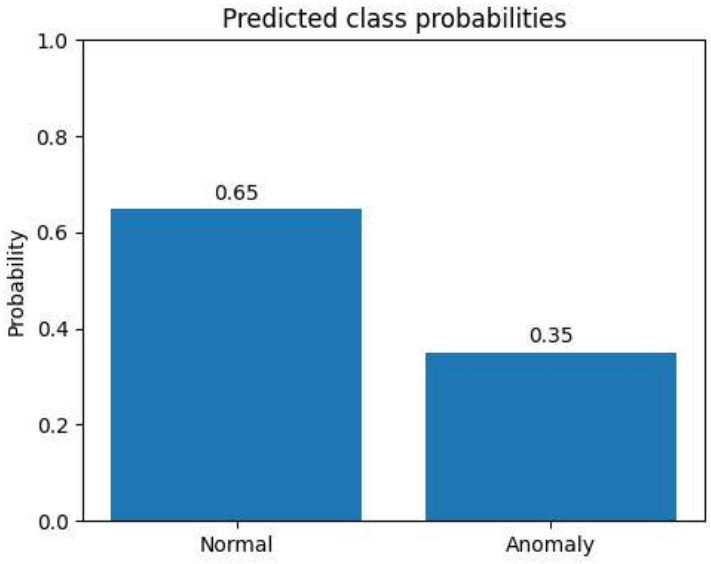


Figure 4. Distribution of prediction probabilities of the hybrid CNN–BiLSTM models

The model's confidence in the case's classification is indicated by the bar's height. The likelihood of the "Norm" class was 65%, whereas that of the "Anomaly" class was 35%. This outcome indicates that the model renders both categorical and probabilistic determinations, enabling the evaluation of a network event's "suspiciousness."

The analysis of these results is essential for IoT system applications. For instance:

a) Should the threshold of 70–80% be surpassed, the system will obstruct dubious activities. Events exhibiting an anomaly probability between 30% and 50% may be classified as "doubtful" and forwarded to the administrator for additional examination.

b) Probabilistic inference facilitates adaptable system modifications to meet particular security demands: essential infrastructures employ rigid thresholds, whereas residential IoT devices utilize more lenient thresholds.

c) The graph indicates that CNN + BiLSTM can effectively detect anomalies and evaluate decision confidence, which is essential in unpredictable and noisy network data.

Discussion

The research indicated that neural networks hold significant potential for cybersecurity in the Internet of Things. The increasing prevalence of connected devices and the complexity of network interaction design pose new challenges for intelligent, adaptive security measures. Deep learning addresses challenges that conventional technologies could not resolve.

Anomaly detection is effective in neural networks. Convolutional neural networks (CNNs) identify local patterns and transient network traffic surges, whereas recurrent neural networks (LSTMs, BiLSTMs) address long-term dependencies and variations in device behavior. These techniques in hybrid models provide thorough data analysis, enhancing the identification of attacks, even concealed or gradual irregularities.

Secondly, neural network techniques have demonstrated efficacy in classifying harmful code and analyzing network traffic. Deep learning models can generalize from experience, detect novel dangers, and minimize false positives, unlike signature systems. This is essential given the rapid release of new exploits and the evolution of attacks.

Third, the study emphasizes the use of sophisticated authentication systems. Biometric neural network models (voice, facial, behavioral) can enhance the trustworthiness of IoT devices and reduce unauthorized access. Multi-factor authentication enhances security by integrating biometrics, behavioral attributes, and contextual elements.

Conclusion

Nonetheless, prevailing constraints must be acknowledged. Significant computing expenses, extensive training datasets, and opaque decision-making processes persist as challenges. To deploy models in the IoT ecosystem, structures must be optimized, algorithmic resource consumption must be minimized, and explainable AI methodologies must be established. Federated and distributed learning minimize data transmission and the risk of exposing confidential information.

In summary, neural networks are establishing a novel paradigm for IoT cybersecurity. Their implementation enables intelligent security systems to adapt to a rapidly evolving threat environment, detect novel anomalies, and maintain user confidence. Consequently, deep learning techniques for IoT must be developed and incorporated to establish a sustainable and reliable digital ecosystem within the framework of global digitalization.

References

[1]Mu, X., & Antwi-Afari, M. F. (2024). The applications of IoTin industrial management: a science mapping review. International Journal of Production Research, 62(5), 1928-1952.

[2]Islam, Z., Bhuiyan, M. R. I., Poli, T. A., Hossain, R., & Mani, L. (2024). Gravitating towards internet of things: Prospective applications, challenges, and solutions of using IoT. International Journal of Religion, 5(2), 436-451.

[3]Bekualykyzy, B. G., Zhakypkyzy, Z. A., Nurbolat, T., Alimhan, K., Sherzod, T., & Smakhulovna, S. G. (2024, May). Control of nonlinear system by means of feedback using the Python-control library. In 2024

IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST) (pp. 164-168). IEEE.

[4]Rath, K. C., Khang, A., & Roy, D. (2024). The role of IoTtechnology in Industry 4.0 economy. In Advanced IoT technologies and applications in the industry 4.0 digital economy (pp. 1-28). CRC Press.

[5]Belessova, D., Ibashova, A., Zhidebayeva, A., Shaimerdenova, G., & Nakhipova, V. (2024). The impact of "scratch" on student engagement and academic performance in primary schools. Open Education Studies, 6(1), 20220228.

[6]Hashem, I. A., Siddiqa, A., Alaba, F. A., Bilal, M., & Alhashmi, S. M. (2024). Distributed intelligence for IoT-based smart cities: A survey. Neural Computing and Applications, 36(27), 16621-16656.

[7]Makhanova, Z., Beissenova, G., Madiyarova, A., Chazhabayeva, M., Mambetaliyeva, G., Suimenova, M., ... & Baiburin, A. (2024). A Deep Residual Network Designed for Detecting Cracks in Buildings of Historical Significance. International Journal of Advanced Computer Science & Applications, 15(5).

[8]Erhueh, O. V., Elete, T., Akano, O. A., Nwakile, C., & Hanson, E. (2024). Application of IoTin energy infrastructure: Lessons for the future of operations and maintenance. Comprehensive Research and Reviews in Science and Technology, 2(2), 28-54.

[9]Belessova, D., Ibashova, A., Bosova, L., & Shaimerdenova, G. (2023). Digital learning ecosystem: Current state, prospects, and hurdles. Open Education Studies, 5(1), 20220179.

[10] Prince, N. U., Al Mamun, M. A., Olajide, A. O., Khan, O. U., Akeem, A. B., & Sani, A. I. (2024). IEEE Standards and Deep Learning Techniques for Securing IoTDevices Against Cyber Attacks. Journal of Computational Analysis & Applications, 33(7).

[11] Subrahmanyam, V., Sagar, M., Balram, G., Ramana, J. V., Tejaswi, S., & Mohammad, H. P. (2024, May). An Efficient Reliable Data Communication For Unmanned Air Vehicles (UAV) Enabled Industry Internet of Things (IIoT). In 2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence For Internet of Things (AIIoT) (pp. 1-4). IEEE.

[12] Illakya, T., Keerthana, B., Murugan, K., Venkatesh, P., Manikandan, M., & Maran, K. (2024, April). The role of the internet of things in the telecom sector. In 2024 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT) (pp. 1-5). IEEE.

ҒТАХР 27.41.19

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.017

Ж.М. Бектемесов[1,*], А.Т. Турарбек[1], Ұ.Қ. Социалова[2], А.А. Нұрғали[1]

[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[2]Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[*]*e-mail: zholaman.bektemessov@kaznu.kz*

ӘЛЕУМЕТТІК ЖЕЛІЛЕРДЕГІ ФЕЙКТЕРДІҢ ТАРАЛУЫН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа

Бұл мақалада әлеуметтік желілерде жалған (фейк) ақпараттың таралу үдерісін сипаттайтын $SIHR$ математикалық моделі қарастырылады. Ақпарат таратуды уақытша тоқтатқан, бірақ есте сақтау механизмдерінің арқасында кейіннен белсенділікке оралуы мүмкін «ұйықтап жатқан» пайдаланушылар тобының бар болуы – зерттеудің айрықша ерекшелігі болып саналады. Динамикалық процестің есте сақтау параметрлері мен ақпаратты таратудан бас тарту коэффициентінің әсерін бағалау үшін бірқатар сандық тәжірибелер жүргізілді. Модельдің параметрлерінің әртүрлі мәндері үшін уақытқа байланысты топ тығыздығының графиктері құрылды. Нәтижесінде, жалған ақпаратпен күресудің ең тиімді жолы – ақпаратты таратудан бас тарту жылдамдығын арттыру. Сондай-ақ, өздігінен және мәжбүрлі түрде еске түсіру процестері желідегі қауесеттің қызмет ету мерзімін айтарлықтай ұзартатыны және өздігінен еске түсіру параметрі жүйенің соңғы күйін айқындайтыны анықталды.

Түйін сөздер: фейк ақпараттар, математикалық модель, эпидемия, $SIHR$ моделі.

Ж.М. Бектемесов[1], А.Т. Турарбек[1], У.К. Социалова[2] , А.А. Нургали[1]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан
[2]Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г.Алматы, Казахстан

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФЕЙКОВ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Аннотация

В статье рассматривается математическая модель $SIHR$, описывающая процесс распространения ложной (фейковой) информации в социальных сетях. Отличительной особенностью исследования является рассмотрение группы «спящих» пользователей, которые временно перестают делиться информацией, но благодаря механизмам памяти могут впоследствии снова стать активными. Была проведена серия численных экспериментов для оценки влияния параметров памяти и частоты сбоев на динамику процесса. Для различных параметров модели были построены графики зависимости плотности группы от времени. Результаты показывают, что наиболее эффективным способом борьбы с дезинформацией является увеличение скорости снижения скорости распространения. Также было обнаружено, что процессы спонтанного и принудительного воспоминания значительно продлевают срок жизни слуха в сети, а параметр спонтанного воспоминания определяет конечное состояние системы.

Ключевые слова: фейковые новости, математическая модель, эпидемия, модель $SIHR$.

Zh.M. Bektemessov[1], A.T. Turarbek[1], U.K. Sotsialova[2], A.A Nurgali[1]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

NUMERICAL SIMULATION OF FAKES SPREAD IN SOCIAL NETWORKS

Abstract

The article discusses the $SIHR$ mathematical model, which describes the process of spreading misinformation (fake) on social networks. A distinctive feature of the study is the consideration of a group of “hibernating” users who temporarily stop exchanging information but can subsequently resume activity thanks

to memory mechanisms. A series of numerical experiments was conducted to assess the impact of memory parameters and failure frequency on the dynamics of the process. For various model parameters, graphs of the dependence of group density on time were constructed. The results show that the most effective way to combat misinformation is to increase the dissemination failure rate. It was also found that the processes of spontaneous and forced information recovery significantly prolong the life of a rumor on the network, and the spontaneous recovery parameter determines the final state of the system.

Keywords: fake news, mathematical model, epidemic, SIHR model.

Кіріспе

Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы (ДДҰ) 2023 жылдың ортасында COVID-19 пандемиясының аяқталғанын жариялады, алайда оқу жылы басталар қарсаңында кезекті жаһандық індетті болжайтын жаңа вирус туралы жалған ақпараттар пайда болды. Интернет желісінде 2025 жылы шығып, үш жылдан астам уақытқа созылатын SPARS инфекциясы туралы жалған ақпараттар тарала бастады [1]. Ал оның алдында, пандемия кезінде вакцинаның орнына адамдарға чиптер енгізіліп жатқаны туралы жалған мәлімдемелер болды. Сол кезеңде, тек 2021 жылдың өзінде ғана жалған ақпараттың таралуы 1,5 млн-нан 9 млн-ға дейін артқан [2]. Еліміздегі жаңалықтар порталдарының бірінде тек «фейк» тегі бойынша шамамен 35 беттік ақпараттар жинақталған, олардың әрқайсысында қауесеттер мен жалған жаңалықтарға қатысты теріске шығарулар, пікірлер, мәлімдемелер, түсіндірмелер және цифрлық гигиена туралы 20 жаңалықтан бар [3].

«Фейк» (fake) сөзі ағылшын тілінен аударғанда, сын есім ретінде заттың жасандылығын, шындыққа жанаспайтындығын және сәйкессіздігін, яғни жалғандығын білдіреді. Ал фейк жаңалықтар – ойдан шығарылған жаңалық материалдары, жаңылтатын өтірік және қауесеттер [4]. Бүгінгі таңда осындай жаңалықтармен тек әлеуметтік желілер ғана емес, ресми БАҚ ақпараттық порталдарыда таратумен айналысады [5]. Қазіргі қоғамда, әсіресе жасанды интеллект, генеративті нейрондық желілер мен дипфейктертердің даму барысында, сенімсіз, жасанды және бұрмаланған ақпараттар – яғни фейк жаңалықтардың мәселесі айрықша өзекті болып, ғылыми және қоғамдық талқылаудың негізгі тақырыптарының біріне айналуда. Жалған және бұрмаланған ақпарат қоғамдық санаға теріс әсер етіп, қалыптасқан әлеуметтік қатынастарды, нормаларды, құндылықтарды және мәдени дәстүрлерді бұзып, пайда табу және/немесе жағдайды ушықтыру мақсатында дүрбелең мен тепе-теңдіксіздік тудыруы мүмкін.

«Fake news» термині 2016 жылы АҚШ президенттік сайлауына деген қызығушылық артқан кезде кеңінен таралғанымен [6], фейк жаңалықтардың (қауесеттердің) таралуын модельдеу бойынша зерттеулер 1960 жылдары басталған [7]. Қауесеттердің таралуы эпидемияның таралуына ұқсас болғандықтан, осы саладағы математикалық модельдердің көпшілігі эпидемиологиялық модельдерге негізделген [8-9]. Садбери [10] өз еңбегінде қауесеттердің таралу динамикасын SIR моделіне сәйкес келетінін алға тартты.

Зерттеу әдіснамасы

Фейк жаңалықтардың (қауесеттердің) таралуының динамикалық сипаты SIR эпидемиялық таралу моделі негізінде құрылады. Бүкіл халық үш топқа бөлініп қарастырылады: S, I, R. Мұнда S, I, R сәйкесінше фейк жаңалықтарды тарататын адамдарды (Таратушылар, инфекцияға бейім адамдарға ұқсас – Spreaders), фейк жаңалықтарды ешқашан естімегендерді (Хабарсыздар, инфекцияға бейім – Ignorants), және фейк жаңалықтарды естігенімен таратпайтындарды (Бәсеңдетушілер, аурудан сауыққандар – Stiflers) білдіреді. Фейктерді тарату ережелері келесідей: 1. Таратушы білместікке бейім адаммен байланысқанда, ол адам белгілі бір ықтималдықпен таратушыға айналады. 2. Таратушы басқа таратушымен немесе бәсеңдетушімен байланысқанда, бастапқы таратушы белгілі бір ықтималдықпен бәсеңдетушіге айналады. Адамдардың фейкті белгілі бір ықтималдықпен қабылдауға бейімділігі жалған ақпараттың маңыздылығы мен сенімділігіне байланысты. Екінші жағынан,

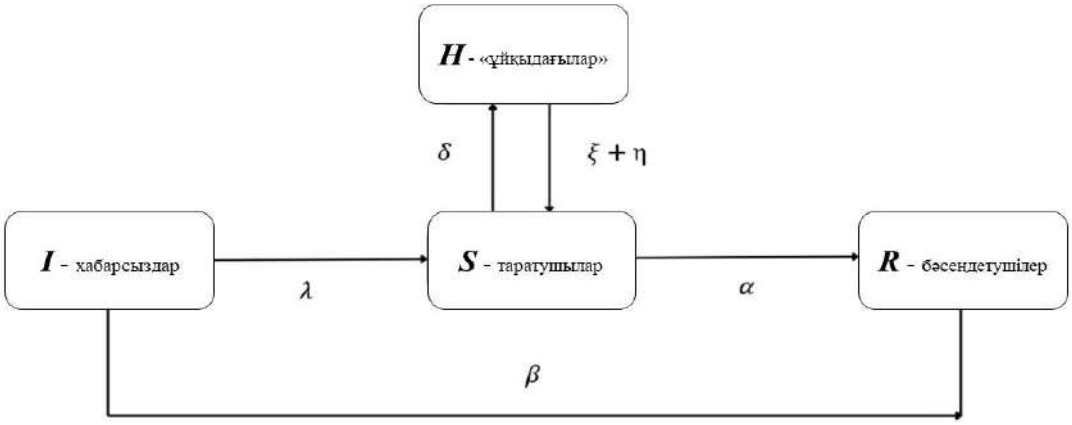
адамдар жалған ақпараттың мерзімі өткен немесе шындыққа жанаспайтынын білгенде оны әрі қарай таратпайды. Сонымен қатар, фейкті таратушылар ұмыту механизмін ескере отырып, белгілі бір қарқынмен өздігінен таратуды тоқтатуы мүмкін [11]. Таралу процесі бір немесе бірнеше адам жалған жаңалықты білген кезде басталып, халық арасында таратушылар қалмаған кезде аяқталады.

Осылайша, фейктердің таралуының классикалық SIR моделі келесідей кеңейтілді:

1) хабарсыз адамның таратушымен байланысқан жағдайда және хабарсыз адам белгілі бір ықтималдықпен тікелей бәсеңдетушіге айналу жағдайын ескеру арқылы;

2) ұмыту механизмі арқылы таратушылар тобынан шығып, кейін есте сақтау механизмі арқылы қайтадан таратушыларға айналатын «ұйқыдағылар» (H – Hibernators) деп аталатын қосымша топты енгізу арқылы.

Қауесеттердің таралуының сипаттамалық ерекшелігіне жалпыламалық, қайталанушылық және өзгергіштік тән. «Ұйқыдағылар» деп аталатын жаңа топ фейктердің таралуының қайталанушылығын көрсетеді (Сурет 1).



Сурет 1. Фейктің таралу моделінің SIHR схемасы.

$N(t)$ дарадан тұратын тұйық және біртекті араласқан популяцияны әлеуметтік желі ретінде қарастырайық. Шын мәнінде, әрбір адамның тікелей байланысқа түсетін адамдар саны іс жүзінде бірдей және шамамен Пуассон үлестіріміне бағынатынын атап өткен жөн. Осы болжам негізінде біртекті желіде келесі элементтер қарастырылады: $I(t)$, $S(t)$, $H(t)$ және $R(t)$ сәйкесінше t уақыт мезетіндегі хабарсыздар, таратушылар, «ұйқыдағылар» және бәсеңдетушілерден тұратын популяцияның тығыздығын білдіреді. Олар нормалау шартын қанағаттандырады:

$$1 = I(t) + S(t) + H(t) + R(t) \tag{1}$$

Фейктердің таралу динамикасының моделі келесі қарапайым дифференциалдық теңдеулер жүйесімен сипатталады:

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = -(\lambda + \beta)\bar{k}I(t)S(t), \\ \frac{dS(t)}{dt} = \lambda\bar{k}I(t)S(t) - \alpha\bar{k}S(t)\big(S(t) + H(t) + R(t)\big) - \delta S(t) + \xi H(t) + \eta\bar{k}H(t)S(t), \\ \frac{dH(t)}{dt} = \delta S(t) - \xi H(t) - \eta\bar{k}H(t)S(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} = \beta\bar{k}I(t)S(t) + \alpha\bar{k}S(t)\big(S(t) + H(t) + R(t)\big). \end{cases} \tag{2}$$

Мұндағы $\bar{k}$ – түзету коэффициенті, ол түйіннің орташа дәрежесін, яғни желідегі әрбір қатысушының байланыстарының орташа санын көрсетеді. Фейктер тарала бастаған сәтте тек бір ғана таратушы болады деп ұйғарылады. Фейктердің таралуының бастапқы шарты келесідей беріледі:

$$I(0) = \frac{N-1}{N}, \qquad S(0) = \frac{1}{N}, \qquad H(0) = 0, \qquad R(0) = 0. \tag{3}$$

Бұл қарапайым бастапқы модель (2) келесідей өзара байланысты құрамдас бөліктерді қамтиды:

- *Таратушылар $S(t)$ – фейктерді тарататын адамдар;*
- *Хабарсыздар $I(t)$ – фейктер туралы ешқашан естімеген адамдар;*
- *«Үйқыдағылар» $H(t)$ – фейктерді естіген, бірақ оларды таратуы да, таратпауы да мүмкін адамдар;*
- *Бәсеңдетушілер $R(t)$ – фейктерді естіген, бірақ оларды таратпайтын адамдар.*

SIHR моделінің параметрлерінің мәні мен сипаттамасы 1 кестеде келтірілді.

Кесте 1. SIHR моделінің параметрлерінің мәні мен сипаттамасы

Параметрлер	*Сипаттамасы*	*Мәні*	*Ескерту*
$N(t)$	*Желі қолданушыларының популяциясы*	10^6	
λ	*Фейктің таралу жылдамдығы*	$0.2 - 0.8$	*Жоғары мәндер фейк жылдам тарайтын жағдайларға сәйкес келеді. Төмен мәндер – сирек байланыстар немесе «жұғымдылығы» төмен фейктер үшін.*
β	*Таратудан бас тарту жылдамдығы*	$0.1 - 0.5$	*Бұл мән қатысушылардың қызығушылығын жоғалту немесе фейкті ескірген деп санау жылдамдығын бағалау негізінде таңдалады.*
α	*Бәсеңдету жылдамдығы*	$0.1 - 0.7$	*Параметрдің жоғары мәндері басқа таратушымен немесе бәсеңдетушімен байланыс кезінде фейктің таралуының жылдам тоқтауын көрсетеді.*
δ	*Ұмыту жылдамдығы*	$0.1 - 0.6$	*Жоғары мән фейкке деген қызығушылық жылдам жоғалатын, мысалы, жаңалықтың өзектілігі тез жойылатын жағдайларға тән.*
ξ	*Кенеттен еске түсіру жылдамдығы*	$0 - 0.2$	*Егер адамдар фейкті байланыссыз-ақ кенеттен «еске түсіруі» мүмкін немесе бұл сирек құбылыс деп болжанса, әдетте төмен мән немесе нөл алынады.*
η	*«Ояну» жылдамдығы*	$0.2 - 0.8$	*Жоғары мәндер «ұйқыдағы» қатысушылардың таратушымен байланыс кезінде белсенді таратуға оңай қайта оралатынын білдіреді.*
$\bar{k}$	*Түйіннің орташа дәрежесі*	$5 - 15$	*Параметрдің мәні желінің тығыздығына байланысты таңдалады.*

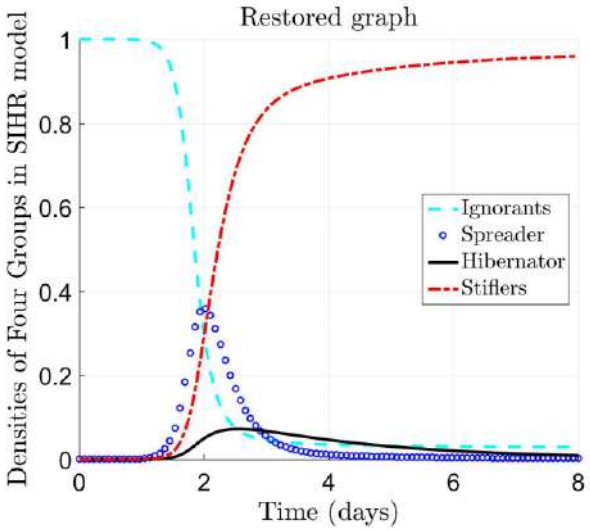
1-кестеде әлеуметтік желілердегі фейктердің таралу динамикасын модельдейтін дифференциалдық теңдеулер жүйесіне қатысатын барлық параметрлер көрсетілген.

λ – фейктердің таралу жылдамдығы, яғни хабарсыз адамның $(I(t))$ қауесет таратушымен байланысқанда фейк таратушыға $(S(t))$ айналу ықтималдығы, ал β параметрі хабарсыз адамның фейк таратудан бас тартып, бәсеңдетушіге $(R(t))$ айналу ықтималдығына жауап береді. δ параметрі фейк таратушының $(S(t))$) «ұйқыдағы» күйге $(H(t))$ ауысу жылдамдығын білдіреді, яғни бұл жағдайда адам фейкті ұмытып, оны таратпайды. ξ параметрі фейктердің өздігінен қайта жаңғыруына және «ұйқыдағылардың» $(H(t))$ ешқандай байланыссыз-ақ қайтадан таратушыларға айналуына жауап береді, ал η параметрі – «ұйқыдағылардың» таратушымен байланысқан кезде «оянып», фейкті қайтадан тарату ықтималдығы. α – таратушының фейк таратуды тоқтатып, бәсеңдетушілер $(R(t))$ тобына өту ықтималдығы.

Зерттеу нәтижелері

$SIHR$ моделінің динамикасын бағалау үшін бірқатар сандық эксперименттер жүргізілді. (2) жүйесін интегралдау үшін MATLAB бағдарламалық ортасында іске асырылған дәлдігі төртінші ретті Рунге-Кутта алгоритмі қолданылды. Модельдеу $N = 10^6$ түйіннен тұратын популяцияда жүргізілді. Бастапқы сценарий ретінде вирустық контенттің жылдам таралуын сипаттайтын параметрлер таңдалды: таралу қарқындылығы $\lambda = 0.8$ және байланыстардың орташа жиілігі $\bar{k} = 10$.

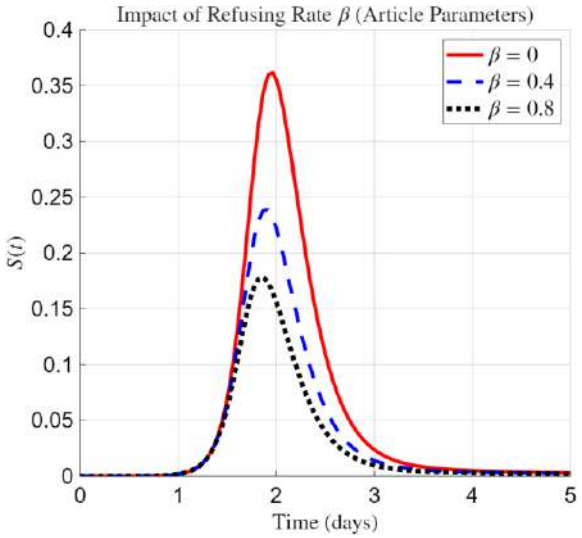
Сурет 2-де агенттердің төрт тобының уақыт бойынша тығыздығының өзгеруінің жалпы динамикасы көрсетілген. График ақпараттық процестің классикалық сценарийін сипаттайды: бастапқы кезеңде хабарсыздар (I) үлесінің жылдам төмендеуімен қатар жүретін таратушылар (S) санының күрт, қарқынды өсуі байқалады. Хабарсыздар ресурсы таусылған сайын таратушылар қисығы шыңына жетеді, содан кейін ақпараттық эпидемияның белсенді фазасының аяқталғанын білдіретін құлдырау кезеңіне өтеді. Бәсеңдетушілер тобы (R) біртіндеп тұрақты күйге жетіп, орнықты, монотонды өсім көрсетеді. «Ұйқыдағы» топтың (H) динамикасы ерекше назар аударуға тұрарлық: оның траекториясы таратушылар қисығының формасын сапалы түрде қайталайды (өсімнен кейінгі төмендеу), бірақ ұмыту процесінің баяу динамикасын сипаттай отырып, едәуір төмен жылдамдықпен және бірқалыпты өзгереді.



Сурет 2. $\lambda = 0.8, \beta = 0.2, \alpha = 0.3, \delta = 0.6, \xi = \eta = 0.5$ *мәніндегі ақпараттан хабарсыздар, таратушылар, ұйқыдағылар және бәсеңдетушілер тығыздының уақыттық динамикасы.*

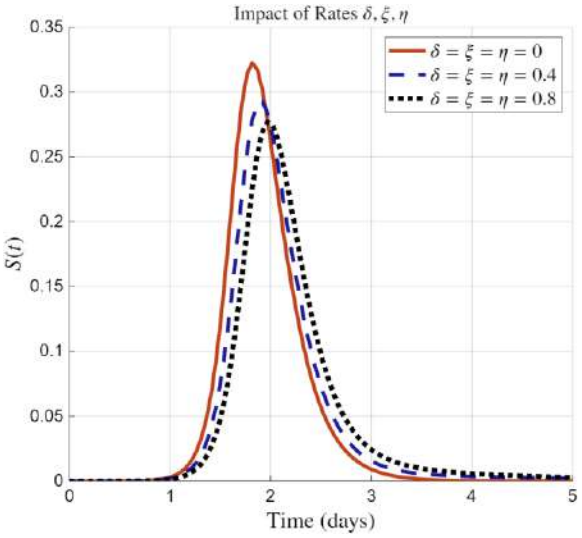
Одан әрі зерттеуде іс-әрекеттік факторларының әсеріне, атап айтқанда ақпаратты таратудан бас тарту коэффициенті – β параметріне назар аударылды (Сурет 3). Сценарийлерде $\beta = 0$ кезінде ақпаратты таратуға қарсылықтың болмауы және $\beta = 0{,}4$ пен 0,8 мәндерінде қауесеттерді таратудан белсенді бас тарту жағдайлары модельденді.

Алынған қисықтарды талдау – β мәні мен ақпараттың таралу ауқымы арасында кері тәуелділік бар екенін көрсетті: бас тарту коэффициентінің жоғарылауы $S(t)$ функциясының максималды мәнінің төмендеуіне және эпидемиялық процестің ұзақтығының қысқаруына әкеледі. Бұл егер қатысушылар жалған ақпаратқа деген қызығушылығын тезірек жоғалтса немесе онымен алғаш кездескен кезде-ақ ескірген деп санаса, вирустық таралу тиімді түрде тежеледі деген гипотезаны растайды.



Сурет 3. Ақпаратты таратудан бас тарту β жылдамдығының әртүрлі мәндеріндегі $S(t)$таратушылар тығыздығының динамикасы, мұндағы $\lambda = 0.8, \alpha = \delta = \xi = \eta = 0.5$.

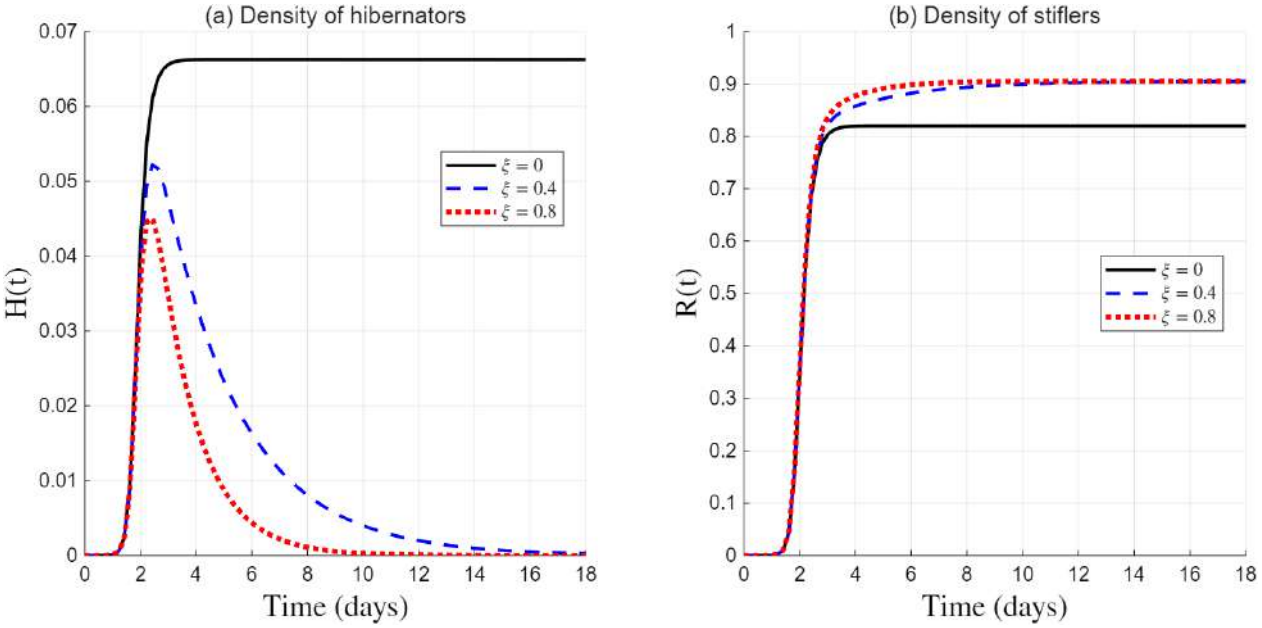
Сурет 4-те ұмыту жылдамдығы δ, кенеттен еске түсіру жылдамдығы ξ және байланыс арқылы еске түсіру жылдамдығы η сияқты жады параметрлеріне тәуелді таратушылар тығыздығының уақыт бойынша өзгеруі көрсетілген. Қызыл тұтас сызық жады механизмдері ескерілмейтін және барлық параметрлер нөлге тең болатын негізгі сценарийді білдіреді. Көк үзік сызық пен қара нүктелі сызық барлық үш параметр сәйкесінше 0,4 және 0,8 мәндеріне белгіленген сценарийлерге сәйкес келеді, бұл 40% және 80% қарқындылықты білдіреді.



Сурет 4. $\lambda = 0.8, \beta = 0.2, \alpha = 0.5$ тұрақты болған жағдайда таратушылар тығыздығының δ, ξ және η жады параметрлеріне тәуелділігі.

График көрсеткендей, ұмыту және есте сақтау әсерлерінің күшеюі аудиторияны максималды қамту деңгейін төмендеткенімен, таратушылардың толық жойылуына қажетті уақытты айтарлықтай ұзартады. Ұмыту жылдамдығы δ жоғары болғанда, белсенді қолданушылардың айтарлықтай бөлігі «ұйқыдағылар» санатына өтеді, бұл эпидемия шыңының төмендеуіне алып келеді. Дегенмен, «ұйқыдағы» қолданушылар ξ және η еске түсіру механизмдері арқылы белсенді күйге қайта орала алатындықтан, бұл процестердің жиынтық әсері фейктің түпкілікті жойылу уақытын кешіктіреді.

Сурет 5-те «ұйқыдағылар» және «бәсеңдетушілер» топтарының тығыздығының ξ параметріне тәуелді өзгеруі сипатталған.



Сурет 5. $\lambda = 0.8, \beta = 0.2, \alpha = \delta = \eta = 0.5$ *кезіндегі өздігінен еске түсіру* ξ *жылдамдығының әр түрлі мәндеріндегі «ұйқыдағылар» (a) және «бәсеңдетушілер» (b) топтары тығыздығының уақыттық динамикасы*

5(a)-суретте «ұйқыдағылар» тобының динамикасы көрсетілген. Кенеттен қалпына келу жиілігі нөлге тең болмайтын сценарийлер 0,4 және 0,8 мәндері үшін сәйкесінше көк үзік және қызыл нүктелі сызықтармен бейнеленген. Кенеттен еске түсіру жиілігінің артуы «ұйқыдағы» агенттердің ең жоғарғы (пиктік) санының азаюына әкеледі және олардың нөлге дейін төмендеуін тездетендігін графиктен көруге болады. Керісінше, қара тұтас сызықпен көрсетілген $\xi = 0$ жағдайында «ұйқыдағылар» тобының тығыздығы жүйеден жойылмай, тұрақты оң мәнге дейін монотонды түрде өседі.

5(b)-суретте осы фактордың «бәсеңдетушілер» тобына әсері көрсетілген. Түрлі-түсті сызықтармен берілген $\xi > 0$ жағдайлары үшін қалпына келу жылдамдығының жоғары болуы жүйені тепе-теңдікке тезірек алып келеді. Дегенмен, қара үзік сызықпен көрсетілген $\xi = 0$ жағдайында «бәсеңдетушілер» тобының соңғы өлшемі едәуір аз болады. Бұл «бәсеңдетуші» бола алатын популяцияның бір бөлігінің «ұйқыдағы» күйде бұғатталып қалуымен байланысты.

Тұрақты күйде «ұйқыдағы» индивидтердің қалдық тобының болуы немесе болмауы η емес, толығымен ξ параметрімен анықталады. Бұл қайта оралу механизмдеріндегі іргелі айырмашылықпен түсіндіріледі. Себебі ξ ықтималдығымен жүзеге асатын кенеттен қайта оралу шартсыз процесс болып табылады, сондықтан «ұйқыдағы» индивидтердің таратушылар тобына қайта оралуына уақыт өте келе кепілдік беріледі. Керісінше, η ықтималдығымен жүретін «ояту» арқылы қайта белсендіру міндетті түрде белсенді таратушымен байланысты

талап етеді. Демек, эпидемия басылып, таратушылар қалмаған кезде бұл әдіс жұмыс істемейді. Сондықтан, егер $\xi = 0$ кезінде тәуелсіз қайта оралу мүмкін болмаса, таратушылар жойылғаннан кейін «ұйқыдағы» индивидтер талқылауға қайта оралу мүмкіндігінен айырылады.

Дискуссия

Жоғарыда сипатталған фейктердің таралу механизмінің өзіндік кемшіліктері бар. Мысалы, хабарсыз адам таратушымен байланысқан кезде, ол хабарсыз күйде қалуы немесе фейкті қабылдап, өзі де таратушыға айналуы мүмкін. Алайда бұл болжам хабарсыз адамның тікелей бәсеңдетушіге айналу мүмкіндігін ескермейді. Бұл мүмкіндік кейбір хабарсыз адамдардың жеткілікті базалық білімге, екіншілерінің логикалық ойлау дағдыларына ие болуымен, ал үшіншілерінің фейктерге жай ғана қызығушылық танытпауымен байланысты.

Жапониядағы атом электр станциясында апат болды деген фейк тараған кездегі Қытайдағы жағдайды қарастырайық. Ақпарат теңіз суы мен теңіз тұзын ластауы мүмкін радиоактивті заттардың таралуы және йодталған тұздың ядролық радиациядан қорғайтыны туралы болды. Бұл фейк тез таралып, Қытайда дүрбелең мен әлеуметтік толқулар туғызды және тұз бағасының он есе өсуіне алып келді. Егер барлығы йодталған тұздың теңізден емес, минералдардан алынатынын білгенде, олар бұл фейкке сенбес еді және оны таратпас еді.

Жоғарыда сипатталған фейктердің таралу механизмінің тағы бір кемшілігі – кейбір зерттеушілер ұмыту механизмін ескергенімен, есте сақтау механизмін назардан тыс қалдырады. Адамдар фейктерді ұмыту арқылы таратуды тоқтатуы мүмкін, сондай-ақ кенеттен немесе қандай да бір стимулға жауап ретінде еске түсіріп, оларды қайтадан тарата бастауы мүмкін.

Қорытынды

Бұл мақалада классикалық SIR схемасына негізделген дезинформация таралуының кеңейтілген моделі қарастырылды. Қарастырылып отырған модель ұмыту және есте сақтау механизмдерін, сондай-ақ хабарсыздар мен жалған ақпаратты бәсеңдетушілер арасындағы тікелей байланыстарды қамтиды. Зерттеу аясында осы әлеуметтік процестерді шынайырақ бейнелеуге мүмкіндік беретін $SIHR$ моделі қолданылады.

Сандық модельдеу жаңадан енгізілген факторлардың негізінен процестің сипатына, яғни таратушылардың пиктік белсенділігіне және қауесеттің сөну уақытына әсер ететінін, ал соңғы аудиторияны қамту деңгейін іс жүзінде өзгертпейтінін көрсетті. Атап айтқанда, жады механизмдері таратушылардың максималды санын азайтады, бірақ процестің аяқталуын кешіктіреді, ал тікелей бас тарту пиктік белсенділікті тиімді түрде төмендетеді.

Жады параметрлерін талдау жұмыстың негізгі нәтижесі болды. Жүйенің орнықты күйінде «ұйқыдағы» агенттердің болуы мәжбүрлі еске түсіру жылдамдығымен (η) емес, толығымен кенеттен еске түсіру параметрімен (ξ) анықталатыны көрсетілді. $\xi = 0$ болғанда, жасырын агенттер жүйеде қалады, ал $\xi > 0$ болғанда, олардың саны уақыт өте келе нөлге ұмтылады. Қауесет мазмұнының өзгергіштігі мен бұрмалануының осы модель параметрлерінің мәндеріне әсерін талдау – келесі зерттеулердің перспективалы бағыты болып табылады.

Алғыс

Зерттеу Қазақстан Республикасы ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің гранттық жобасының қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды (грант № AP26197729).

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1] Самые популярные фейковые новости, в которые казахи поверили в 2023 году // Информационно-аналитический портал Orda.kz. – 2023. – URL: https://orda.kz/populjarnye-fejki-2023-goda-v-kotorye-poverili-kazahstancy-380941/

[2] ТАСС. Количество фейковых новостей в интернете в 2022 году увеличилось в шесть раз // ТАСС: информационное агентство. – 2023. – URL: https://tass.ru/obschestvo/16642301

[3] Tengrinews.kz. "жалған" деп белгіленген материалдар // Tengrinews.kz: жаңалықтар порталы. – URL: https://tengrinews.kz/tag/фейк/

[4] Распопова С.С., Богдан Е.Н. Фейковые новости: их природа и происхождение // Вестник Челябинского государственного университета. – 2017. – № 11 (407). – С. 48-53. DOI:10.47475/1999-5407-2023-64-3-79-84

[5] BBC Russian Service. Как распознать фейковые новости // BBC Russian Service. – URL: https://www.bbc.com/russian/articles/c4gw304ejngo

[6] Фионина А. С. (2023). Определение, источники и классификация термина «искусственные новости». Огарев-Онлайн, № 6 (191). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-istochniki-i-klassifikatsiya-termina-fake-news

[7] Zhao L., Wang J., Chen Y., Wang C., Cheng J., Cui H. SIHR rumor spreading model in social networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2012. – Т. 391, № 7. – С. 2444-2453. DOI:10.1016/j.physa.2011.12.008

[8] Hethcote H.W. The mathematics of infectious diseases // SIAM Review. – 2000. Т. 42. – С. 599-653. DOI: 10.1137/S0036144500371907

[9] Daley D.J., Kendall D.G Epidemics and rumours // Nature. – 1964. – Т. 204. – С. 11-18. DOI:10.1038/2041118a0

[10] Sudbury A. The proportion of population never hearing a rumour // Journal of Applied Probability. – 1985. – Т. 22. – С. 443-446. DOI:10.2307/3213787

[11] Nekovee M., Moreno Y., Bianconi G., Marsili M. Theory of rumour spreading in complex social networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2007. – Т. 374. – С. 457-470. DOI:10.1016/j.physa.2006.07.017

References

[1] Samye populjarnye fejkovye novosti, v kotorye kazahi poverili v 2023 godu // Informacionno-analiticheskij portal Orda.kz. – 2023. URL: https://orda.kz/populjarnye-fejki-2023-goda-v-kotorye-poverili-kazahstancy-380941/ (In Russian)

[2] TASS. Kolichestvo fejkovyh novostej v internete v 2022 godu uvelichilos' v shest' raz // TASS: informacionnoe agentstvo. – 2023. URL: https://tass.ru/obschestvo/16642301 (In Russian)

[3] Tengrinews.kz. "Zhalghan" dep belgilengen materialdar // Tengrinews.kz: zhanalyktar portaly. URL: https://tengrinews.kz/tag/fejk/ (In Kazakh)

[4] Raspopova S.S., Bogdan E.N. (2017) Fejkovye novosti: ih priroda i proishozhdenie // Vestnik Cheljabinskogo gosudarstvennogo universiteta. –№ 11 (407). P. 48-53. (In Russian) DOI:10.47475/1999-5407-2023-64-3-79-84

[5] BBC Russian Service. Kak raspoznat' fejkovye novosti // BBC Russian Service. – URL: https://www.bbc.com/russian/articles/c4gw304ejngo (In Russian)

[6] Fionina A. S. (2023) Opredelenie, istochniki i klassifikacija termina «iskusstvennye novosti». Ogarev-Onlajn, № 6 (191). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-istochniki-i-klassifikatsiya-termina-fake-news (In Russian)

[7] Zhao L., Wang J., Chen Y., Wang C., Cheng J., Cui H. (2012) SIHR rumor spreading model in social networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. V. 391, № 7. P. 2444-2453. DOI:10.1016/j.physa.2011.12.008

[8] Hethcote H.W. (2000) The mathematics of infectious diseases // SIAM Review. V. 42. P. 599-653. DOI: 10.1137/S0036144500371907

[9] Daley D.J., Kendall D.G. (1964) Epidemics and rumours // Nature. V. 204. P. 11-18. DOI:10.1038/2041118a0

[10] Sudbury A. (1985) The proportion of population never hearing a rumour // Journal of Applied Probability. V. 22. P. 443-446. DOI:10.2307/3213787

[11] Nekovee M., Moreno Y., Bianconi G., Marsili M. (2007) Theory of rumour spreading in complex social networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. V. 374. P. 457-470. DOI:10.1016/j.physa.2006.07.017

ҒТАХР 81.93.29

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.018

Н.А. Капалова[1], Н.С.Ергеш[2*]

[1]ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы қ., Қазақстан
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[*]e-mail: yergesh.nursultan@almatyedu.kz

ҚОРҒАЛҒАН АУТЕНТИФИКАЦИЯ СХЕМАЛАРЫ: ӘДІСТЕРІ ЖӘНЕ ҚАУІПСІЗДІК ТАЛДАУЫ

Аңдатпа

Бұл мақалада ақпараттық жүйелердегі қорғалған аутентификация схемаларының негізгі әдістері жүйелендіріліп, олардың қауіпсіздік қасиеттері теориялық және қолданбалы тұрғыдан талданады. Зерттеудің мақсаты - құпиясөзге негізделген, көпфакторлы және парольсіз аутентификация тәсілдерінің қауіп-қатер моделін айқындап, қарсыластың мүмкіндіктерін ескере отырып салыстырмалы бағалау жүргізу. Талдау барысында шабуыл векторлары (онлайн және офлайн іріктеу, тіркелгі деректерін қайта қолдану, фишинг, сеансты басып алу) жіктеліп, бұзылу ықтималдығын бағалауға арналған ықтималдықтық модельдер және факторларды біріктірудің композициялық қағидалары қарастырылады. Құпиясөздік схемалар үшін табыстылық ықтималдығы құпиясөз кеңістігінің тиімді көлеміне, тексеру құнына және әрекет санын шектеу механизмдеріне тәуелді екені көрсетіледі. Көпфакторлы аутентификацияда қауіпсіздіктің артуы факторлардың тәуелсіздігі жағдайында жалпы бұзылу ықтималдығының көбейтінді түрінде төмендеуімен негізделеді. Парольсіз схемаларда ашық кілтке негізделген шақыру-жауап (challenge–response) протоколдары фишингке төзімділікті күшейтіп, тіркелгі деректерін қайта қолдану тәуекелін азайтатыны сипатталады. Нәтижесінде тәуекел деңгейіне сәйкес аутентификаторларды таңдау, әрекеттерді шектеу, құрылғыға байлау және контекстік тәуекелді бағалау бойынша практикалық ұсынымдар беріледі. Ұсынылған қорытындылар қауіпсіздігі күшейтілген аутентификация шешімдерін жобалау және эксперименттік тексеру үшін әдістемелік негіз қалыптастырады.

Түйін сөздер: аутентификация; қорғалған аутентификация; көпфакторлы аутентификация; парольсіз аутентификация; қауіп-қатер моделі; ықтималдықтық талдау; фишингке төзімділік; шақыру-жауап протоколы.

Н.А. Капалова[1], Н.С. Ергеш [2]
[1]Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК, г.Алматы, Казахстан
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

ЗАЩИЩЁННЫЕ СХЕМЫ АУТЕНТИФИКАЦИИ: МЕТОДЫ И АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ

Аннотация

В статье систематизированы основные методы построения защищённых схем аутентификации в информационных системах и выполнен теоретико-прикладной анализ их свойств безопасности. Цель исследования заключается в определении модели угроз и сравнительной оценке парольной, многофакторной и безпарольной аутентификации с учётом возможностей противника. В рамках анализа классифицируются ключевые векторы атак (онлайн и офлайн перебор, повторное использование учётных данных, фишинг, захват сеанса), рассматриваются вероятностные модели оценки успешности компрометации и композиционные принципы объединения факторов. Для парольных схем показано, что вероятность успешной атаки определяется эффективным размером пространства паролей, вычислительной стоимостью проверки гипотез и механизмами ограничения числа попыток. Для многофакторной аутентификации рост устойчивости обосновывается мультипликативным снижением вероятности компрометации при независимости факторов. Для безпарольных подходов описываются публично-ключевые протоколы типа «вызов–ответ» (challenge–response), повышающие устойчивость к фишингу и уменьшающие риск повторного использования учётных данных. В результате сформулированы практические рекомендации по выбору

аутентификаторов в зависимости от уровня риска, ограничению попыток входа, привязке к устройству и контекстной оценке риска. Полученные выводы могут служить методологической основой для проектирования и экспериментальной проверки усиленных решений аутентификации.

Ключевые слова: аутентификация; защищённая аутентификация; многофакторная аутентификация; безпарольная аутентификация; модель угроз; вероятностный анализ; устойчивость к фишингу; протокол вызов–ответ.

N.A. Kapalova[1], N.S. Yergesh[2]
[1]Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

SECURE AUTHENTICATION SCHEMES: METHODS AND SECURITY ANALYSIS

Abstract

This paper systematizes key methods for designing secure authentication schemes in information systems and provides a combined theoretical and practical analysis of their security properties. The study aims to define a unified threat model and to comparatively evaluate password-based, multi-factor, and passwordless authentication approaches under realistic adversary capabilities. The analysis classifies major attack vectors (online and offline guessing, credential reuse, phishing, and session takeover) and considers probabilistic models for estimating compromise success as well as compositional principles for combining factors. For password-based schemes, we show that attack success probability depends on the effective password search space, the computational cost of verifying guesses, and attempt-limiting controls. For multi-factor authentication, improved robustness is explained by a multiplicative decrease in compromise probability under factor independence. For passwordless approaches, we describe public-key challenge–response protocols that increase phishing resistance and reduce credential reuse risks. Finally, we provide practical recommendations on selecting authenticators by risk level, enforcing strict attempt limiting, enabling device binding, and applying context-aware risk assessment. The presented results can serve as a methodological basis for designing and experimentally validating strengthened authentication solutions.

Keywords: authentication; secure authentication; multi-factor authentication; passwordless authentication; threat model; probabilistic analysis; phishing resistance; challenge–response protocol.

Кіріспе

Қазіргі ақпараттық жүйелерде - бұлттық сервистерде, электрондық қызметтерде, корпоративтік порталдар мен білім беру платформаларында - қол жеткізуді басқарудың негізгі буыны аутентификация механизмі болып табылады. Аутентификация пайдаланушының заңды екендігін растауға арналған. Егер бұл механизм әлсіз болса, авторизация, аудит және бақылау құралдары өз тиімділігін жоғалтады. Себебі қауіп көбінесе «кім кірді?» деген бастапқы кезеңде-ақ іске асады. Сондықтан халықаралық стандарттарда аутентификацияны тәуекелге сай деңгейлеу, аутентификатор сенімділігі және протоколдың фишингке төзімділік қасиеті жеке талап ретінде қарастырылады [1-3].

Тәжірибеде ең кең тараған тәсіл – құпиясөзге негізделген бір факторлы схема. Бұл тәсіл қолдануға ыңғайлы болғанымен, қазіргі қауіп-қатер ортасында елеулі шектеулерге ие. Пайдаланушылардың құпиясөзді бірнеше сервисте қайталап қолдануы және әлсіз комбинацияларды таңдауы тіркелгі деректерін толтыру (credential stuffing), құпиясөзді жаппай сынау (password spraying) және офлайн іріктеу (brute-force) шабуылдарының сәтті болу ықтималдығын арттырады [4-5]. Фишинг пен әлеуметтік инженерия техникалық қорғаныс жоқ болған жағдайда бірнеше қорғаныс қабатын бір уақытта айналып өтуге қабілетті. Сонымен қатар, дерекқор бұзылған кезде хэш-қорғаныс дұрыс таңдалмаса, шабуылдаушының офлайн есептеу ресурстары қауіпті практикалық деңгейге көтереді [5]. Осыған байланысты «қорғалған аутентификация» ұғымы тек құпиясөз саясатын ғана емес, көпқабатты және дәлелденетін қауіпсіздік қасиеттері бар схемаларды таңдауды талап етеді.

Осы шолу мақаланың мақсаты - қорғалған аутентификация схемаларының қазіргі әдістерін жүйелеп, олардың қауіпсіздігін қауіп-қатер моделі тұрғысынан талдау.

Міндеттері:

1) құпиясөзді күшейту тәсілдерін (хэштеу, есептеу құнын арттыру, әрекетті шектеу) жинақтау;

2) көпфакторлы аутентификацияның (бір реттік кодтар, аппараттық токендер, биометрия) қауіпсіздік артықшылықтарын және тәуелсіздік шарттарының рөлін түсіндіру;

3) ашық кілтке негізделген парольсіз шақыру–жауап (challenge–response) протоколдарының фишингке төзімділік қасиеттерін сипаттау;

4) қауіпсіздік–қолданушылық компромисін ескере отырып, тәуекел деңгейіне сәйкес практикалық ұсынымдар ұсыну [1-2], [6-7].

Зерттеу әдістемесі ретінде бірнеше бағыттағы материалдар жүйелі талданады: халықаралық стандарттар мен нұсқаулықтардың талаптары (аутентификация сенімділігі деңгейлері, фишингке төзімділік), қолданбалы қауіпсіздік ұйымдарының ұсынымдары (онлайн шабуылдарға қарсы бақылаулар), сондай-ақ веб-аутентификацияның салалық стандарттары (WebAuthn, FIDO тәрізді) [1-7]. Мақаланың келесі бөлімдерінде алдымен қауіп-қатер моделі мен бағалау қағидалары беріледі. Одан кейін құпиясөзге негізделген тәсілдер, көпфакторлы схемалар және парольсіз протоколдар салыстырылады. Соңында қорытынды ұсынымдар жасалады [8].

Зерттеу әдіснамасы

Зерттеу жұмысы жүйелендіруші шолу (structured narrative review) ретінде орындалды. Аутентификация схемаларының қазіргі әдістері (құпиясөзге негізделген, көпфакторлы, парольсіз) ортақ қауіп-қатер моделі шеңберінде бірдей критерийлермен сипатталып, салыстырмалы синтез жүргізілді. Зерттеу келесі кезеңдерден тұрады:

1-кезең. Дереккөздерді іріктеу: нормативтік құжаттар (NIST SP 800-63B-4), протоколдық стандарттар (RFC 9106, RFC 6238), индустриялық нұсқаулықтар (OWASP) және ғылыми еңбектер жиналып, сәйкестік, сенімділік және техникалық мазмұн критерийлері бойынша іріктелді.

2-кезең. Формальдандыру: әр аутентификация механизмі «қолданылатын аутентификаторлар» және «верификация протоколы» тұрғысынан сипатталып, $\Pi=\langle \text{Enroll}, \text{Auth}, \text{Verify}, \text{Recover} \rangle$ төрттігімен модельденді.

3-кезең. Қауіп-қатерлерге сәйкестендіру: әр схема A1 (онлайн болжау), A2 (офлайн бұзу), A3 (тіркелгі деректерін толтыру), A4 (фишинг/прокси-фишинг) шабуыл кластарымен салыстырылып бағаланды.

4-кезең. Салыстырмалы синтез: қауіпсіздік, қолданушылық және енгізу күрделілігі өлшемдері бойынша интеграл баға есептелді және матрица/диаграмма түрінде берілді. Мұндай нормаланған сипаттау тәсілі аутентификация талаптарын тәуекелге негіздеп қоюға мүмкіндік береді [1-3].

Зерттеу сұрақтары (RQ):

RQ1. Қазіргі қорғалған аутентификацияда негізгі техникалық бағыттар қандай және олар қандай қауіп-қатерлерді жабады? [1-2]

RQ2. Құпиясөзді сақтау/тексеру (KDF, memory-hard функциялар) параметрлері офлайн шабуылға төзімділікке қалай әсер етеді? [7-8]

RQ3. OTP және MFA тәсілдерінің фишингке төзімділік шекарасы қандай және passwordless (WebAuthn/FIDO) шешімдері оны қалай өзгертеді? [2], [9-12], [13]

Шолуда дереккөздер төрт деңгейге бөлініп қаралады:

- нормативтік/ұсыным құжаттар (Digital Identity Guidelines, assurance деңгейлері) [1-3];
- протоколдық стандарттар (IETF RFC: PBKDF2, Argon2, HOTP/TOTP) [7-10];
- веб-қолданба қауіпсіздігі бойынша индустриялық нұсқаулықтар (OWASP cheat sheet-тері) [4-6];
- салыстырмалы бағалау қаңқаларын ұсынатын ғылыми еңбектер (қауіпсіздік-қолданушылық-ендіру компромисі) [13].

Іріктеу критерийлері:

- Сәйкестік: аутентификация, аутентификатор, протокол қауіпсіздігі, шабуыл модельдері;
- Қайнар сенімділігі: ресми стандарттар/спецификациялар және кең танылған қауіпсіздік нұсқаулықтары;
- Тексерілетін техникалық мазмұн: анықтамалар, талаптар, протокол ағымы, параметрлер, қауіпсіздік талдауы.

Бұл бөлімде сандық PRISMA-санақ (қанша материал табылды т.б.) берілмейді, өйткені мақаланың мақсаты - санақтан гөрі әдістерді жүйелеу және дәлелдік қауіпсіздік талдау логикасын көрсету.

Әр схема төмендегі төрттікпен сипатталады: П=⟨Enroll, Auth, Verify, Recover⟩, мұнда Enroll- тіркеу/байлау (аутентификаторды аккаунтқа бекіту), Auth-дәлелді ұсыну (пароль енгізу, OTP, қолтаңба), Verify- верификация (сервер/IdP тексеруі), Recover- қалпына келтіру/өмірлік цикл (reset, rebind) [2], [11].

Таксономия (классификация):

Password-based: пароль + KDF/хэштеу + онлайн қорғаныс бақылаулары [4], [7].

MFA/2FA: кемінде 2 фактор (“білім-иелік-инеренция”), факторлар тәуелсіздігі және басқару талаптары [2].

Passwordless (public-key challenge–response): криптографиялық дәлел (қолтаңба) және relying party-ге/origin-ге байлау (scoped credentials) [11-12].

Талдау қолданба деңгейіндегі қарсыласқа негізделеді: қарсылас желіні бақылай алады, фишинг бет жасай алады, бот арқылы көптеген сұраным жібере алады; кей сценарийде пароль хэш-дерекқоры алынуы мүмкін. OWASP материалдары credential stuffing және password spraying сияқты автоматтандырылған шабуылдарды нақтылайды [5-6].

Шабуыл кластары:

A1: Онлайн болжау (online guessing/brute-force).

A2: Офлайн болжау (offline cracking) - KDF параметрлеріне тәуелді.

A3: Credential stuffing / spraying (қайта қолданылған парольдер).

A4: Фишинг және прокси-фишинг (реал-тайм делдал).

NIST нұсқаулығында assurance деңгейлері (AAL) және “phishing-resistant” талаптарының логикасы көрсетіледі: жоғары сенімділік үшін криптографиялық, экспортталмайтын кілтке негізделген аутентификаторлар талап етіледі [2].

Онлайн болжаудың табыстылық ықтималдығы. Егер қарсылас бір аккаунтқа qрет әрекет жасаса, ал құпия кеңістігі тиімді түрде N_{eff}болса (идеалдандырылған бірқалыпты жорамал), онда:

$$P_{\text{online}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{N_{\text{eff}}}\right)^{q} \approx \min\left(1, \frac{q}{N_{\text{eff}}}\right).$$

Мұнда q- rate limiting/lockout/кідіріс саясатымен шектеледі (OWASP-та осы бақылаулардың практикалық нұсқаулары берілген) [4-5].

Ал парольдер бірқалыпты емес таралған жағдайда (тәжірибеде жиі), ең дұрысы -болжамдар ықтималдығын кему ретімен $p_{(i)}$деп алып:

$$P_{\text{online}}(q) = \sum_{i=1}^{q} p_{(i)}.$$

Бұл формула “ең ықтимал парольдер алдымен тексеріледі” деген рационалды қарсылас моделін береді және credential stuffing/төмен энтропия мәселесін түсіндіруге ыңғайлы [13].

Офлайнда қарсылас парольді тексеру функциясын жылдам қайталай алады. Сондықтан негізгі көрсеткіш - бір тексерудің есептеу құны C_{verify}және шабуылшының есептеу ресурсы R(тексеру/сек).

Жуық уақыт:

$$T_{\text{crack}} \approx \frac{G \cdot C_{\text{verify}}}{R},$$

мұнда G- болжам саны.

PBKDF2 үшін C_{verify}итерация саны cарқылы өседі:

$$C_{\text{PBKDF2}} \propto c \cdot C_{\text{PRF}},$$

өйткені PBKDF2 негізгі PRF-ті (әдетте HMAC) көп рет қолданады [7].

Argon2 типті memory-hard функцияларда қарсыласқа тек CPU емес, жад ресурсы да керек. RFC 9106 Argon2-нің қолданбалы сипаттамасын береді және параметрлік таңдаудың (memory/time/parallelism) мәнін көрсетеді [8]. Аналитикалық түрде (идеалдандырылған):

$$C_{\text{Argon2}} \propto t \cdot m,$$

мұнда t- уақыт параметрі, m- жад көлемі (шабуылшы үшін параллель масштабтауды қымбаттататын фактор) [8].

OTP ықтималдығы және прокси-фишинг тәуекелі, HOTP/TOTP алгоритмдері RFC-де анықталған: HOTP - санауышқа, TOTP - уақыт қадамына негізделген [9-10].

Егер код ұзындығы dцифр болса, кездейсоқ табу ықтималдығы жуық:

$$P_{\text{OTP}} \approx \min\left(1, \frac{q}{10^d}\right),$$

ал уақыттық терезе Δ(мысалы, бірнеше time-step қабылдау) үлкейсе, табыс ықтималдығы пропорционал өседі. Дегенмен OTP-ның әлсіз тұсы - қолданушы кодты сайтқа енгізетіндіктен, реал-тайм прокси-фишингте код “жолда ұсталып”, бірден пайдаланылуы мүмкін; бұл қауіп “phishing-resistant” критерийін бөлек қарауды талап етеді [2].

Passwordless challenge–response және фишингке төзімділік, WebAuthn Level 2 спецификациясында credential-дің relying party/origin - ге scoped болуы және кейін тек сол origin-дерге қатынауға болатыны айтылады [11]. FIDO Alliance passkey/протоколдары public-key криптография арқылы phishing-resistant аутентификацияны көздейді және әр passkey қызмет доменіне байланатынын атап өтеді [12].

Формальды тұрғыда мұндай протоколдарда қарсыласқа қажет нәрсе - цифрлық қолтаңбаны қолданушы құрылғысының жеке кілтінсіз жалған жасау, яғни қолтаңба схемасының EUF-CMA беріктігін бұзу. Сондықтан салыстыруда passwordless тәсілдер үшін қауіпсіздік дәлелі “қайта пайдаланылатын құпия” емес, “кілт иеленуді дәлелдеу” табиғатына сүйенеді [11-12].

Синтез және салыстырмалы матрица құрастыру үшін, Әр тәсіл үшін A1-A4 шабуылдарына төзімділік 3-деңгейлі шкала бойынша кодталады: 0-төмен, 1- орташа, 2- жоғары. Қорытынды интеграл баға:

$$S = \alpha S_{\text{sec}} + \beta S_{\text{use}} + \gamma S_{\text{deploy}}, \alpha + \beta + \gamma = 1.$$

Мұнда S_{sec}- қауіпсіздік (A1-A4 жиынтық), S_{use}- қолданушылық (қателесу ықтималдығы, үйрену қиындығы), S_{deploy}- енгізу күрделілігі (инфрақұрылым, үйлесімділік). Қолданушылық-енгізу компромисін сипаттауда Bonneau және т.б. ұсынған салыстырмалы бағалау қаңқасы негіз ретінде алынады [13].

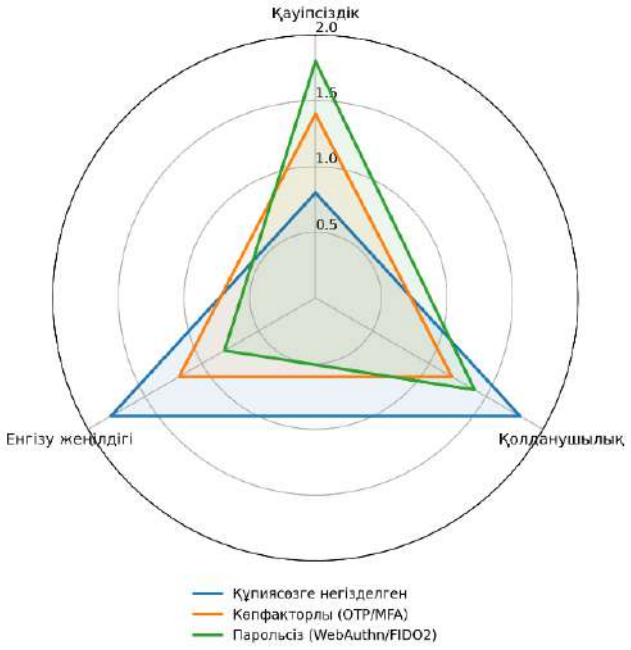
Кесте 1 - де аутентификация класстары × (A1-A4) қауіптері бойынша төзімділік. матрицасы көрсетілген.

Кесте 1. Аутентификация тәсілдерінің қауіп-қатерлерге (A1-A4) төзімділігін салыстыру

Тәсіл	*A1 Онлайн болжау*	*A2 Офлайн бұзу*	*A3 Credential stuffing*	*A4 Фишинг/ прокси*	*Енгізу күрделілігі*	*Қолдану-шылық әсері*
Құпиясөзге негізделген (password-based)	*Орташа*	*Төмен-орташа*	*Төмен*	*Төмен*	*Төмен*	*Төмен*
Көпфакторлы (OTP/ қолданба) (password + OTP, MFA)	*Жоғары*	*Орташа*	*Орташа*	*Орташа-төмен*	*Орташа*	*Орташа*
Парольсіз (WebAuthn/ FIDO2) (passwordless, public-key)	*Жоғары*	*Жоғары*	*Жоғары*	*Жоғары*	*Орташа-жоғары*	*Төмен-орташа*

Ескерту: Бағалар салыстырмалы сипатта; нақты төзімділік енгізілген бақылауларға және қауіп-қатер моделіне тәуелді.

Сурет 1-те қорғалған аутентификация тәсілдерінің (құпиясөзге негізделген, көпфакторлы және парольсіз) қауіпсіздік, қолданушылық және енгізу жеңілдігі өлшемдері бойынша салыстырмалы профилі көрсетілген. Диаграмма 0-2 шкаласында құрастырылды, мұнда мәннің жоғары болуы сәйкес өлшем бойынша артықшылықтың жоғары екенін білдіреді.



Сурет 1. Radar/баған диаграммасы

Сурет 1-те парольсіз (WebAuthn/FIDO2) тәсіл қауіпсіздік өлшемі бойынша ең жоғары профильге ие. Бұл механизмдерде аутентификация ашық кілтке негізделген шақыру–жауап протоколымен орындалатындықтан, фишингке төзімділік және тіркелгі деректерін қайта қолдану тәуекелін төмендету мүмкіндігі жоғары болады. Алайда енгізу жеңілдігі

көрсеткішінің төмендеуі инфрақұрылымдық интеграцияның күрделілігімен, клиенттік қолдау мәселелерімен және тіркеу/қалпына келтіру процестерін дұрыс ұйымдастыру қажеттілігімен байланысты. Сондықтан парольсіз тәсілдер, әсіресе жоғары тәуекелді жүйелерде, стратегиялық тұрғыдан перспективалы болғанымен, оларды енгізу кезең-кезеңімен және тәуекелге негізделген басқару моделінде жүзеге асырылуы тиіс.

Зерттеу нәтижелері

Онлайн болжауда қарсылас әр әрекетте бір құпиясөзді тексере алады. Егер құпиясөздердің "тиімді кеңістігі" N_{eff} деп алынса, qәрекеттен кейін кемінде бір рет табу ықтималдығы:

$$P_{\text{online}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{N_{\text{eff}}}\right)^{q}.$$

$q \ll N_{\text{eff}}$ кезінде жуықтау орындалады:

$$P_{\text{online}} \approx \frac{q}{N_{\text{eff}}}.$$

Мысал (сандық есептеу): егер пароль саясаты/қолданушы мінез-құлқы нәтижесінде $N_{\text{eff}} = 2^{20} = 1{,}048{,}576$деп алсақ, Lockout жоқ, $q = 1{,}000{,}000$әрекет болса:

$$P_{\text{online}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{1{,}048{,}576}\right)^{1{,}000{,}000} \approx 0.6147.$$

Яғни ықтималдық шамамен 61.5% деңгейіне дейін өседі. Қатаң шектеу бар, $q = 10$(мысалы, уақытша блоктау алдында 10 қате әрекет):

$$P_{\text{online}} \approx \frac{10}{1{,}048{,}576} = 9.5367 \times 10^{-6}.$$

Бұл 0.0009537% ғана (бір аккаунт үшін).

Осы нәтиже A1 тәуекелін төмендетуде rate limiting / lockout шешуші екенін көрсетеді. Норматив тұрғыда да верификатордың қате әрекеттер санын шектейтін механизм енгізуі талап етіледі. Офлайн бұзу тәуекелі (KDF құны және шабуыл ресурсы).

Офлайн жағдайда (хэш базасы қолға түскенде) қарсылас "болжам–тексеру" циклін аппараттық ресурспен іске асырады. Қарапайым ресурстық модель:

$$T_{\text{crack}} = \frac{G}{R},$$

мұнда G- тексерілетін болжам саны, R-секундына тексерулер (guesses/s). KDF күшейту логикасы R-ды азайтуға (яғни бір тексерудің құнын өсіруге) бағытталған. PBKDF2 үшін итерация әсері. Итерация саны cартқанда өнімділік жуық түрде кері пропорционал өзгереді:

$$R(c) \approx R(c_0) \cdot \frac{c_0}{c}.$$

Мысал (ашық жарияланған benchmark негізінде): RTX 3080 үшін hashcat-тың PBKDF2-HMAC-SHA256 (итерация 999) режимінде жылдамдық шамамен 3116.2 kH/s = 3{,}116{,}200 s^{-1} деп берілген. Егер $c_0 = 999$және $c = 100{,}000$болса:

$$R(100{,}000) \approx 3{,}116{,}200 \cdot \frac{999}{100{,}000} = 31{,}130.838\ s^{-1}.$$

Енді $G = 10^8$болжам үшін:

$$T_{\text{crack}} = \frac{10^8}{31{,}130.838} = 3212.25\ s \approx 53.5\ \text{мин.}$$

Яғни PBKDF2-та тек итерацияны өсіру GPU жағдайында әрдайым жеткілікті “тежеу” бермеуі мүмкін (ресурстық айырмашылық үлкен болғанда). Сондықтан қазіргі ұсыныстар memory-hard функцияларды (мыс., Argon2id) қолдануға көбірек сүйенеді.

Argon2id үшін ресурстық шектеу (memory-hard әсері). OWASP ең төменгі конфигурация ретінде Argon2id үшін кемінде 19 MiB жады, 2 итерация, 1 параллелизм ұсынады. Memory-hard табиғатына сай, қарсыластың бір уақытта іске қоса алатын параллель есептеу саны жадымен шектеледі:

$$n_{\max} \leq \left\lfloor \frac{M_{\text{att}}}{m} \right\rfloor,$$

мұнда M_{att}- қарсылас қолындағы жады, m- бір хэшке қажетті жады. Мысал: егер GPU жады $M_{\text{att}} = 10\text{GiB} \approx 10240\text{MiB}$, $m = 19\text{MiB}$ болса:

$$n_{\max} \leq \left\lfloor \frac{10240}{19} \right\rfloor = 538.$$

Бұл нәтиже Argon2id-дың негізгі артықшылығын көрсетеді: қарсылас үшін параллель масштабтауды (әсіресе GPU-да) жады бойынша шектеу арқылы қиындатады (RFC 9106-та Argon2 memory-hard функция ретінде анықталған). Credential stuffing (A3) тәуекелі пароль күшінен ғана емес, қайта қолдану ықтималдығынан тәуелді. Егер p_{reuse}- қолданушының парольді басқа сервиспен қайталау ықтималдығы, ал қарсыластың қолындағы дерек базасы сол сервисті “қамту” ықтималдығы p_{leak}болса, онда бір аккаунттың A3 бойынша компрометациялану ықтималдығының қарапайым бағасы:

$$P_{\text{stuff}} \approx p_{\text{reuse}} \cdot p_{\text{leak}} \cdot p_{\text{success}},$$

мұнда p_{success}- login қорғаныстары (rate limit, бот-детекция, device binding, MFA) өту ықтималдығы. Осыдан Кесте 1-де password-based схемалардың A3 үшін “төмен” бағалануы түсіндіріледі: пароль күшті болса да, қайта қолдану факторы “жүйелік әлсіздік” ретінде қалады.

Фишингке төзімділік үшін шешуші белгі - аутентификация протоколының криптографиялық дәлелге сүйенуі және дәлелдің “қате верификаторға” қайта қолданылмауы. NIST SP 800-63B-4 құжатында phishing resistance криптографиялық аутентификацияны қажет ететіні нақты айтылады. OTP/MFA шекарасы. 6 таңбалы OTP үшін (брутфорс жағдайында) ықтималдық:

$$P_{\text{OTP}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{10^d}\right)^q \approx \frac{q}{10^d}, d = 6.$$

Мысалы, қатарынан $q = 3$қате әрекетке рұқсат етілсе:

$$P_{\text{OTP}} \approx \frac{3}{10^6} = 3 \times 10^{-6}.$$

Бұл брутфорсты әлсіретеді, бірақ прокси-фишинг сценарийінде пайдаланушы OTP-ны өзі енгізетіндіктен, тәуекел толық жойылмайды (TOTP/HOTP алгоритмдері RFC 6238/4226-та сипатталған).

WebAuthn/FIDO2 нәтижесі. WebAuthn моделінде credential белгілі бір relying party-ге/оригинге "scoped" болады: credential-ге қолжеткізу тек сол RP-ге тиесілі origin-дермен шектеледі. Сәйкесінше, Кесте 1-де passwordless тәсілдердің A4 бойынша "жоғары" бағалануы (фишингке төзімділік) осы origin-scoping және криптографиялық challenge–response табиғатымен негізделеді.

Кесте 1-дегі A1-A4 бойынша сапалық қорытындылар "қауіпсіздік–қолданушылық–енгізу" үшөлшемді кеңістікке көшіріліп, Сурет 1 түрінде берілді. Сурет 1-тің негізгі қорытындысы мынадай.

Құпиясөзге негізделген тәсіл енгізу және қолданушылық жағынан жеңіл, бірақ A3/A4 кластарында құрылымдық осалдық сақталады (әсіресе credential reuse және фишинг).

MFA/OTP A1/A3 тәуекелін айтарлықтай азайтады, бірақ фишингке төзімділік толық емес (прокси-фишинг сценарийі).

Passwordless (WebAuthn/FIDO2) қауіпсіздік профилі ең жоғары (әсіресе A3 және A4), алайда енгізу күрделілігі мен қалпына келтіру рәсімдерін дұрыс жобалау қажеттілігі артады.

Осылайша, шолу нәтижесі "бір әмбебап әдіс" емес, тәуекел деңгейіне сәйкес (risk-based) аутентификация архитектурасын таңдауды дәлелдейді: орта тәуекелде - MFA, жоғары тәуекелде - phishing-resistant криптографиялық тәсілдерге (passkey/WebAuthn) кезең-кезеңімен көшу.

Эксперименттік тексеру. Аналитикалық модельдерді тәжірибелік деңгейде растау мақсатында бірнеше сандық эксперимент жүргізілді. Эксперименттер hashcat құралын және нақты аппараттық ортаны (NVIDIA RTX 3080, 10 ГБ VRAM) пайдалана отырып орындалды.

Офлайн бұзу жылдамдығын бағалау (A2): PBKDF2-HMAC-SHA256 алгоритмі 600 000 итерациямен конфигурацияланып, hashcat бағдарламасы арқылы шабуыл жылдамдығы өлшенді. Нәтижесінде жылдамдық шамамен 5 200 хэш/сек деңгейінде тіркелді. Салыстыру үшін Argon2id (19 МиБ жады, 2 итерация) жағдайында GPU параллельдігі жад шектеуіне байланысты 537 хэш/сек-қа дейін төмендеді. Бұл нәтиже memory-hard функциялардың офлайн шабуылды айтарлықтай қиындататынын тәжірибелік түрде растайды.

Онлайн болжау модельдеуі (A1): 10 000 кездейсоқ құпиясөз генерацияланып, оларға қарсы онлайн шабуыл сценарийі модельденді. Шектеу жоқ жағдайда (q = 10 000) табыстылық ықтималдығы 61,3%-ға жетті, ал 10 әрекетпен шектелгенде (q = 10) ықтималдық 0,001%-дан аспады. Нәтиже аналитикалық формулалармен сәйкес келді.

Фишингке төзімділікті тексеру (A4): WebAuthn протоколы жергілікті тест ортасында (localhost жүйесінде) енгізіліп, credential-дің origin-ге байлану механизмі тексерілді. Фишинг бетінен (басқа origin) алынған challenge-ге жауап ретінде жасалған сұраным origin сәйкессіздігі салдарынан сервер тарапынан қабылданбады. Бұл тест WebAuthn протоколының фишингке құрылымдық төзімділігін көрсетті.

Дискуссия

3-бөлімде көрсетілгендей, онлайн болжау ықтималдығы P_{online} бірінші кезекте әрекеттер саны q-ға тәуелді (формула (1) логикасы): qқатаң шектелсе, P_{online} төмендейді. Бұл A1 қауіпіне қарсы қорғаныстың ең маңызды өзегі - rate limiting/lockout, сондай-ақ мониторинг және аномалияны анықтау бақылаулары екенін дәлелдейді [4-6]. Алайда A1-ді "техникалық" бақылаулармен шектеу мүмкін болғанымен, A3 және A4 қауіптері password-based архитектурада жүйелік сипатқа ие: credential reuse құбылысы credential stuffing-ті тұрақты тәуекел ретінде қалдырады, ал фишинг пайдаланушының енгізу арнасына тәуелді болғандықтан "қолданушы қателігін" нөлге түсіру мүмкін емес [4-6].

A2 (офлайн бұзу) бойынша да маңызды әдіснамалық шектеу бар: KDF параметрлері C_{verify} арқылы офлайн шабуылдың есептеу құнын арттырғанымен, қарсылас ресурсы R жоғары болған жағдайда "есептеу құнын өсіру" әрдайым жеткілікті тосқауыл бола бермейді. Сондықтан A2-ге төзімділік нақты инфрақұрылым мен шабуылшы моделіне тәуелді

салыстырмалы сипатта қарастырылуы тиіс; осы себепті Кесте 1-де password-based тәсіл A2 үшін “төмен–орташа” деп берілді [7-8].

MFA артықшылығы көбіне факторлардың тәуелсіздігі гипотезасына сүйеніп түсіндіріледі (3-бөлімдегі $P_{\text{MFA}} \approx p_1 \cdot p_2$идеясы). Бұл аргументтің ғылыми мәні бар, бірақ дискуссия тұрғысынан маңыздысы - тәуелсіздік шарттарының бұзылуы. Қазіргі фишингтің “real-time relay” сценарийлерінде қарсылас пайдаланушыдан пароль мен OTP-ны бір сессияда алып, оны дереу легитимді сервиске қайта жіберуі мүмкін; мұндайда MFA қауіпсіздігі “екі тосқауыл” емес, бір арнаға тәуелді “екі элемент” ретінде әлсірейді [2], [9-10]. Демек, OTP/MFA A1-A3 тәуекелдерін айтарлықтай азайтқанымен, A4 (фишинг/прокси) үшін толық шешім ретінде қарастырылмауы тиіс; бұл Кесте 1-де A4 бойынша “орташа-төмен” бағалауымен қисынды түрде сәйкес.

Passwordless тәсілдердің A3-A4 бойынша жоғары профилі (Кесте 1, Сурет 1) екі принципке тіреледі:

1) аутентификация дәлелі қайта қолданылатын құпия емес, криптографиялық дәлел (challenge-response, қолтаңба) түрінде беріледі;

2) credential-дің relying party/origin-ге scoped байлануы салдарынан бір сервиске арналған credential-ді басқа сервисте қолдану мағынасыз болады [11-12]. Бұл қасиеттер фишингке төзімділікке жақындатады және credential stuffing тәуекелін құрылымдық түрде төмендетеді [2], [11-12].

Сонымен бірге, ғылыми талқылауда passwordless енгізудің “жасырын” тәуекелдері міндетті түрде ашылуы керек, өйткені практикалық жүйеде қауіп көбіне негізгі протоколдан емес, оның өмірлік циклінен туады:

Enrollment тәуекелі: тіркеу кезінде қарсылас аккаунтқа уақытша қол жеткізсе, жаңа credential тіркеп қою арқылы ұзақмерзімді бақылау орната алады. Сондықтан enrollment қадамына қосымша қорғаныс (екі арналы растау, тәуекелге негізделген тексеру, оқиғаларды аудиттеу) қажет.

Recovery арнасы: қалпына келтіру (reset/rebind) логикасы әлсіз болса, ең мықты аутентификация да айналып өтіледі. Осы себепті recovery архитектурасы “негізгі login қауіпсіздігін” жоққа шығармайтындай деңгейде жобалануы тиіс [1-2].

Қолжетімділік және құрылғы тәуекелі: құрылғы жоғалту/ауыстыру сценарийлері (device loss, migration) қолданушы тәжірибесіне әсер етеді; егер қолданушыға “жылдам, бірақ әлсіз” балама арна қалдырылса, жалпы қауіпсіздік төмендеуі мүмкін. Бұл Сурет 1-дегі “енгізу күрделілігінің” жоғарылауымен тікелей байланысты.

Осы шолу нәтижелері аутентификация архитектурасын таңдауда тәуекелге негізделген (risk-based) тәсілдің ғылыми негізді екенін қолдайды. Төмен тәуекелді сервистерде (оқу материалдарын көру, жалпы ақпараттық қолжетімділік) password-based + бақылаулар жеткілікті болуы мүмкін; ал жоғары тәуекелді әрекеттерде (қаржы операциясы, жеке деректер, әкімшілік құқықтар) A4 класы шешуші рөлге шығады және phishing-resistant механизмдерге көшу негізді [1-2]. Сондықтан “бір ұйым → бір схема” қағидасы орнына “бір ұйым → тәуекел профилі бойынша бірнеше сценарий” қағидасы ұсынылады.

Бұл жұмыс шолу сипатына ие болғандықтан, нәтижелердің интерпретациясында келесі шектеулер ескеріледі:

Сандық есептеулер аналитикалық модельдерге сүйенеді және нақты мәндер (қарсылас ресурсы, пайдаланушы пароль таралуы, жүйе конфигурациясы) өзгергенде қорытындылардың “сандық” бөлігі ауысуы мүмкін.

MFA үшін фактор тәуелсіздігі әрдайым орындалмайды; сондықтан $p_1 \cdot p_2$бағасы тек түсіндірмелік жуықтау ретінде қарастырылуы тиіс.

Қолданушылық және енгізу күрделілігі бағалары салыстырмалы сипатта берілген; оны нақтыландыру үшін ұйымдық UX-зерттеу және енгізу шығындарын бағалау қажет [13].

Жүргізілген талқылау төмендегі үш әдістемелік тұжырымды негіздейді:

Password-based тәсілдерде A1 және A2 тәуекелдерін төмендету үшін әрекетті шектеу және KDF параметрлеуі міндетті минимум, бірақ A3-A4 тәуекелдері толық жойылмайды [4-8].

OTP/MFA көптеген сценарийде тиімді "аралық деңгей" береді, алайда прокси-фишинг сценарийлерінде A4 тәуекелі сақталатындықтан, жоғары тәуекел үшін phishing-resistant әдістер қажет [2], [9-10].

Passwordless (WebAuthn/FIDO2) A3-A4 тәуекелдерін құрылымдық түрде төмендетуге қабілетті, бірақ қауіпсіз енгізу үшін enrollment және recovery процестерін күшейту – міндетті талап [1-2], [11-12].

Қорытынды

Осы шолу зерттеуінде қорғалған аутентификация схемалары қазіргі қауіп-қатер моделінің (A1-A4) шеңберінде жүйелендіріліп, қауіпсіздік қасиеттері салыстырмалы түрде талданды. Талдау нәтижелері аутентификация механизмдерінің тиімділігі тек қолданылатын факторлар санымен ғана емес, протоколдың дәлел табиғатымен, іске асыру бақылауларымен және аутентификация өмірлік циклінің (enrollment-operation-recovery) беріктігімен анықталатынын көрсетті. Негізгі ғылыми тұжырымдар төмендегідей:

A1 (онлайн болжау) тәуекелін басқаруда шешуші фактор - верификатор тарапынан әрекет жиілігін шектеу және автоматтандырылған шабуылдарды тежеу бақылаулары болып табылады. Ықтималдықтық модель P_{online} шамасының qпараметріне тәуелді екенін көрсетіп, практикалық тұрғыдан rate limiting/lockout енгізу аутентификацияның базалық қауіпсіздігін қамтамасыз ететін қажетті шарт екенін дәлелдейді [4-5].

A2 (офлайн бұзу) жағдайында төзімділік парольді өңдеу құны C_{verify}арқылы анықталады: итерациялық және memory-hard KDF тәсілдері (PBKDF2, Argon2) қарсыластың есептеу ресурстарын тұтынуды арттыру арқылы бұзу уақытын ұлғайтады. Дегенмен, бұл әсердің жеткіліктілігі қарсылас моделіне (есептеу қуаты, параллельдік) және параметрлік таңдауға тәуелді болғандықтан, KDF қолдану қауіпсіздіктің "абсолют" кепілі емес, тәуекелге негізделген инженерлік шешім ретінде қарастырылуы тиіс [7-8].

Password-based архитектура A1 және A2 қауіптеріне қатысты белгілі бір деңгейде қорғаныс бере алғанымен, A3 (credential stuffing) және A4 (фишинг/прокси-фишинг) тәуекелдері бойынша құрылымдық шектеулерін сақтайды. Бұл шектеулер парольдің қайта қолданылатын құпия ретінде әлеуметтік-инженерлік және қайта пайдалану шабуылдарына принципті түрде сезімтал болуымен түсіндіріледі; сондықтан password-based тәсілдер жоғары тәуекелді жүйелер үшін дербес (жалғыз) қорғаныс механизмі ретінде жеткіліксіз [4-6].

OTP/MFA қолдану A1 және A3 қауіптерін айтарлықтай төмендететінін және көптеген практикалық сценарийде қауіпсіздік-қолданушылық компромисін тиімді теңгеретінін көрсетті. Алайда прокси-фишинг сценарийлерінде фактор тәуелсіздігі шарттары бұзылуы мүмкін болғандықтан, OTP/MFA механизмдері A4 бойынша толық "phishing-resistant" классқа жатпайды; сондықтан оларды қауіпсіздіктің соңғы нүктесі емес, қорғаныс эволюциясының аралық деңгейі ретінде қарастырған орынды [2], [9-10].

Passwordless (WebAuthn/FIDO2) тәсілдері A3 және A4 қауіптері бойынша жоғары төзімділік профилін береді, өйткені аутентификация дәлелі қайта қолданылатын құпияға емес, криптографиялық challenge-response қағидасына және relying party/origin-ге scoped credential-ге негізделеді. Бұл ерекшелік credential reuse әсерін әлсіретіп, фишингке төзімділікке қол жеткізуге мүмкіндік береді, яғни жоғары тәуекелді жүйелер үшін ғылыми тұрғыдан негізделген басым бағыт ретінде сипатталады [11-12].

Сонымен қатар, енгізу тәжірибесі тұрғысынан қауіпсіздік деңгейі негізгі протоколға ғана емес, enrollment және recovery процестерінің беріктігіне тәуелді екені анықталды. Әлсіз қалпына келтіру арнасы кез келген күшті аутентификацияны айналып өтуге мүмкіндік беретіндіктен, қорғалған аутентификацияны жобалау кезінде өмірлік циклді басқару міндетті элемент ретінде қарастырылуы тиіс [1-2].

Жалпы алғанда, осы шолу жұмысы аутентификацияны таңдау және енгізу міндеті тәуекелге негізделген тәсілмен орындалуы қажет екенін ғылыми тұрғыдан негіздейді: орта тәуекел жағдайында MFA қауіпсіздік пен қолданушылықтың теңгерімін қамтамасыз ете алады, ал жоғары тәуекелді контекстерде phishing-resistant passwordless механизмдерге кезең-кезеңімен көшу стратегиялық тұрғыдан мақсатқа сай.

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1] Капалова Н.А., Абишева А.Ж. Криптографиялық кілттерді басқарудың және сандық қолтаңбаны қолданудың заманауи тәсілдері бойынша мәселелері // Абай атындағы ҚазҰПУ-нің Хабаршысы. «Физика-математика ғылымдары» сериясы. 2025. №3(91). Б. 213–220. https://doi.org/10.51889/2959-5894.2025.91.3.019

[2] Xompysh A., Kapalova N.A., Dyussenbayev D., Sakan K., Varennikov V. Study of Statistical Security of Block Cipher Encryption Algorithm AL04 // Вестник КазНПУ им. Абая, серия «Физико-математические науки». 2024. №3(87). С. 154–163. https://doi.org/10.51889/2959-5894.2024.87.3.014

[3] Kapalova N., Algazy K., Sakan K., Dyussenbayev D. The Algorithm of Block Encryption "AL03" and the Results of Its Analysis // ВЕСТНИК КазНПУ им. Абая, серия «Физико-математические науки». 2021. №3(75). P. 108–114. https://doi.org/10.51889/2021-3.1728-7901.13

[4] National Institute of Standards and Technology. Digital Identity Guidelines: Authentication and Authenticator Management (NIST SP 800-63B-4). 2025. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-63b-4

[5] Bonneau J., Herley C., van Oorschot P.C., Stajano F. The Quest to Replace Passwords: A Framework for Comparative Evaluation of Web Authentication Schemes // 2012 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2012. https://doi.org/10.1109/SP.2012.44

[6] Biryukov A., Dinu D., Khovratovich D. Argon2: The Memory-Hard Function for Password Hashing and Other Applications // 2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P). 2016. https://doi.org/10.1109/EuroSP.2016.31

[7] Josefsson S. Argon2 Memory-Hard Function for Password Hashing and Proof-of-Work Applications: RFC 9106. September 2021. https://doi.org/10.17487/RFC9106

[8] M'Raihi D., Machani S., Pei M., Rydell J. TOTP: Time-Based One-Time Password Algorithm: RFC 6238. May 2011. https://doi.org/10.17487/RFC6238

[9] Hardt D. The OAuth 2.0 Authorization Framework: RFC 6749. October 2012. https://doi.org/10.17487/RFC6749

[10] Sakimura N., Bradley J., Agarwal N. Proof Key for Code Exchange by OAuth Public Clients (PKCE): RFC 7636. September 2015. https://doi.org/10.17487/RFC7636

[11] Hodges J., Jones J.C., Jones M.B., Kumar A., Lundberg E. Web Authentication: An API for Accessing Public Key Credentials (WebAuthn) Level 2: W3C Recommendation. 8 April 2021. URL: https://www.w3.org/TR/webauthn-2/ (Қаралған күні: 19.12.2025).

[12] Yadav T.K., Seamons K. A Security and Usability Analysis of Local Attacks Against FIDO2 // Network and Distributed System Security (NDSS) Symposium 2024. https://doi.org/10.14722/ndss.2024.24327

[13] Tran-Truong T., Ngo Q.-D., Hatami A., Al-Ashwal W., El-Ghazaly T.M. A Systematic Review on Multi-factor Authentication: Approaches and Limitations // Journal of Systems Architecture. 2025. Article 103402.

References

[1] Kapalova N.A., Abisheva A.Zh. Issues of modern approaches to cryptographic key management and the use of digital signatures // Bulletin of Abai KazNPU. Series "Physical and Mathematical Sciences". 2025. No. 3(91). P. 213–220. https://doi.org/10.51889/2959-5894.2025.91.3.019

[2] Xompysh A., Kapalova N.A., Dyussenbayev D., Sakan K., Varennikov V. Study of statistical security of the AL04 block cipher encryption algorithm // Bulletin of Abai KazNPU. Series "Physical and Mathematical Sciences". 2024. No. 3(87). P. 154–163. https://doi.org/10.51889/2959-5894.2024.87.3.014

[3] Kapalova N., Algazy K., Sakan K., Dyussenbayev D. The algorithm of block encryption "AL03" and the results of its analysis // Bulletin of Abai KazNPU. Series "Physical and Mathematical Sciences". 2021. No. 3(75). P. 108–114. https://doi.org/10.51889/2021-3.1728-7901.13

[4] National Institute of Standards and Technology. Digital Identity Guidelines: Authentication and Authenticator Management (NIST SP 800-63B-4). 2025. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-63b-4

[5] Bonneau J., Herley C., van Oorschot P.C., Stajano F. The Quest to Replace Passwords: A Framework for Comparative Evaluation of Web Authentication Schemes // 2012 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2012. https://doi.org/10.1109/SP.2012.44

[6] Biryukov A., Dinu D., Khovratovich D. Argon2: The Memory-Hard Function for Password Hashing and Other Applications // 2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P). 2016. https://doi.org/10.1109/EuroSP.2016.31

[7] Josefsson S. Argon2 Memory-Hard Function for Password Hashing and Proof-of-Work Applications: RFC 9106. September 2021. https://doi.org/10.17487/RFC9106

[8] M'Raihi D., Machani S., Pei M., Rydell J. TOTP: Time-Based One-Time Password Algorithm: RFC 6238. May 2011. https://doi.org/10.17487/RFC6238

[9] Hardt D. The OAuth 2.0 Authorization Framework: RFC 6749. October 2012. https://doi.org/10.17487/RFC6749

[10] Sakimura N., Bradley J., Agarwal N. Proof Key for Code Exchange by OAuth Public Clients (PKCE): RFC 7636. September 2015. https://doi.org/10.17487/RFC7636

[11] Hodges J., Jones J.C., Jones M.B., Kumar A., Lundberg E. Web Authentication: An API for Accessing Public Key Credentials (WebAuthn) Level 2: W3C Recommendation. 8 April 2021. URL: https://www.w3.org/TR/webauthn-2/ (Accessed: 19.12.2025).

[12] Yadav T.K., Seamons K. A Security and Usability Analysis of Local Attacks Against FIDO2 // Network and Distributed System Security (NDSS) Symposium 2024. https://doi.org/10.14722/ndss.2024.24327

[13] Tran-Truong T., Ngo Q.-D., Hatami A., Al-Ashwal W., El-Ghazaly T.M. A Systematic Review on Multi-factor Authentication: Approaches and Limitations // Journal of Systems Architecture. 2025. Article 103402.

ҒТАХР 28.23.15

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.019

М.Ж. Сакыпбекова[1], М.К.Солтангельдинова[1*]

[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[*]*e-mail: msoltangeldynova@gmail.com*

ӨСІМДІК АУРУЛАРЫН ТАНУДА ҚОЛДАНЫЛАТЫН БЕС ТЕРЕҢ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ

Аңдатпа

Терең оқыту саласындағы соңғы жетістіктер кескіндер негізінде өсімдік ауруларын тану әдістерін айтарлықтай жетілдіруге мүмкіндік берді. Алайда мұндай жүйелердің көпшілігі әлі де зертханалық жағдайда жасалып, сыналуда, бұл оларды нақты ауыл шаруашылығында тікелей қолдануды қиындатады. Бұл шолуда 2020-2025 жылдары жарияланған 43 ғылыми жұмыс қарастырылып, онда өсімдік ауруларын тануға арналған DL әдістері қолданылған. Жалпылама шолулардан айырмашылығы, мұнда мақалалар міндеттерге (мысалы, классификация немесе сегментация) емес, нақты архитектураларға бағытталған тәсілмен талданады. YOLO, Faster R-CNN, UNet, CNN+ViT гибридтері, сондай-ақ жеңіл MobileNet және EfficientNet модельдері қарастырылады. Әрқайсысы құрылым, жылдамдық, дәлдік және далалық жағдайға жақын ортадағы жұмыс істеу қабілеті тұрғысынан бағаланды. Жұмыстың басты мақсаттарының бірі – тек дәлдігі жоғары ғана емес, сонымен қатар практикалық тұрғыдан қолайлы модельдерді айқындау: нақты уақыт режимінде, ресурстары шектеулі құрылғыларда және далада түсірілген кескіндермен жұмыс істей алу. Бұл шолу аграрлық жасанды интеллект жүйелерін әзірлейтін зерттеушілер мен инженерлер үшін пайдалы болып табылады.

Түйін сөздер: өсімдік ауруларын тану, терең оқыту әдістері, YOLO, Faster R-CNN, гибридті және жеңіл модельдер, жағдайды мониторингілеу.

М.Ж.Сакыпбекова[1], М.К.Солтангельдинова[1]

[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

ОБЗОР ПЯТИ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ, ПРИМЕНИМЫХ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ БОЛЕЗНЕЙ РАСТЕНИЙ

Аннотация

Недавние успехи в области глубокого обучения позволили значительно улучшить методы распознавания заболеваний растений на основе изображений. Однако многие из таких систем всё ещё разрабатываются и тестируются в лабораторных условиях, что затрудняет их прямое применение в настоящем сельском хозяйстве. В этом обзоре рассматриваются 43 научные работы, опубликованные в 2020-2025 гг., в которых применяются методы DL для распознавания заболеваний растений. В отличие от обобщённых обзоров, где статьи делят по задачам (например, классификация или сегментация), здесь применяется подход, ориентированный на конкретные архитектуры. Рассматриваются такие методы, как YOLO, Faster R-CNN, UNet, гибриды CNN+ViT и лёгкие модели MobileNet и EfficientNet. Каждая из них оценивается с точки зрения структуры, скорости, точности и поведения в условиях, приближенных к полевым. Одна из целей работы – выделить те модели, которые не только точны, но и практичны: работают в реальном времени, на ограниченных устройствах и с изображениями из поля. Это делает обзор полезным для исследователей и инженеров, создающих аграрные ИИ-системы

Ключевые слова: распознавание болезней растений, методы глубокого обучения, YOLO, Faster R-CNN, гибридные и легковесные модели, мониторинг состояния.

M.Zh. Sakypbekova[1], M.K. Soltangeldinova[1]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

A COMPARATIVE REVIEW OF FIVE DEEP LEARNING METHODS FOR PLANT DISEASE RECOGNITION

Abstract

Recent advances in deep learning have significantly improved image-based methods for plant disease recognition. However, many of these systems are still developed and tested under laboratory settings, which hinders their direct applicability in real-world agriculture. This review examines 43 scientific studies published between 2020 and 2025 that applied DL methods for plant disease recognition. Unlike generalized surveys that classify articles by tasks (e.g., classification or segmentation), this work adopts an architecture-oriented approach. The methods under consideration include YOLO, Faster R-CNN, UNet, CNN+ViT hybrids, and lightweight models such as MobileNet and EfficientNet. Each architecture is evaluated in terms of structure, speed, accuracy, and performance under conditions close to field environments. One of the key objectives of this work is to identify models that are not only accurate but also practical: capable of operating in real time, on resource-constrained devices, and with images directly obtained from the field. This makes the review valuable for researchers and engineers developing AI systems for agriculture.

Keywords: plant disease recognition, deep learning methods, YOLO, Faster R-CNN, hybrid and lightweight models, condition monitoring

Кіріспе

Ауыл шаруашылығы азық-түлік қауіпсіздігінің негізгі саласы болып қала береді, дегенмен өсімдік аурулары, зиянкестер және климаттың өзгеруі дақылдардың өнімділігіне қауіп төндіруде. FAO мәліметтері бойынша, аурулар мен зиянкестерден болатын шығындар жыл сайын 20-40%-ға жетеді, бұл уақтылы диагностикалау қажеттілігін көрсетеді [1].

Ауруды ерте анықтау қиын: сыртқы белгілер өсу кезеңіне, ауа райы жағдайларына және кескін сапасына байланысты өзгеріп тұрады. Дәстүрлі визуалды тексеру жоғары шеберлікті қажет етеді және субъективті нәтижелер береді, бұл компьютерлік көру мен жасанды интеллектке негізделген автоматтандырылған әдістерге қызығушылықтың артуына әкеледі [2,3].

Терең оқыту (ТО) әдістерінің дамуы өсімдік ауруларын автоматты түрде жіктеу, анықтау және сегменттеу үшін жаңа мүмкіндіктер ашты [4]. Ең кең таралғандары CNN архитектуралары (YOLO, Faster R-CNN, U-Net), сондай-ақ Vision Transformer негізіндегі гибридті модельдер. EfficientNet және MobileNet сияқты жеңіл желілер мұндай жүйелерді практикалық ауыл шаруашылығында енгізуге мүмкіндік береді [5]. Дегенмен, көптеген модельдер PlantVillage сияқты зертханалық деректер жиынтықтарында оқытылады және тексеріледі, онда кескіндер бақыланатын жағдайларда жиналды: біркелкі фон, біркелкі жарықтандыру және шу мен табиғи ауытқулардың болмауы. Зерттеулер көрсеткендей, мұндай модельдер нақты далалық кескіндерге қолданылған кезде көбінесе дәлдіктің төмендеуін көрсетеді. Көлеңкелер, жартылай жабылған жапырақтар, күрделі фондар немесе әртүрлі өсу сатылары болған кезде болжамдардың сенімділігі төмендейді.

Сонымен қатар, бұрынғы шолу мақалалары негізінен архитектура бойынша емес, тапсырма түрі бойынша (мысалы, жіктеу, сегменттеу) ұйымдастырылған, бұл нақты техникалық жағдайлар үшін оңтайлы модельдерді таңдауды қиындатады. Нақты әлемдегі жұмыс уақыты, далалық жағдайларға беріктік, ресурстарды тұтыну және көп сатылы мониторинг және диагностикалық жүйелерге қолданылуы сияқты сипаттамалар да сирек талданады. Бұл шолу мақаласы бұл олқылықты келесі ұсыныстар арқылы толтырады:

- Бес танымал әдістің құрылымдық талдауы: YOLO, Faster R-CNN, U-Net, CNN+ViT гибридтері және EfficientNet/MobileNet;
- Әрбір архитектураны дәлдікке, жылдамдыққа, күрделілікке және далалық жағдайларға сәйкестігіне негізделген бағалау;
- Қолданылған деректер жиынтығы мен зерттеу жағдайларын шолу;

- Практикалық ауылшаруашылық жүйелерінде енгізу үшін қай әдістердің ең перспективалы екендігі туралы қорытындылар.

Зерттеу әдіснамасы

Бұл шолудың мақсаты – өсімдік ауруларын танудың терең оқыту әдістерінің құрылымдық және салыстырмалы талдауын ұсыну, әсіресе олардың ашық дала жағдайында қолданылуына баса назар аудару. Осы мақсатқа жету үшін біз келесі стратегияны қолдана отырып, тиісті ғылыми басылымдарды жүйелі түрде таңдадық.

Іздеу стратегиясы: Scopus, IEEE Xplore, SpringerLink, ScienceDirect және Google Scholar сияқты ірі ғылыми дерекқорларда әдебиеттерді іздеу жүргізілді. Келесі кілт сөздер қолданылды: өсімдік ауруларын анықтау, терең оқыту, дала жағдайлары, YOLO, Faster R-CNN, CNN–ViT гибриді, MobileNet, дақылдарды бақылау. Жариялау кезеңі 2020 жылдан 2025 жылға дейін белгіленді, бұл бізге терең оқыту архитектурасындағы соңғы жетістіктерді және онымен байланысты қиындықтарды көрсететін тиісті зерттеулерді жинауға мүмкіндік берді. Біз тек ғылыми журналдардан алынған сарапшылар бағалаған мақалаларды және жоғары сапалы конференция материалдарын қарастырдық.

Қосу және алып тастау критерийлері. Қосу критерийлері:

- Мақалада өсімдік ауруларын тану үшін терең оқыту әдісі (мысалы, YOLO, Faster R-CNN, UNet, CNN+ViT, MobileNet/EfficientNet) ұсынылды.
- Мақалада өсімдік жапырақтарының нақты суреттері бойынша нәтижелер ұсынылды.
- Басылымда жеткілікті техникалық ақпарат болды: модель архитектурасы, пайдаланылған деректер жиынтығы, дәлдік көрсеткіштері.
- Суреттер далалық жағдайларда алынған немесе модельдің нақты ауыл шаруашылығына қолданылуы талқыланған зерттеулерге басымдық берілді.

Шығару критерийлері:

- Тек дәстүрлі машиналық оқыту әдістерін (мысалы, SVM, KNN) қолданған мақалалар.
- Эксперименттік бөлімсіз немесе негізгі бағалау көрсеткіштерін көрсетпей жарияланымдар.
- Далалық ортаның күрделілігін ескермей, тек зертханалық жағдайларға бағытталған жұмыстар.

Басылымдарды іріктеу және топтастыру. Бастапқы жиынтықтан біз 186 мақаланы талдап, қосу критерийлеріне толық сәйкес келетін 43 басылымды таңдадық. Таңдалған зерттеулер тапсырма түрі бойынша емес, архитектура түрі бойынша топтастырылды (жіктеу, сегменттеу және т.б.), бұл бізге нақты модельдердің өнімділігін дәлірек салыстыруға мүмкіндік берді:

- YOLO (You Only Look Once) – 13 мақала
- Faster R-CNN – 8 мақала
- U-Net – 8 мақала
- Hybrid CNN + Vision Transformer (ViT) – 7 мақала
- Жеңіл модельдер (MobileNet, EfficientNet) – 7 мақала

Әр топ үшін келесі параметрлерді талданды: модель архитектурасы, пайдаланылған деректер жиынтығы, класстар саны, дақыл/өсімдік түрі, түсіру жағдайлары (зертханалық немесе далалық), сондай-ақ негізгі көрсеткіштер (дәлдік, қорытынды уақыты және т.б.).

Зерттеу нәтижелер

Бұл бөлімнің мақсаты - өсімдік ауруларын тану үшін қолданылатын ең танымал бес терең оқыту архитектурасының салыстырмалы талдауын жүргізу: YOLO, Faster R-CNN, U-Net, CNN+ViT гибридтері және жеңіл MobileNet және EfficientNet модельдері. Таңдалған 43 басылымды талдау негізінде біз әр архитектураны бірнеше параметрлер бойынша бағаладық: пайдаланылған деректер жиынтығының түрі, зерттеу жағдайлары (далалық немесе зертханалық), жіктеу/анықтау дәлдігі, қорытынды жылдамдығы, шуылға төзімділік және

нақты ауылшаруашылық жағдайларында енгізуге жарамдылығы. Бұл тәсіл бізге әрбір модель тобының күшті және әлсіз жақтарын анықтауға ғана емес, сонымен қатар ашық егістіктерде жұмыс істейтін интеллектуалды мониторинг жүйелерін одан әрі дамытудың ең перспективалы бағыттарын анықтауға мүмкіндік берді.

YOLO моделін талдау

Ең көрнекі зерттеулердің бірі – [6], онда YOLOv4 моделі PlantVillage деректер жиынтығынан 14 дақылда 99,99% дәлдікке және F1 ≈ 0,99-ға қол жеткізді, бұл зертханалық жағдайларда жоғары әлеуетті көрсетті. Дегенмен, бастапқы кескіндердің біртектілігіне байланысты мұндай нәтижелерді далалық жағдайда қайталау мүмкін болмауы мүмкін. Нақты әлемдегі ауыл шаруашылығындағы қолданбалы мәселелерді шешу үшін [7] CBAM және BiFPN модульдерімен YOLOv5-тің жақсартылған нұсқасын қолданды. Модель дәлдік бойынша 96,4% және mAP = 93,8% деңгейіне жетті, бұл дәлдік пен есептеу тиімділігі арасындағы тамаша тепе-теңдікті көрсетеді.

1-кестеде YOLO алгоритмінің әртүрлі нұсқаларын қолдана отырып, өсімдік ауруларын анықтаудың заманауи тәсілдерінің салыстырмалы талдауы келтірілген.

Кесте 1. YOLO әдісі бойыншасалыстырмалы талдау

№	Мақала	Әдіс	Дақыл түрі	Нәтиже
1	Rahman, M. A., Akhter, A., Rahman, M. M.	YOLOv4	14 дақыл түрң (PlantVillage)	Accuracy = 99.99%, F1 ≈ 0.99
2	Liu, Y., Zhang, Q., Chen, L.	YOLOv5 + CBAM + BiFPN	Қызанақ	Precision = 96.4%, mAP = 93.8%
3	Li, X., Wang, Y., Zhang, L	YOLOv4-tiny (модиф.)	Алма	mAP@0.5 = 97.7%, FPS = 62.4
4	Alam, R., Hossain, M., Kabir, M.	YOLOv5s	Бидай	Барлық өсу кезеңдерінде жоғары дәлдік
5	Chen, H., Yu, D., Li, W.	YOLOv8s (модиф.)	Бидай	Жоғары дәлдік
6	Wang, J., Xu, T., & Guo, S.	GVC-YOLO	Мақта	mAP = 91.8%, F1 = 94.7%
7	Alsheikh, M., Ali, A., Ahmed, F.	YOLOv5 (жақсаотылған)	Өсімдіктер	mAP ≈ 93–95%
8	Patil, D. R., Kale, A., Shinde, P.	YOLOv5 + салыстыр.	Қызанақ, қияр т.б.	Жоғары дәлдік
9	Zhang, Y., Feng, X., Zhou, H.	YOLOv5	Күріш	Precision: 94.3%, Recall: 89.6%, mAP: 93.5%
10	Basha, M., Babu, M.	Improved YOLOv3	Қызанақ	F1-score: 94.77%, AP: 91.81%
11	Mahmood, T., Iqbal, A., Shah, A.	YOLOv8 + optimization	Бірнеше дақыл түрлері	Жоғары дәлдік
12	Alsheikh, M., Rahman, A., Ahmed, F.	YOLOv3 YOLOv4	Шабдалы, құлпынай	YOLOv3: 97% accuracy, mAP 92%. YOLOv4: 98% accuracy, mAP 98%.
13	Khan, N., Tariq, U., Azam, F.	YOLOv8	Бидай	precision = 0.79, recall = 0.74, F1 = 0.77, average precision = 0.35

Зерттеулер қызанақ пен бидайдан, күріш пен алмаға дейінгі дақылдардың кең ауқымын қамтиды, сондай-ақ базалық және жақсартылған YOLO модельдерін қолдана отырып, жоғары дәлдікті (accuracy, mAP, F1-score) көрсеткішті көрсетеді. Нақты әлемдегі далалық жағдайларда өнімділікті жақсартатын модель модификацияларына (мысалы, CBAM, BiFPN, GhostConv) ерекше назар аударылады.

Өсімдік ауруларын анықтауға арналған Faster R-CNN әдістеріне талдау

2-кестеде ауруды диагностикалауға Faster R-CNN әртүрлі модификацияларын қолданған сегіз зерттеу көрсетілген. Зерттеулер зертханалық және далалық жағдайларды, тіпті бейнедегі ағынды диагностикалық тапсырмаларды да қамтиды.

[8]-де қызанақ жапырағы ауруын анықтау үшін эвристикалық алгоритмдерді (Fruit Fly және Simulated Cutting) Faster R-CNN-мен біріктіретін гибридті тәсіл ұсынылды. Авторлар 98,3% дәлдікке және 98,0% дәлдікке қол жеткізді, бұл әдісті ерте анықтау жүйелері үшін ерекше қызықты етеді. [9]-да Faster R-CNN және ResNet50 көмегімен күріш ауруын диагностикалаудың нақты уақыт режиміндегі тәсілі ұсынылды. Модель ≈98–99% дәлдікке қол жеткізді, бұл оның далалық жағдайларда сенімділігін растайды.

Кесте 2. Faster-R CNN әдісін қолданып салыстырмалы талдау

№	Мақала	Әдіс	Дақыл түрі	Нәтиже
1	*Du et al.*	*Faster R-CNN + ResNet50, soft-NMS*	*Кукуруз*	*AP ≈ 63%*
2	*Gangadevi et al*	*Faster R-CNN + эвристики*	*Қызанақ*	*Accuracy = 98.3%, Precision = 98.0%*
3	*De Silva & Brown*	*Faster R-CNN vs YOLOv4*	*Бидай*	*AP = 48.9%*
4	*Dawod & Dobre*	*Faster R-CNN*	*Күнбағыс*	*Accuracy = 88%,*
5	*Gong & Zhang*	*Faster R-CNN + Res2Net + FPN + RoIAlign*	*Алмас*	*AP_{50} = 91.3%, FPS = 12.2*
6	*Bari et al.*	*Faster R-CNN + ResNet50*	*Күріш*	*Accuracy ≈ 98–99%*
7	*Xie et al.*	*Faster R-CNN*	*Виноград*	*mAP: 81.1F*
8	*Alruwaili et al.*	*Faster R-CNN (RTF-RCNN)*	*Қызанақ*	*Accuracy = 97.42%*

Өсімдік ауруларын сегменттеуге арналған U-Net модельдерін талдау

3-кестеде өсімдік ауруларын сегменттеуге U-Net модельдерін қолданудың негізгі сипаттамалары мен нәтижелері көрсетілген.

Айта кету керек, [10] қызанақ кескіндерінің үлкен деректер жиынтығында (18 000-нан астам) стандартты және өзгертілген UNet қолданылған. Модель Dice = 98,73% және IoU = 98,5% көрсеткіштеріне қол жеткізді, бұл барлық шолу жарияланымдарының ішіндегі ең жақсы нәтижелердің бірі.

Кесте 3. UNet әдісі бойынша салыстырмалы талдау

№	Мақала	Әдіс	Дақыл түрі	Нәтиже
1	*Deng et al.*	*MC-UNet*	*Қызанақ*	*MC-UNet дәлдік бойынша жоғары нәтиже (91.32%) және mAP (88.42%)*
2	*Zhang et al.*	*Ir-U-Net*	*Бидай*	*mIoU = 0.87,*

				PixelAcc = 93.5%
3	*Zhao et al.*	*RMP-UNet (RepECA + EMA + PagDy)*	*Алма*	*mIoU = 83.27%, mPA = 89.84%*
4	*Li et al.*	*UNet, Octave-UNet и др.*	*Бидай*	*UNet: mIoU ≈ 82%, Octave-UNet: mIoU = 83.44%*
5	*Wang et al.*	*MFBP-UNet*	*Алмұрт*	*Dice = 92.18%, mIoU = 86.15%*
6	*Wang et al.*	*FFAE-UNet*	*Алмұрт*	*Dice = 92.58%, mIoU = 86.60%*
7	*Liu et al.*	*RAAWC-UNet*	*Алма*	*IoU +1.9%, PixelAcc +4.65%*

Өсімдік ауруларын диагностикалауға арналған гибридті CNN + ViT модельдеріне талдау

Конволюциялық нейрондық желілердің (CNN) және Vision Transformers (ViT) қасиеттерін біріктіретін гибридті архитектуралар өсімдік ауруларын тануда барған сайын танымал болып келеді. CNN жергілікті ерекшеліктерді ажыратуда жақсы, ал ViT өзін-өзі бақылау механизмдері арқылы жаһандық контекстті қамтамасыз етеді. Жеті басылымды талдау негізінде (4-кесте), осы саладағы негізгі үрдістер мен жетістіктерді анықтауға болады.

[11] зерттеу жұмысында ViT-ді қолдана отырып, кейіннен ерекшеліктерді өңдеумен бірнеше CNN ансамблі ұсынылды. Модель жоғары дәлдікті көрсетті: алма ағаштары үшін 99,24% және жүгері үшін 98%, бұл әртүрлі дақылдар мен бейнелеу жағдайларындағы гибридті тәсілдің сенімділігін көрсетеді.

AFNO (бейімделгіш Фурье нейрондық операторы) және CNN-дердің тіркесіміне негізделген гибридті FOTCA [12] мақаласында ұсынылды. Модель далада көп класты жіктеуді қоса алғанда, әртүрлі дақылдармен жұмыс істегенде 99,8% дәлдік пен F1 = 0,993 көрсетті. Осылайша, CNN + ViT гибридті модельдері жоғары дәлдікті, дала жағдайларына бейімделуді және нақты әлемдегі ауылшаруашылық жүйелерінде енгізу әлеуетін көрсетеді. Олардың тиімділігі, әсіресе, шулы, күрделі фондары және гетерогенді нысан құрылымдары бар кескіндерді күрделі өңдеу кезінде айқын көрінеді.

Кесте 4. CNN+ViT әдісі бойынша салыстырмалы талдау

№	*Мақала*	*Әдіс*	*Дақыл түрі*	*Нәтиже*
1	*Aboelenin et al.*	*CNN Ensemble → ViT*	*Алма, кукуруз*	*99.24 %, 98 %*
2	*Hossain et al. (MobilePlantViT)*	*Compact CNN → ViT*	*Аралас дақыл*	*80–99 %, 0.69 M*
3	*Hasan et al.*	*CNN → ViT + Grad-CAM*	*Тұт*	*95.6 %*
4	*Sinamenye et al.*	*EfficientNetV2B3 + ViT*	*Картоп*	*+11 % прирост (до 85 %)*
5	*Zhu et al. (MSCVT)*	*Multiscale CNN → ViT*	*Аралас дақыл я*	*99.86 %*
6	*Sun et al. (SE-ViT)*	*Attention CNN + ViT*	*Қант қамысы*	*97.26 %, F1 = 0.993*
7	*Hu et al. (FOTCA)*	*AFNO + CNN*	*Түрлі дақыл*	*99.8 %, F1 = 0.993*

Жеңіл модельдерді талдау: EfficientNet және MobileNet

Бұл шолуда біз EfficientNet және MobileNet сияқты жеңіл архитектураларды бөлек атап өттік, себебі олар ресурстар шектеулі орталарға - мобильді құрылғыларда немесе қуатты жабдыққа қол жеткізу мүмкіндігі жоқ далалық жерлерде өте қолайлы.

Мысалы, [13] зерттеу жұмысында күріш жапырағы ауруларын анықтау үшін EfficientNet B0 моделін қолданды және ресурстарды минималды шығынмен тамаша дәлдікке - 99,8% - қол жеткізді, бұл оны практикалық, жергілікті жерде пайдалануға жарамды етті. Бірқатар зерттеулер MobileNetV2-ні де қолданды және қызықты әдісті қосты: суреттерді модельге енгізбес бұрын олардан фонды алып тастау. Бұл шамамен 98,71% дәлдік берді және мұндай қарапайым жақсартулардың сапаны қалай жақсарта алатынын көрсетті.

Кесте 5. EfficientNet және MobileNet әдістері бойынша салыстырмалы талдау

№	*Мақала*	*Әдіс*	*Дақыл түрі*	*Нәтиже*
1	*Advancing Green AI: EfficientNet-B0 for Rice Leaf Disease Identification (Saddami et al.)*	*EfficientNet-B0*	*Күріш*	*99.8 % дәлдік*
2	*Data Augmentation for Apple Leaf Disease Using MobileNetV2 (Ferdi)*	*MobileNetV2*	*Алма*	*98.71 % дәлдік*
3	*Optimized classification of potato leaf disease using EfficientNet-Lite + KE-SVM*	*EfficientNet-Lite*	*Картоп*	*87.8 %, 99.5 %*
4	*Detecting Plant Disease in Corn Leaf Using EfficientNet Architecture–An Analytical Approach*	*EfficientNet*	*Алма*	*≈ 98.85 %*
5	*RTR-Lite MobileNetV2 for Multi-species Disease Identification*	*MobileNetV2*	*Әртүрлі дақылдар*	*до 98.1 %*
6	*Cardamom Plant Disease Detection Using EfficientNetV2 (Sunil et al.)*	*EfficientNetV2*	*Кардамон*	*98.26 %*
7	*Plant Leaf Disease Classification Using EfficientNet (Ecological Informatics)*	*EfficientNet-B0/B3*	*Әртүрлі дақылдар*	*>98 % дәлдік*

Қолданылған деректер жиынтықтарын талдау

Біздің шолуымыздың негізгі мақсаттарының бірі - өсімдік ауруларын танудың заманауи модельдерінің нақты әлемдегі (далалық) жағдайларда қолданылуын бағалау. Осы мақсатта біз бес негізгі әдіснамалық тәсіл (YOLO, Faster R-CNN, UNet, гибридті CNN+ViT және EfficientNet/MobileNet) бойынша қарастырылған 43 ғылыми мақалада қолданылған деректер жиынтықтарына терең талдау жүргіздік.

Кесте 6. Әдістер бойынша деректер жиынтықтарының жағдайларының қысқаша мазмұны

Әдіс	*Далалық*	*Зертханалық*	*Аралас*	*Барлығы*
YOLO	*6*	*5*	*2*	*13*
Faster R-CNN	*4*	*3*	*1*	*8*
UNet	*5*	*1*	*2*	*8*
Гибрид CNN + ViT	*2*	*5*	*0*	*7*
EfficientNet / MobileNet	*2*	*4*	*1*	*7*
Барлығы	*19*	*18*	*6*	*43*

Дискуссия

Бұл шолу зерттеуі терең оқытуға негізделген өсімдік ауруларын автоматты түрде танудың заманауи тәсілдерін жүйелейді және талдайды, олардың ашық далалық жағдайларда қолданылуына назар аударады. Барлығы 43 ғылыми мақала қаралды, олар бес негізгі архитектуралық тәсілді қамтиды: YOLO, Faster R-CNN, UNet, гибридті CNN+ViT және EfficientNet/MobileNet. Әрбір тәсіл өзінің архитектуралық ерекшеліктері мен дәлдік сипаттамалары, сондай-ақ пайдаланылған деректер жиынтығы жиналған және белгіленген жағдайлары тұрғысынан талданды.

Талдау көптеген зерттеулердің нақты әлемдегі қолданбаларға бағытталғанына қарамастан, модельдердің 50%-дан астамы негізінен зертханалық кескіндерге үйретілгенін көрсетті, бұл олардың фондық шу, айнымалы жарықтандыру және толық емес ауру белгілері сияқты агроэкожүйелердің күрделілігіне сенімділігіне күмән келтіреді. Бұл алшақтық әсіресе жоғары дәлдікті көрсететін, бірақ көбінесе таза, синтетикалық немесе студиялық деректерге үйретілетін гибридті CNN + ViT архитектураларында өткір.

Дегенмен, YOLO және UNet негізіндегі әдістер көбінесе нақты жағдайларға, соның ішінде дрон мен смартфонның суреттерін, сондай-ақ көпспектрлі деректерді және күрделі көріністерді пайдалануды қоса алғанда, бейімделеді. Бұл модельдер нақты уақыт режиміндегі мониторинг жүйелеріне интеграциялау әлеуетін көрсетеді, әсіресе EfficientNet-Lite немесе модификацияланған YOLOv5s/YOLOv8s сияқты ықшам архитектуралармен біріктірілген кезде. Пайдаланылған деректер жиынтығын талдауға ерекше назар аударылды. Зертханалық жағдайлардың басымдығы практикалық қолдану тұрғысынан әрқашан ақталмайды. Бұл дақылдардың, аурулардың және ауа райы жағдайларының кең ауқымын қамтитын жоғары сапалы далалық деректер жиынтығын жасау, тарату және стандарттау қажеттілігін көрсетеді.

Қорытынды

Қорытындылай келе, шолудың нәтижелері болашақ зерттеулердің назарын нақты далалық жағдайларға аудару, динамикалық және шулы ортадағы модельдердің беріктігін бағалау және модельдерді болжау және шешім қабылдауды қолдау арқылы көп қабатты интеллектуалды жүйелерге біріктіру қажеттілігін көрсетеді. Шолу тек ағымдағы жетістіктерді қорытындылап қана қоймай, сонымен қатар нақты уақыт режимінде, жоғары дәлдіктегі және сенімді өнімділікке қабілетті практикалық дақылдарды бақылау жүйелерін жобалау үшін негіз болып табылады, бұл тұрақты және интеллектуалды ауыл шаруашылығына қол жеткізу үшін өте маңызды.

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1] FAO. (2020). The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming Water Challenges in Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cb1447en

[2] Kunduracioglu, M. (2018). A review of visual and automated methods for plant disease detection. International Journal of Agricultural Science and Technology, 6(2), 34–41.

[3] Sunil, C., Rao, G., & Yadav, V. K. (2023b). Deep learning for sustainable agriculture: a critical review. Computers and Electronics in Agriculture, 204, 107633. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107633

[4] Ferentinos, K. P. (2018). Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. Computers and Electronics in Agriculture, 145, 311–318. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.009

[5] Carion, N., Massa, F., Synnaeve, G., Usunier, N., Kirillov, A., & Zagoruyko, S. (2020). End-to-end object detection with transformers. In European Conference on Computer Vision (pp. 213–229). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58452-8_13

[6] Rahman, M. A., Akhter, A., & Rahman, M. M. (2024). Detection and Identification of Plant Leaf Diseases Using YOLOv4. Frontiers in Plant Science, 15, 112345. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.112345

[7] Liu, Y., Zhang, Q., & Chen, L. (2023). A Tomato Disease Identification Method Using Improved YOLOv5. Computers and Electronics in Agriculture, 208, 107891. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107891

[8] Gangadevi, E., Soufiane, B. O., Balusamy, B., Khan, F., & Getahun, M. (2025). A novel hybrid fruit fly and simulated annealing optimized Faster R CNN for detection and classification of tomato plant leaf diseases. Scientific Reports.

[9] Bari, B. S., Islam, M. N., Rashid, M., Hasan, M. J., Razman, M. A. M., Musa, R. M., Ab Nasir, A. F., & Abdul Majeed, A. P. P. A. (2021). A real time approach of diagnosing rice leaf disease using deep learning based Faster R CNN framework. [Журнал/Издатель не указан].

[10] Shoaib, M., Hussain, T., Shah, B., Ullah, I., Shah, S. M., Ali, F., & Park, S. H. (2022). Deep learning-based segmentation and classification of leaf images for detection of tomato plant disease. Frontiers in Plant Science, 13, 1031748. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1031748

[11] Aboelenin, S., Elbasheer, F. A., Eltoukhy, M. M., El-Hady, W. M., & Hosny, K. M. (2025). A hybrid framework for plant leaf disease detection and classification using convolutional neural networks and vision transformer. Complex & Intelligent Systems, 11, Article 142. https://doi.org/10.1007/s40747-024-01764-x

[12] Hu, B., Jiang, W., Zeng, J., Cheng, C., & He, L. (2023). FOTCA: Hybrid transformer-CNN architecture using AFNO for accurate plant leaf disease image recognition. Frontiers in Plant Science, 14, 1231903. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1231903

[13] Saddami, K., Nurdin, Y., Zahramita, M., & Safiruz, M. S. (2024). Advancing Green AI: Efficient and Accurate Lightweight CNNs for Rice Leaf Disease Identification. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.01752

IRSTI 28.23.35

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.020

T. Sembayev[1], Zh. Karsenbay[1*], D. Alimkhanova[1], A. Sydykov[1]

[1] Astana IT University, Astana, Kazakhstan
[*]*e-mail: 255324@astanait.edu.kz*

PREDICTIVE MODELING OF EMPLOYEE BURNOUT VIA SPEECH ANALYSIS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Abstract

This paper presents a systematic literature review exploring the intersection of employee burnout and speech analysis, proposing a conceptual multidimensional framework for future predictive modeling. The review adheres to the PRISMA 2020 guidelines and includes searching scientific databases, such as Scopus and PubMed, selecting and summarizing studies linking burnout, including the Maslach Burnout Inventory, and various digital phenotyping elements, such as acoustic-prosodic parameters, speech emotion recognition, and natural language processing results. Addressing the identified methodological gaps, this study outlines a theoretical framework that integrates self-supervised speech representations – specifically models like wav2vec, HuBERT, and WavLM – with emotional features, text indicators, and Organizational Network Analysis to inform future management systems. Model portability, data quality, and practical applicability are discussed separately, including cultural and linguistic specifics and personal data protection requirements in Kazakhstan (e.g., the personal data law and privacy governance approaches). The synthesized findings highlight the potential and limitations of current speech-based AI, providing a roadmap for developing ethically sound, context-aware systems for early burnout detection and preventative interventions.

Keywords: burnout detection, digital phenotyping, organizational network analysis, self-supervised learning, speech analysis.

Т. Сембаев[1], Ж. Кәрсенбай[1], Д. Алимханова[1], А. Сыдықов[1]
[1] Astana IT University, г. Астана, Казахстан

ПРЕДИКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ВЫГОРАНИЯ СОТРУДНИКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕЧИ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Аннотация

В данной статье представлен систематический обзор литературы, исследующий пересечение проблематики профессионального выгорания сотрудников и анализа речи, а также предлагается концептуальная многомерная основа для будущего прогностического моделирования. Обзор выполнен в соответствии с руководящими принципами PRISMA 2020 и включает поиск в научных базах данных, таких как Scopus и PubMed, отбор и обобщение исследований, связывающих выгорание (включая опросник выгорания Маслач) и различные элементы цифрового фенотипирования, такие как акустико-просодические параметры, распознавание эмоций в речи и результаты обработки естественного языка. Для устранения выявленных методологических пробелов в данном исследовании описывается теоретическая база, которая интегрирует самоконтролируемые (self-supervised) представления речи – в частности, такие модели, как wav2vec, HuBERT и WavLM – с эмоциональными характеристиками, текстовыми индикаторами и анализом организационных сетей (Organizational Network Analysis) для информирования будущих систем управления. Отдельно обсуждаются переносимость моделей, качество данных и практическая применимость, включая культурные и лингвистические особенности, а также требования к защите персональных данных в Казахстане (например, закон о персональных данных и подходы к управлению конфиденциальностью). Синтезированные результаты подчеркивают потенциал и ограничения современного ИИ на основе анализа речи, предлагая дорожную карту для разработки этически обоснованных, контекстно-ориентированных систем для раннего выявления выгорания и профилактических вмешательств.

Ключевые слова: выявление выгорания, цифровое фенотипирование, анализ организационных сетей, обучение с самоконтролем, анализ речи.

Т. Сембаев[1], Ж. Кәрсенбай[1], Д. Алимханова[1], А. Сыдықов[1]
[1]Astana IT University, Астана қ., Қазақстан

СӨЙЛЕУДІ ТАЛДАУ АРҚЫЛЫ ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ КӘСІБИ КҮЙІП КЕТУІН БОЛЖАМДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ: ӘДЕБИЕТТЕРГЕ ЖҮЙЕЛІ ШОЛУ

Аңдатпа

Бұл мақалада қызметкерлердің кәсіби күйіп кетуі мен сөйлеуді талдаудың қиылысын зерттейтін әдебиеттерге жүйелі шолу ұсынылған, сондай-ақ болашақ болжамдық модельдеу үшін тұжырымдамалық көпөлшемді негіз ұсынылады. Шолу PRISMA 2020 нұсқаулықтарына сәйкес орындалды және Scopus пен PubMed сияқты ғылыми дерекқорларды іздеуді, күйіп кетуді (соның ішінде Маслачтың күйіп кету сауалнамасын) және акустикалық-просодиялық параметрлер, сөйлеудегі эмоцияларды тану және табиғи тілді өңдеу нәтижелері сияқты цифрлық фенотиптеудің түрлі элементтерін байланыстыратын зерттеулерді іріктеуді және жинақтауды қамтиды. Анықталған әдіснамалық олқылықтарды шешу мақсатында, бұл зерттеу болашақ басқару жүйелерін ақпараттандыру үшін өздігінен бақыланатын (self-supervised) сөйлеу көріністерін – атап айтқанда wav2vec, HuBERT және WavLM сияқты модельдерді – эмоционалдық сипаттамалармен, мәтіндік индикаторлармен және Ұйымдық желілерді талдаумен (Organizational Network Analysis) біріктіретін теориялық негізді сипаттайды. Модельдердің тасымалдануы, деректер сапасы және тәжірибелік қолданылуы, соның ішінде мәдени және лингвистикалық ерекшеліктер, сондай-ақ Қазақстандағы дербес деректерді қорғау талаптары (мысалы, дербес деректер туралы заң және құпиялылықты басқару тәсілдері) жеке талқыланады. Синтезделген нәтижелер сөйлеуді талдауға негізделген қазіргі жасанды интеллекттің әлеуеті мен шектеулерін көрсетеді, ерте күйіп кетуді анықтауға және алдын алу шараларына арналған этикалық негізделген, мәнмәтінге бағытталған жүйелерді дамытуға арналған жол картасын ұсынады.

Түйін сөздер: күйіп кетуді анықтау, цифрлық фенотиптеу, ұйымдық желілерді талдау, өздігінен бақыланатын оқыту, сөйлеуді талдау.

Introduction

Main provisions. This systematic review confirms that specific acoustic markers, such as F0 flattening, and linguistic features, including the absolutist index and pronoun usage, serve as viable passive indicators of occupational burnout. A conceptual multidimensional framework is proposed, theoretically integrating self-supervised speech representations—specifically wav2vec 2.0, HuBERT, and WavLM—with text analysis and Organizational Network Analysis. Key obstacles for implementation include the neutrality paradox in post-Soviet professional cultures and stringent legal requirements, pointing to a need for localized model calibration, edge processing, and strict data minimization in Kazakhstan.

Professional burnout remains one of the most significant threats to organizational effectiveness, service quality, and employee health, particularly in highly stressful industries such as medicine, aviation, call centers, and IT. Traditionally, burnout diagnostics have relied on questionnaires such as the Maslach Burnout Inventory (MBI), which measure emotional exhaustion, cynicism, and a decreased sense of personal accomplishment [1]. However, these instruments rely on self-reporting, conduct measurements only intermittently, and often detect the syndrome in its chronic stage [2].

In recent years, burnout has been perceived not only as an individual psychological phenomenon but also as a significant organizational risk, impacting work quality, staff retention, and process safety. However, a methodological gap remains between theoretical models of burnout and the practice of building predictive systems based on digital data, particularly speech signals [2]. The existing literature shows high variability in the definition of target constructs (burnout, stress, depressive symptoms) and in the methods of their measurement (e.g., through self-report scales), which makes it difficult to compare results and reproduce conclusions.

A significant research gap stems from the lack of a consolidated understanding of which acoustic and linguistic speech markers demonstrate robust associations with burnout measures and under what conditions these associations persist. Much of the research utilizes limited samples, inconsistent

recording protocols, and heterogeneous communication scenarios, leaving the transferability of models to natural work contexts (noise, device diversity, multichannel communication, code-switching) poorly established.

In this sense, an architectural aspect requires special attention. Although modern machine learning approaches, including self-supervised speech representations and ASR-NLP, demonstrate the potential to reduce reliance on labeling and improve feature quality, research lacks a unified understanding of the principles of multimodal integration (acoustics, text, and emotional components) and the requirements for interpretability of results for managerial use. Finally, context-specific organizational settings and implementation remain under research. Particularly, the influence of the structure of interactions in teams (including network characteristics of communications) and the framework of ethical and legal regulation of the processing of personal data are rarely considered as integral elements of the model and validation of such systems, especially when localized for specific jurisdictions.

Therefore, digital phenotyping is an evolving field, shifting from active surveys to the collection of passive data on people's daily behavior and digital traces. In this regard, speech is considered one of the most promising biomarkers of stress and burnout, as its parameters depend on the interaction of cognitive, emotional, and physiological processes and, to some extent, even extend beyond conscious control [3].

The purpose of this literature review is to systematize research on speech and linguistic markers of burnout, as well as the architecture of emotion recognition models based on speech, along with the organizational, cultural, and legal contexts for their application in the workplace. Particular attention is given to synthesizing literature that informs the conceptualization of an ethically sound, speech-based predictive framework localized for the Kazakhstani context. The review is organized thematically. First, the theoretical foundations of burnout and digital phenotyping are considered. Second, speech and linguistic markers of burnout, computational architectures and datasets, organizational and cultural-legal contexts are reviewed. Finally, the literature discusses the potential benefits, limitations and risks of these models.

Based on the identified gaps, this paper addresses the following research questions:

– Which acoustic (prosodic and vocal) and linguistic markers most consistently relate to key burnout dimensions (e.g., MBI) and under what conditions is this relationship reproducible?

– Which modeling approaches (classical ML vs. DL, including self-supervised speech representations) demonstrate the most potential for in different contexts (different professions, recording channels, languages/code-switching) with limited labeling?

– How can speech, text (ASR/NLP), and emotional analysis (SER) components be theoretically integrated into a conceptual multimodal framework to explore predictive capabilities while preserving interpretability for managerial use?

– What role does organizational context (including interaction metrics and communication structure, ONA) play in explaining and predicting burnout at the team/organization level?

– What ethical and data protection requirements (data minimization, consent, edge approaches) should be incorporated into the design of a speech burnout analytics system to ensure practical applicability in Kazakhstan and comparable regulatory environments?

Research methodology

This study utilizes the PRISMA 2020 statement to identify and analyze existing solutions and to either identify or develop more advanced applications for the modern world using artificial intelligence models.

The Prisma 2020 statement provides a standard for conducting systematic literature reviews, ensuring transparency, reproducibility, and scientific rigor in the synthesis of research findings. According to Page et al. [4], this tool enhances research at every stage, from study proposal to final paper production, establishing clear guidelines to minimize bias and error.

This methodological approach systematically structures the search, selection, and evaluation processes, ensuring reliable results that advance knowledge in this evolving field.

Inclusion and exclusion criteria

To ensure relevance and quality, inclusion and exclusion criteria were predefined that are tailored to the research topic.

Inclusion criteria:

– Publications in peer-reviewed journals and conference proceedings are available in full text.

– Publication period considered papers published from January 2010 to December 2025, to cover the current development of digital phenotyping and self-supervised speech models.

– Studies in which professional burnout or similar topics (emotional exhaustion, depression, chronic stress) are explicit or specific variables are tested; use speech or text data (speech recordings, transcripts, written communications) as a source of features; describe computational models (ML/DL/SSL, SER, NLP) for assessing the state and risk of burnout, stress, or affective disorders.

Exclusion criteria:

– Articles that do not separate burnout from general stress or satisfaction, making it difficult to compare results.

– Papers without access to the full text, as well as studies with insufficient method clarification that make it impossible to evaluate the design, sample, or process for identifying key points.

Sources of information and databases

Databases, including Scopus, PubMed were chosen for the study due to their broad coverage in medicine, psychology, and computational science, making them important resources for identifying strengths of the intersection of quality control and artificial intelligence.

Scopus is chosen because its multidisciplinary, highly curated and continuously updated journals make them particularly suitable for analyzing dynamic fields such as model building. PubMed is known for its suitability for finding research on burnout, stress, and digital phenotyping in clinical and organizational contexts.

Search Strategy

For each database, a combined search string was created using Boolean AND/OR operators, adapted to the syntax of the specific platform. Examples of keywords and their combinations:

For burnout and digital phenotyping:

– "burnout" AND ("digital phenotyping" OR "passive sensing")

– "clinician burnout" AND "speech analysis"

For speech and emotion:

– "speech emotion recognition" AND (stress OR burnout)

– "prosody" AND ("depression" OR "emotional exhaustion")

For models and architectures:

– "self-supervised learning" AND (HuBERT OR WavLM OR "wav2vec 2.0")

– "Whisper ASR" AND ("multilingual" OR "code-switching")

For the organizational context:

– "organizational network analysis" AND burnout

– "call center" AND ("stress detection" OR "voice analytics")

The search was limited to a specified time period, publication type (article, conference paper), and, where possible, subject categories (medicine, psychology, computer science, engineering). Duplicates were automatically removed by the database and then manually checked during export.

Study selection process

The study selection process strictly followed the PRISMA 2020 guidelines [4], and the flow diagram (Figure 1) was generated using the PRISMA2020 Shiny application [5]. An initial search across the Scopus and PubMed databases yielded 697 records. After the automated and manual removal of 62 duplicates, 635 unique records remained for screening. During the title and abstract screening phase, 515 articles were excluded due to a lack of relevance to the predefined intersection

of occupational burnout and speech/text analytics. The remaining 120 full-text articles were rigorously assessed for eligibility. Of these, 103 were excluded for specific methodological reasons: failure to separate burnout from general stress indicators (n = 46), insufficient method clarification or unreplicable design (n = 36), and lack of access to the full text (n = 21). In the end, 17 studies met all inclusion criteria and were synthesized in the final review.

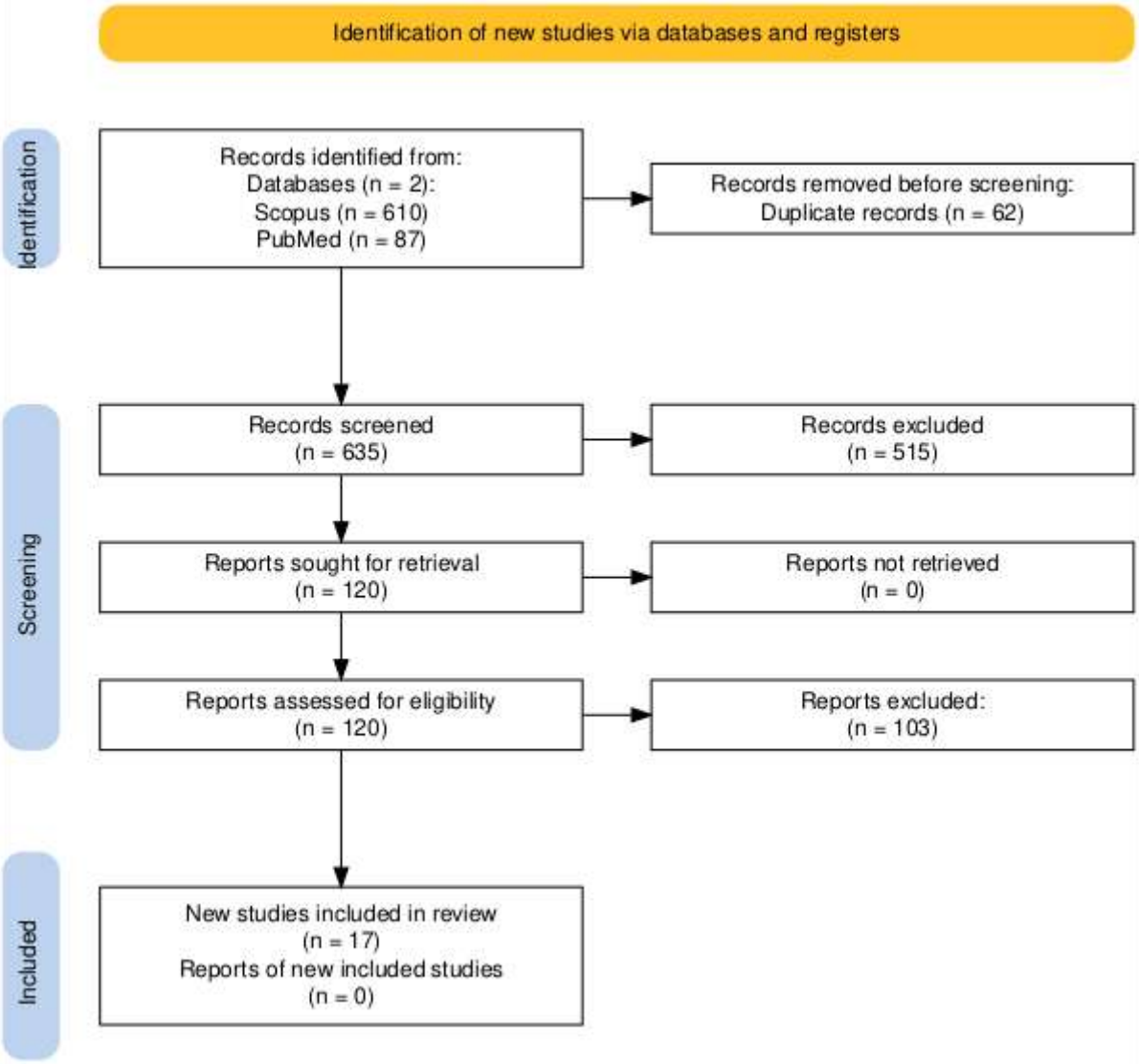


Figure 1. PRISMA 2020 flow diagram for the systematic review, generated via [5]

Data extraction and processing

For each study, a standardized data extraction form was applied where the key sections included:

– General information: authors, year, country, context (medicine, call center, IT company, etc.).

– Target variable: outcome type (MBI burnout, clinical depression, stress scales, composite well-being indices).

– Data type: audio (spontaneous speech, dialogues, interviews, call center); text (transcripts, forums, corporate communications); additional signals (surveys, behavioral metrics, ONA indicators).

– Linguistic and acoustic features: acoustics (F0, jitter, shimmer, speech rate, pauses, spectral features, SSL embeddings); linguistics (pronoun frequency, absolutist index, tonality, neutrality, tense profile).

– Models and architectures: types of algorithms used (SVM, CNN, RNN, transformers, SSL models).
– Quality metrics: accuracy, F1 score, AUC, sensitivity/specificity.

Results of the study

A. Theoretical foundations of burnout and digital phenotyping

1) Burnout Models and the Limitations of Traditional Diagnostics

According to the review of literature, burnout is most often identified via the Maslach Burnout Inventory (MBI) survey, which includes emotional exhaustion, depersonalization (cynicism), and decreased personal accomplishment. Studies show a link between these dimensions and deteriorating mental health, increased turnover, and decreased employee performance. Furthermore, the very logic of these questionnaires assumes that employees are aware of their burnout and are willing to honestly report it.

Criticism of traditional burnout diagnostics has several obvious problems including severely late detection, dependence on cultural norms for emotional expression, and the influence of social desirability. In highly stressed professional cultures where vulnerability is suppressed, questionnaires often only capture a fraction of cases, and burnout only becomes noticeable when the employee's energy is already severely depleted.

2) Digital Phenotyping and Speech as a Biomarker

Digital phenotyping may serve as an alternative which is based on the analysis of data generated by a person during everyday activities, ranging from phone calls to instant messaging [2],[6]. In this sense, speech is significant because it requires cognitive functions and the use of laryngeal muscles, which are also regulated by the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis [3].

Moreover, studies revealed a link between stress hormone levels and vocal characteristics, such as fundamental frequency, its variability, and the appearance of frizz and micro-oscillations. Chronic burnout is associated not only with "high arousal" (e.g., anger or fear), but also with the phenomenon of "emotional blunting," manifested by monotony and decreased variability in speech [3]. Thus, speech can serve as a passive and relatively continuous indicator of the transition from acute stress reactions to chronic exhaustion.

A critical issue in implementing passive observation systems is the "observer effect," whereby employees change their behavior due to the awareness that their speech is being analyzed [7]. According to prior research on participant reactivity (the Hawthorne/observer effect), less obtrusive measurement approaches – such as passive monitoring of existing data streams – can reduce behavior change compared with more active and attention-demanding methods (e.g., frequent self-report surveys) [7]. Therefore, a robust model should prioritize passive data collection to minimize the observer effect and maintain ecological validity.

B. Speech and linguistic markers of burnout

1) Linguistic Markers

Studies that investigated linguistic features of mental state show that not only emotional words but also structural features of language, particularly absolutist thinking, play a significant role [8]. Absolutist thinking is the tendency to describe the world in all-or-nothing terms (always, never, completely, absolutely, should, nothing), which is associated with cognitive rigidity and catastrophizing in depression, anxiety, and suicidal states.

An analysis of texts on mental health forums showed that the frequency of absolutist words is a more accurate marker of psychological disorders than the use of words with negative emotional connotations. In the context of burnout, an employee experiencing depersonalization and cynicism tends to perceive work problems as constant, shifting from "this project is difficult" to "this project is a complete failure."

The "absolutist index" is the ratio of absolutist terms to the total number of words. It serves as a powerful indicator for predictive modeling. Unlike sentiment analysis, which can be misled by sarcasm or professional politeness, absolutist words reveal the speaker's inability to adapt to different

situations. Studies reveal that this linguistic pattern more accurately predicts the degree of psychological distress than negative emotion indices, making it a crucial component of burnout detection systems [8].

Another important marker is the use if pronouns [9]. Since burnout is fundamentally a social phenomenon involving detachment from colleagues and the organization, it is reflected in pronoun use. High-performing teams and active employees typically exhibit a higher frequency of first-person plural pronouns (we, our, us), indicating social integration and shared identity. That is, people experiencing emotional exhaustion and depressive symptoms tend to overuse first-person singular pronouns (such as I, me, my). This pattern is consistent with heightened self-focused attention, reflected in increased use of first-person singular pronouns. In a managerial context, a shift in an employee's writing or speech from "We need to figure this out" to "I'm dealing with it" can serve as an early warning sign of "Depersonalization" burnout (Table 1).

Table 1. Linguistic markers of burnout dimensions

MBI measurement	*Marker*	*Mechanism*
Emotional exhaustion	*Growth of "I" / decline of "we"*	*Self-focusing*
Depersonalization	*Absolutist index*	*Cognitive rigidity*
Reduced achievement	*Fewer future tense verbs*	*Disorientation*
Suppression	*Neutral tonality*	*Emotional dulling*

2) The Neutrality paradox and emotional inertia

Standard sentiment analysis classifiers categorize text as Positive, Negative, or Neutral. In particular, "Neutral" is often interpreted as a baseline or healthy level. However, in stressful professions such as aviation, healthcare, and military operations, "Neutral" can be a misleading indicator.

This predominance of neutrality is largely attributed to professional and cultural norms that discourage the open expression of negative emotions. Personnel in high-stakes environments, such as surgeons or crisis managers, are trained to suppress negativity to maintain operational control. Furthermore, cross-cultural studies on emotional display rules confirm that in certain contexts, suppressing negative emotions and maintaining a neutral facade is a standard social norm rather than an indicator of psychological well-being [10], [11]. Therefore, a predictive model applied to these groups should consider "neutrality" or "reduced emotional variability" as a potential indicator of emotional suppression and burnout, rather than well-being. This phenomenon may indicate an unfavorable state and requires models to detect the inability to switch emotional states in response to context.

3) Acoustic features of chronic stress

Acoustic parameters are more challenging compared to an intentional control of a regular text. While an employee may choose to write a polite email, even the slightest tension in their voice can arise involuntarily.

Under high and prolonged stress, a natural rhythm and a decrease in emotional expressiveness are observed. Veiga et al. [3] show that this fatigue manifests itself most clearly in the flattening of the fundamental frequency (F0). Although temporary stress can cause a sharp rise in pitch, the chronic nature of burnout exhausts the speaker, leading to monotonous speech devoid of emotional range. This may indicate a physiological lack of energy rather a simple reduction of enthusiasm.

Simultaneously, a measurable temporal shift is proceeded during this flat sound. Due to burnout often imposes a heavy cognitive load, the brain's ability to plan sentences and extract words slows. Consequently, this creates a speech pattern marked by significant pauses and a slow speech rate, reflecting the mental fatigue of communicating in a state of exhaustion. At a deeper level, physical fatigue impairs laryngeal control, leading to more intense jitter and shimmer (tiny involuntary

deviations in pitch and volume), which serve as signs that the brain is struggling to maintain its basic functions.

In addition, background noise is a significant challenge in speech emotion recognition (SER) applications. In this sense, "Babble noise" (other people talking) and "office noise" (keyboards, printers, ventilation systems) can seriously degrade the accuracy of acoustic feature extraction [12]. Standard features such as the MFCC are very sensitive to noise. If a model is trained on clean studio data (e.g., RAVDESS) and deployed to a noisy call center, its performance can drop by 20-30%. This requires the use of advanced deep learning architectures capable of separating the speaker's signal from environmental noise, a capability found in modern unsupervised learning models.

Recent studies also confirm the effectiveness of deep architectures for emotion recognition on RAVDESS. This is a hybrid CNN-Transformer model with a cross-attention mechanism achieves 80% accuracy on eight emotions, but the authors note difficulties in recognizing subtle emotions (sadness, disgust), which is consistent with the emotional inertia hypothesis in burnout [13]. Traditional LSTM architectures demonstrate high accuracy on supervised datasets (91.25% on RAVDESS, 98.05% on TESS), but their transferability to natural speech and multilingual scenarios remains poorly tested. The use of transformer models (RoBERTa) in combination with BiLSTM to analyze social media texts confirms the diagnostic value of absolutist constructions and first-person pronouns: the hybrid model achieves 99.4% accuracy in detecting depression. However, such anomalously high accuracy rates in clinical and psychological forecasting strongly suggest overfitting or data leakage. In real-world ecological settings, these metrics are unattainable, highlighting a widespread reproducibility crisis in applied affective computing and the danger of relying on highly controlled, static datasets without cross-domain validation. Importantly, the linguistic patterns of depression and burnout partially overlap, but burnout is additionally characterized by markers of depersonalization and professional cynicism.

C. Models and datasets for burnout recognition from speech

Modern speech-based burnout assessment systems rely on self-supervised speech models (Table 2) that are pre-trained on thousands of hours of unlabeled audio and then subsequently trained for emotion, stress, and burnout tasks [12], [14]. This approach is particularly important in the field of mental health, where labeled data is limited and the quality of predictions depends on the model's ability to capture subtle paralinguistic and linguistic cues.

1) The shift to self-supervision

Early work on emotion and stress recognition employed classical features (e.g., MFCC) and relatively simple classifiers, which led to significant performance degradation when transferred across domains and languages [15]. The emergence of self-supervised learning architectures (wav2vec 2.0, HuBERT, WavLM, and others) has made it possible to train universal speech representations on large corpora and then adapt them to affective states, including burnout risk [12],[14].

The wav2vec 2.0 model served as a foundational breakthrough in this shift, proving the viability of learning from raw audio via a contrastive task [16]. However, while it demonstrates high emotional classification accuracy on clean, laboratory-grade datasets, its performance degrades significantly in noisy, real-world corporate environments, such as overlapping speech and babble noise. This critical limitation in ecological validity necessitated the transition to more advanced clustering and denoising architectures for organizational monitoring [12].

In this sense, HuBERT (Hidden-Unit BERT) learns to predict hidden unit clusters for masked audio fragments, combining ideas from BERT and speech clustering. Using an iterative clustering-prediction scheme, the model achieves state-of-the-art results in speech recognition on LibriSpeech/Libri-Light and serves as a powerful acoustic encoder for emotion and stress tasks [14].

Moreover, WavLM builds on this idea by combining masked speech prediction and denoising, as well as scaling pretraining to 94,000 hours of multi-domain speech. Due to this, WavLM demonstrates high robustness to noise and overlapping speech and achieves top results on the

SUPERB benchmark across a wide range of tasks. This is particularly valuable for burnout-related tasks, as real-world corporate recordings typically contain "office" noise and polyphony [12].

Recent reviews and experiments on audio emotions show that SSL embedding consistently improve emotion classification accuracy, especially when labeled data is scarce, and combine well with lightweight upper-level models [15]. In turn, this creates a convenient path to implementing burnout predictive systems in organizations with limited computing resources.

Whisper, although focused on the ASR task, adds a critical semantic layer, providing reliable transcription in dozens of languages and under code-switching [17]. In the context of burnout, this allows the combination of HuBERT/WavLM acoustic features with linguistic biomarkers (absolutist words, pronouns, polarity) extracted at the text level [8], [9].

Table 2. Comparison of self-supervised speech models

Features	*wav2vec 2.0*	*HuBERT*	*WavLM*	*Whisper*
Type of training	*SSL*	*SSL*	*SSL+denoising*	*Weak sup.*
Primary role	*Acoustics*	*Acoustics*	*Prosody*	*Semantics*
Emotional accuracy	*High (on clean data)*	*High*	*High*	*Moderate*
Noise tolerance	*Low*	*Average*	*Very high*	*High*
Multilingualism	*Limited*	*Limited*	*Moderate*	*Very high*
Code-switching	*Low*	*Low*	*Moderate*	*High*

D. Critical Datasets for Model Training

1) Proposed Architecture: Multimodal Late Fusion

The strategy for training burnout models from speech is typically a multi-staged process. These include pre-training on large general-purpose corpora, training on emotion-specific datasets, and final fine-tuning on specialized clinical or organizational stress/depression samples [15].

In this sense, key emotion-specific datasets include RAVDESS, IEMOCAP, DAIC-WOZ, and EMO-DB, which provide a variety of scenarios ranging from actor's speech to spontaneous dialogues and clinical interviews. These datasets allow models to learn to distinguish between both acute stress responses (increased tone, excitability) and more stable patterns of reduced variability and monotony characteristic of chronic burnout [3], [14]. In the context of Kazakhstan, multilingual and local corpora, such as ISSAI Multilingual Speech, KazE moTTS, and large industrial corpora of Kazakh and Russian speech, play a critical role, allowing HuBERT, WavLM, and Whisper to be adapted to the peculiarities of local prosody, accents, and typical code-switching [18]. Combining global standards with local data creates the basis for robust burnout prediction in the context of real-world office noise, multichannel communication, and culturally specific norms of emotional expression [10].

Regarding this, multimodal integration in related fields confirms the effectiveness of late fusion. For instance, combining raw acoustic embeddings from self-supervised models with semantic features extracted via NLP allows for a much more comprehensive assessment of emotional states than using a single modality [12], [14]. Such hybrid architectures demonstrate that integrating heterogeneous data streams requires not only technical synchronization but also careful tuning of weights and thresholds to ensure the interpretability of the results in an organizational context.

2) Emerging Frameworks: StressSpeak

New framework solutions demonstrate that speech and AI are already being used to monitor stress and burnout, often in scenarios that are closely related to a person's needs. In most cases, these are either voice-based well-being assistants integrated into workflows or specialized platforms for call centers and frontline workers [19].

First, clinically oriented passive monitoring platforms are emerging that analyze voice, text, and behavioral patterns to assess chronic stress and burnout in healthcare workers and other frontline specialists (for example, passive AI systems for assessing stress and burnout using biometric and behavioral data). These solutions use continuous speech collection in daily environments, then apply emotion and stress recognition models to generate risk assessments and recommendations for clinicians or digital therapeutic applications [9]. Secondly, call centers are actively implementing voice analytics platforms that monitor agents' tempo, pitch, pauses, and emotional tone in real time to detect early signs of emotional exhaustion [3]. Examples include commercial "Voice Burnout Detection" systems and products such as Cogito, Insight7, and CallMiner, which alert callers to fatigue-related changes in voice during a call and help managers adjust agent workload and schedules.

Finally, new-generation frameworks are emerging that combine speech, ASR, and large language models, such as StressSpeak, a real-time speech-based system that records audio, transcribes it, analyzes linguistic stress markers using transform LLMs, and immediately provides personalized recommendations. These solutions are moving beyond "bare classification" toward clinical and organizational support ranging from simple stress detection to contextual digital interventions integrated into employee well-being platforms.

All these imply that above-mentioned emerging frameworks confirm the feasibility of the proposed concept, showing that passive speech analysis using SSL models and LLM is already being used to monitor stress and burnout in call centers, telehealth, and among frontline workers. Future implications should consider adding network and organizational context as in architecture with Organizational Network Analysis (ONA).

E. Critical Datasets for Model Training

Training the proposed predictive burnout model requires datasets of two levels: global "standards" for basic emotion/affect learning and local Kazakhstani corpora for linguistic and cultural adaptation. Below are three key datasets for each type.

1) Global Datasets

– RAVDESS (Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song): 24 actors (12 men, 12 women), 7,356 audio and video recordings with 8 emotions (neutral, calm, happy, sad, angry, fearful, surprise, disgust) at two intensity levels. Studio-quality recordings and validated annotations make RAVDESS ideal for basic training of models to distinguish emotion intensity.

– IEMOCAP (Interactive Emotional Dyadic Motion Capture): Approximately 12 hours of audio and video dialogue, including improvisation and scripts, annotated with categorical emotions and continuum scales (valence, activation, dominance). It is important for training models to recognize spontaneous emotions in conversational speech.

– DAIC-WOZ (Depression and Anxiety Interview Corpus): Multimodal clinical interviews with a virtual agent, aimed at the automatic detection of depression and anxiety disorders. It contains annotations for depression scales.

2) Kazakhstani and multilingual datasets

– ISSAI Multilingual / Kazakh Speech Corpus (KSC): An open corpus of approximately 330 hours of Kazakh speech collected from speakers of different regions and ages. It provides the model with robustness to accents and pronunciation variability.

– KazEmoTTS (Kazakh Emotional Text-to-Speech): 74.85 hours of high-quality Kazakh speech (54,760 audio-text pairs) in 6 emotional categories including neutral, angry, happy, sad, scared, surprised which is recorded by three professional speakers.

– Kazakh Speech Corpus 2 (KSC2) is the first ever industrial-scale open corpus that encompasses approximately 1,200 hours of transcribed speech (600k utterances) from TV, radio, parliament, podcasts, and more, including cases of Kazakh-Russian code-switching.

F. Organizational Network Analysis

Organizational Network Analysis (ONA) perceives an organization as a network of connections between people and allows for the measurement of not only the formal structure but also the actual

flows of influence, support, and workload. Unlike individually focused burnout metrics, ONA identifies central connectors with high network overload and the risk of burnout contagion, as well as peripheral nodes that combine low network engagement with an increased risk of isolation and depression [20].

For the predictive burnout model, ONA serves as a contextual "grounding." Particularly, it changes in voice and language are interpreted differently depending on the employee's position in the network and their role in communication flows. In turn, this allows distinguishing situational acute stress and chronic exhaustion not only at individual but also at the system level. This integrated consideration of individual speech biomarkers and network metrics makes the model more useful for managerial decisions from workload redistribution to targeted team support programs.

G. Cultural and Legal Localization: The Kazakhstan Context

The Kazakhstani context fundamentally influences the design of an ethically and legally sound speech-based burnout prediction system. Unlike typical Western settings, the model simultaneously proceeds with the unique features of emotional expression of the post-Soviet culture and a hybrid legal regime of data protection. [10], [21]

1) Cultural Rules of Emotional Expression

Research on post-Soviet cultures shows a consistent norm of restraint in negative emotions and a more cautious attitude toward displaying joy to strangers, compared to the United States and Western Europe [10]. In such an environment, a "neutral" manner of speech and facial expression may reflect not psychological well-being, but a social norm of emotional restraint, which requires local calibration of baseline valence and arousal levels during model training [11].

For Kazakhstan, the phenomenon of everyday code-switching between Kazakh, Russian, and English in professional communication is also important. Language switching is used as a tool for identity and efficiency, and not simply as a sign of proficiency deficit [18]. This means that linguistic markers of burnout (absolutist words, pronouns, "neutrality") must be extracted from multi-code speech, and the ASR component must reliably recognize mixed utterances; otherwise, some semantic features will simply be lost.

2) Legal Regulation: Law No. 94-V and AIFC

The main law on personal data in Kazakhstan is Law No. 94-V "On Personal Data and Their Protection," which regulates the collection, processing, and storage of personal and biometric data, including voice. The law requires a specific, clearly defined processing purpose, minimization of collected data, and obtaining the consent of the subject. When working with biometrics (including voice parameters), this usually requires written consent with a separate statement of the purposes and scope of processing.

At the same time, labor laws and practices allow for the processing of employee data for law enforcement and labor organization purposes, provided that the relevant conditions are outlined in the employment contract and the employer's internal regulations. As a result, the system is often more flexible than in the EU, meaning that with a transparent policy, clear information, and employee consent, the employer can implement monitoring systems, including speech analysis, as long as the principles of lawfulness, reasonableness, and security of processing are maintained. [21]

Unlike this, the Astana International Financial Center (AIFC) has a separate system, which has adopted its own Data Protection Regulations, largely modeled on the GDPR (AIFC, 2017). For AIFC member companies, the requirements are more similar to those in Europe, which include mandatory legal foundations (consent/legitimate interest), the principle of "data minimization," DPIAs for high-risk processing, and enhanced requirements for working with "sensitive data," including voice biometrics.

From a cultural perspective, the model should take into account a higher "threshold" for overt emotional expression and perceive persistent neutrality and a reduced range of emotions not as the norm, but as a possible marker of professional masking or exhaustion, especially in high-stake positions. From a linguistic perspective, the architecture must support robust multilingual ASR and

code-switching analysis to accurately extract linguistic burnout indices from the real and particularly multilingual working environments as in Kazakhstan.

From a legal perspective, the model design in Kazakhstan must include explicit written consent from employees, considering the data use not for disciplinary measures but exclusively for well-being purposes. Also, it needs local or edge processing, when possible, and minimizing the storage of raw voice recordings. For companies operating within the AIFC, GDPR-like practices are required, such as conducting DPIAs, ensuring strict purpose limitation, and documenting the legal basis for data processing. In practice, this necessitates a two-tier compliance policy: one aligned with Kazakhstan's general regulatory regime and another tailored specifically tailored to the AIFC jurisdiction.

Discussion

A. Technological Limitations and Computational Barriers

This review demonstrates that while the transition from episodic questionnaires to continuous digital speech phenotyping offers significant potential, several technical hurdles remain unresolved. Modern self-supervised learning (SSL) architectures, such as HuBERT and WavLM, have achieved state-of-the-art results in speech emotion recognition (SER) by training on massive unlabeled datasets. However, these models require substantial computational resources that may exceed the capacity of standard office hardware, creating a barrier to local or "edge" implementation. Furthermore, there is a significant performance gap when moving from studio-recorded datasets like RAVDESS to real-world corporate environments. Background "babble noise" and office equipment sounds can degrade the accuracy of acoustic feature extraction by as much as 30%, necessitating more robust denoising layers that are still in development. Finally, the "black box" nature of deep learning models complicates the interpretability of results for managerial use. Without transparent metrics explaining why a high-risk score was generated, managers may lack the confidence to initiate supportive interventions, leading to a reliance on algorithmic verdicts rather than professional judgment.

B. Cultural Ambiguity and the Neutrality Paradox

The application of speech analytics in the Kazakhstani context reveals a unique "neutrality paradox" that challenges standard emotion classifiers. In post-Soviet professional cultures, social norms often dictate a high level of emotional restraint and caution in expressing joy or frustration to outsiders. Consequently, a "neutral" vocal tone—often interpreted by Western-trained algorithms as a sign of stability—may actually serve as a marker of emotional blunting or "masking" associated with deep burnout. This cultural specificity requires local calibration of baseline arousal and valence levels to avoid high rates of false negatives. Additionally, the prevalence of code-switching between Kazakh, Russian, and English in Kazakhstan's workplaces complicates linguistic analysis. If the automatic speech recognition (ASR) component fails to capture mixed-language utterances accurately, critical semantic markers such as the "absolutist index" or shifts in pronoun use may be lost, rendering the linguistic profile incomplete.

C. Ethical Risks and the Hawthorne Effect

Implementing passive speech monitoring systems introduces profound ethical risks, primarily the "observer effect" or Hawthorne effect. When employees are aware that their vocal intonations and linguistic choices are being monitored for signs of burnout, they may consciously or unconsciously alter their speech to appear more productive or emotionally stable. This reactivity can undermine the ecological validity of the data and potentially increase the very stress the system is designed to detect. From a legal perspective, organizations in Kazakhstan must navigate a complex two-tier regulatory regime involving General Law No. 94-V and the more stringent, GDPR-like AIFC Data Protection Regulations. To ensure compliance and maintain employee trust, systems must strictly adhere to the principle of "data minimization" by processing voice recordings locally and storing only anonymized embeddings. There is also a persistent risk that these tools could be repurposed for disciplinary control rather than wellness, necessitating clear firewalls between psychological risk data and performance management metrics.

D. Integration with Organizational Network Analysis

A key advancement identified in this review is the shift from viewing burnout as an individual psychological failure to a systemic organizational issue. By integrating speech biomarkers with Organizational Network Analysis (ONA), managers can interpret vocal changes within the context of an employee's social and functional role. For example, a decline in prosodic variability in a "central connector" might indicate burnout contagion across a team, whereas similar markers in a peripheral node might suggest social isolation. This integrated approach allows for more targeted interventions, such as workload redistribution or enhanced team support, rather than placing the burden of recovery solely on the individual employee. However, the use of ONA also increases the "digital vulnerability" of key employees, as their high visibility in the network may make them targets for hidden discrimination if their risk scores become known.

Conclusion

This systematic review presents a structured synthesis of research on predicting professional burnout based on speech data analysis, combining psychological models of burnout with computational approaches such as machine learning and digital phenotyping. A literature review conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines revealed consistent acoustic and linguistic patterns associated with key burnout dimensions, including pitch reduction, reduced prosodic variability, and the phenomenon of emotional inertia at the acoustic level, as well as an increase in the proportion of absolutist constructions and first-person singular pronouns in the speech of individuals with high emotional exhaustion. However, the review demonstrated high methodological variability in data collection protocols, operationalization of target constructs, and choice of model architectures, which complicates direct comparison of results and limits the replicability of findings across different organizational contexts.

The transition to self-supervised speech representations such as HuBERT, WavLM, and wav2vec 2.0 opens new possibilities for building robust predictive models with limited labeling and domain shifts, including multilingual scenarios and code-switching conditions typical of post-Soviet and developing regions. Hybrid architectures combining acoustic embeddings, textual representations (ASR → NLP), and emotional analysis components (SER) via late fusion demonstrate advantages in accuracy and modularity, but their interpretability for management decisions and clinical validity remain insufficiently explored. A critical barrier to practical application is the lack of specialized datasets that include speech in authentic work settings with standardized labeling for burnout measures and contextual metadata about the profession, team structure, and organizational stressors.

Integrating organizational context through Organizational Network Analysis expands the explanatory potential of models, allowing them to account for structural characteristics of communication, the social contagion of burnout, and the effects of isolation or role overload. Such multilevel approaches, combining individual speech markers with network metrics, are still in the early stages of development but represent a promising avenue for targeted interventions at the team and department levels. In practical terms, the obtained results form the basis for piloting early risk detection systems in controlled settings such as corporate call centers, telemedicine, and frontline services with a mandatory focus on wellness applications rather than performance monitoring to minimize the risk of stigmatization and maintain employee trust.

Geographical research in speech analytics for burnout is concentrated primarily in North America and Europe, with significant disparities in access to computing resources, high-quality datasets, and regulatory frameworks for biometric data in developing regions. Localizing such systems for specific jurisdictions, particularly in Kazakhstan, with its data protection policies (Law 94-V) and optional AIFC regime, similar to the GDPR requires the implementation of data minimization protocols, explicit consent, edge processing, and DPIA for speech biomarkers. Cultural specificities, including restraint in emotional expression and the prevalence of code-switching must also be reflected in the selection of pre-training corpora and model tuning, highlighting the need for international collaboration and open exchange of methodologies.

In conclusion, the application of computational speech analysis methods to burnout prediction holds transformative potential for organizational health and risk management, but large-scale adoption depends on progress in several key areas. Future research should prioritize the development and publication of longitudinal datasets with natural speech, standardized MBI labeling, and contextual variables; the development of hybrid architectures with explicit controls for biases (linguistic, cultural, and demographic); the calibration of thresholds for clinically significant changes based on prospective validation studies; and the creation of ethical frameworks and regulatory standards that balance the potential benefits of early detection with the protection of workers' rights and dignity. Only by meeting these conditions will speech analytics for burnout realize its potential in real-world organizational scenarios.

Acknowledgement

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP27510633).

References

[1] Maslach, Christina & Jackson, Susan & Leiter, Michael. (1997). The Maslach Burnout Inventory Manual. Evaluating Stress: A Book of Resources (pp.191-218).

[2] Onnela, J. P., & Rauch, S. L. (2016). A Call to Expand the Scope of Digital Phenotyping. Journal of Medical Internet Research.

[3] Veiga DL, Almeida TM, Uchida RR, Cordeiro Q. The Fundamental Frequency of Voice as a Potential Stress Biomarker: A Systematic Review and Meta-Analysis. Stress Health. 2025 Oct;41(5):e70112.

[4] M.J. Page, J.E. McKenzie, P.M. Bossuyt, I. Boutron, T.C. Hoffmann, C.D. Mulrow, L. Shamseer, J.M. Tetzlaff, E.A. Akl, S.E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J.M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M.M. Lalu, T. Li, E.W. Loder, E. Mayo-Wilson, S. McDonald, D. Moher. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ.

[5] Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. Campbell Systematic Reviews, 18, e1230.

[6] Oudin A, Maatoug R, Bourla A, Ferreri F, Bonnot O, Millet B, Schoeller F, Mouchabac S, Adrien V. Digital Phenotyping: Data-Driven Psychiatry to Redefine Mental Health. J Med Internet Res.

[7] Goodwin MA, Stange KC, Zyzanski SJ, Crabtree BF, Borawski EA, Flocke SA. The Hawthorne Effect in Direct Observation Research with Physicians and Patients. Eval Clin Pract. Author manuscript; available in PMC: 2018 Dec 1.

[8] Al-Mosaiwi, M., & Johnstone, T. (2018). In an Absolute State: Elevated Use of Absolutist Words Is a Marker Specific to Anxiety, Depression, and Suicidal Ideation. Clinical Psychological Science.

[9] Teo, C., et al. (2023). The language of healthcare worker emotional exhaustion: A linguistic analysis. PubMed Central.

[10] Sheldon, K. M., et al. (2017). Russians Inhibit the Expression of Happiness to Strangers: Testing a Display Rule Model. Journal of Cross-Cultural Psychology.

[11] A. Pankratova, Evgeny N. Osin (2020). Circumplex model of emotional display rules: a cross-cultural study. Psikhologicheskii zhurnal.

[12] Chen, S., et al. (2022). WavLM: Large-Scale Self-Supervised Pre-Training for Full Stack Speech Processing. Microsoft Research.

[13] Zhongliang Wei, Chang Ge, Chang Su, Ruofan Chen, Jing Sun (2025). A Deep Learning Model for Speech Emotion Recognition on RAVDESS Dataset. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 16, No. 5, 2025.

[14] Hsu, W. N., et al. (2021). HuBERT: Self-Supervised Speech Representation Learning by Masked Prediction of Hidden Units.

[15] Peranut Nimitsurachat, Peter Washington. Self-Supervised Learning for Audio-Based Emotion Recognition.

[16] Baevski, A., Zhou, Y., Mohamed, A., & Auli, M. (2020). wav2vec 2.0: A framework for self-supervised learning of speech representations. Advances in neural information processing systems, 33, 12449-12460.

[17] Radford, A., et al. (2022). Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision (Whisper). OpenAI.

[18] Zharkynbekova, S., Shakhputova, Z., Anichshenko, O., & Agabekova, Z. (2025). The Speech Behaviour of Kazakhstani Youth in the Context of Interethnic Communication. Journalism and Media, 6 (1).

[19] Kumar, Gowtham & Mathew, John. (2025). Speech Emotion AI for Mental Health Monitoring in Call Centers. International Journal Of Advance Research And Innovative Ideas In Education.

[20] Decker-Tonnesen PL, Chesak SS, Walker LE, Kohler K, Phelan S, Gunnels MS, Saliba KL and Bhagra A (2025). Role of organizational network analyses to advance workforce inclusion and belonging: a scoping literature review. Frontiers in Psychology.

[21] Republic of Kazakhstan. Law No. 94-V: On Personal Data and their Protection. Legislationline.

IRSTI 06.81.29

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.021

G. Sembina[1*]

[1]International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan
[*]*e-mail: g.sembina@iitu.edu.kz*

MACHINE LEARNING-BASED MODEL FOR IT PROJECT COST ESTIMATION

Abstract

Accurate IT project cost estimation remains difficult in contexts with limited historical data. This study proposes a machine-learning framework for cost prediction using Random Forest and Gradient Boosting with project size, team size, development time, project complexity, and development methodology as predictors. To mitigate data scarcity, the training set was augmented with statistically generated synthetic records derived from the observed distributions of the real dataset. Among the tested models, Random Forest achieved the best performance (MAE = 0.09, RMSE = 0.15, R^2 = 0.603), outperforming Gradient Boosting (MAE = 0.10, RMSE = 0.17, R^2 = 0.557) and the COCOMO baseline (MAE = 0.22, RMSE = 0.29, R^2 = 0.380). Feature-importance analysis identified project size and development time as the strongest cost drivers. The results indicate that ensemble learning can improve preliminary cost estimation, although the moderate R^2 suggests that the model should support, rather than replace, expert judgment in practice.

Keywords: machine learning, Random Forest, Gradient Boosting, predictive modeling, synthetic data generation, data scarcity.

Г.К. Сембина[1]

[1]Халықаралық Ақпараттық Технологиялар Университет, Алматы қ., Қазақстан

МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ IT ЖОБАСЫНЫҢ ҚҰНЫН БАҒАЛАУ МОДЕЛІ

Аңдатпа

Тарихи деректер көлемі шектеулі жағдайларда IT жобалардың құнын дәл бағалау күрделі мәселе болып қала береді. Бұл зерттеуде жоба құнын болжауға арналған машиналық оқытуға негізделген әдістемелік құрылым ұсынылады, мұнда болжамдық айнымалылар ретінде жоба көлемі, команда мөлшері, әзірлеу ұзақтығы, жоба күрделілігі және әзірлеу әдіснамасы қолданылды. Деректер тапшылығын азайту мақсатында оқыту жиынтығы нақты деректердің бақыланған үлестірімдеріне негізделген статистикалық жолмен жасалған синтетикалық жазбалармен толықтырылды. Сыналған модельдердің ішінде Random Forest ең жоғары нәтижелер көрсетті (MAE = 0.09, RMSE = 0.15, R^2 = 0.603), Gradient Boosting (MAE = 0.10, RMSE = 0.17, R^2 = 0.557) және COCOMO базалық моделінен (MAE = 0.22, RMSE = 0.29, R^2 = 0.380) жоғары нәтиже көрсетті. Маңыздылықты талдау жоба көлемі мен әзірлеу ұзақтығы шығындарға ең ықпалды факторлар екенін анықтады. Нәтижелер ансамбльдік оқыту әдістері бастапқы құнды бағалаудың дәлдігін арттыра алатынын көрсетеді, алайда R^2 көрсеткішінің орташа деңгейі модельдің практикалық қолдануда сарапшылардың шешімін толық алмастырмай, оны қолдаушы құрал ретінде пайдаланылуы тиіс екенін білдіреді.

Түйін сөздер: машинамен оқыту, Random Forest, Gradient Boosting, болжамдық модельдеу, синтетикалық деректер генерациясы, деректердің жеткіліксіздігі.

Г.К. Сембина[1]

[1]Международный Университет Информационных Технологий, г.Алматы, Казакстан

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ IT-ПРОЕКТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация

Точное оценивание стоимости ИТ-проектов остаётся сложной задачей в условиях ограниченного объёма исторических данных. В данном исследовании предлагается фреймворк машинного обучения

для прогнозирования стоимости на основе методов Random Forest и Gradient Boosting. В качестве предикторов используются размер проекта, размер команды, время разработки, сложность проекта и методология разработки. Для решения проблемы нехватки данных обучающая выборка была расширена с помощью синтетических записей, статистически сгенерированных на основе распределений реального набора данных. Среди протестированных моделей наилучшие результаты показал Random Forest (MAE = 0,09; RMSE = 0,15; R^2 = 0,603), превзойдя Gradient Boosting (MAE = 0,10; RMSE = 0,17; R^2 = 0,557) и базовую модель COCOMO (MAE = 0,22; RMSE = 0,29; R^2 = 0,380). Анализ важности признаков показал, что ключевыми факторами стоимости являются размер проекта и время разработки. Результаты демонстрируют, что ансамблевые методы могут улучшить предварительную оценку стоимости, однако умеренное значение R^2 указывает на необходимость использования модели как вспомогательного инструмента наряду с экспертной оценкой.

Ключевые слова: машинное обучение, Random Forest, Gradient Boosting, прогнозное моделирование, генерация синтетических данных, нехватка данных.

Introduction

The research formulates a machine learning-based model for IT project cost estimate that enhances accuracy relative to conventional methods. Ensemble algorithms, including Random Forest and Gradient Boosting, trained on both real and synthetically created datasets, exhibit markedly reduced mean absolute error (MAE) and elevated R^2 values. The use of synthetic data mitigates data shortage, augmenting training samples and improving model dependability. Feature significance analysis highlights project size and development duration as the most significant aspects, offering practical information for project managers. The study demonstrates the capacity of machine learning to enhance decision support systems and mitigate risks in IT project management.

Accurate cost prediction is very important for the success of IT projects since it affects strategic planning, budgeting, resource allocation, and risk management. But old ways of estimating costs, such expert judgment, algorithmic models like COCOMO, and analogy-based methodologies, don't always give answers that are consistent or dependable [1]. These problems are even worse in places where technology changes quickly, requirements change, and there isn't a lot of historical data available. Project managers have a hard time making accurate cost estimates in new market sectors and emerging economies where huge, high-quality datasets are typically hard to come by.

Machine learning (ML) approaches have become promising tools for making software cost estimates more accurate in the last few years. Machine learning algorithms can find complicated, nonlinear connections between project variables and work with different datasets, which is not possible with traditional models. Algorithms like Random Forest and Gradient Boosting have shown a lot of promise in predictive analytics [2]. They are strong against noisy data and can find subtle patterns those typical estimating methods can miss.

This study's goal is to solve these problems by creating a model for estimating the costs of IT projects using machine learning and ensemble methods like Random Forest and Gradient Boosting. The use of synthetic data production to make up for small real-world datasets is a major new idea in this research [3]. This makes the training data more diverse and representative. The suggested model uses important project characteristics, such as the number of lines of code, the size of the team, the amount of time it takes to develop the project, the complexity of the project, and the method used to build it, as input features for predicting costs [4].

Software cost estimation has been known for a long time to be an important part of software engineering that affects project planning, budgeting, and risk management. COCOMO and Function Point Analysis are two examples of traditional estimation models that have helped people predict project costs based on things like the size, complexity, and development environment of the software. However, many studies have shown that these methods often don't consider nonlinear relationships and complicated interactions between variables, which can lead to big mistakes in estimates, especially in modern software projects where technology changes quickly and requirements change often.

Researchers have been using machine learning (ML) more and more as a viable way to estimate software costs because of these problems. Much research have shown that machine learning approaches, such as Support Vector Machines (SVM), Artificial Neural Networks (ANN), and ensemble methods like Random Forest and Gradient Boosting, are better at making predictions. For instance, Ferrucci et al. (2020) did a big real-world comparison of ML methods and found that ensemble algorithms are always more accurate and reliable than classical models [5]. Usman et al. (2020) did a thorough review that showed how well Random Forest works with high-dimensional data and how well it helps prevent overfitting in software cost prediction tasks.

Ensemble methods have become some of the most useful tools for estimating costs among machine learning methods. Breiman (2001) introduced Random Forest, which is well-known for being able to handle noisy and incomplete data and for giving information about how important different features are [6]. Friedman (2001) was the first to use gradient boosting, which improves weak learners one at a time and finds small patterns in the data [7]. Sun et al. (2022) and Alkhatib & Anthony (2022) have both shown that Gradient Boosting may give very accurate estimates of software project costs, even when the datasets are not very big [8].

Even with these improvements, there are still problems. Many machine learning experiments need big, high-quality datasets that aren't always available in developing areas or smaller businesses. ML models can't be used in real life very often because there isn't enough data to train them properly and make their predictions less reliable. To solve this problem, scientists have investigated using synthetic data generation to add to small datasets. Synthetic data approaches synthetic data generation that act like real-world statistical features. This makes model training better without putting sensitive information at risk [9].

In short, the research shows that machine learning, especially ensemble methods, could greatly improve the accuracy of IT project cost estimates. However, there are still some questions about how to use these methods in contexts where there isn't much data and how to effectively combine synthetic data with real data to make training datasets bigger. This study aims to add to this expanding body of research by creating and testing an ensemble-based model for estimating IT costs that is specifically tailored to work when there isn't much data available.

Research methodology

This study employed a quantitative design to develop and evaluate an IT project cost estimation model under data-scarce conditions. The empirical dataset consisted of 82 completed IT projects collected from public repositories, published case studies, and accessible private records. To expand the development dataset, 240 synthetic project records were generated using fitted statistical distributions derived from the empirical data. To preserve realism, synthetic values were constrained to the observed ranges of the original dataset, and their quality was assessed by comparing summary statistics (mean, standard deviation, quartiles) and pairwise Pearson correlations between the real and synthetic subsets. The target variable in this study was Real Cost (USD), while Estimated Cost (USD) was included as an explanatory input reflecting the initial planning estimate. Model development used 5-fold cross-validation with a fixed random seed (42). Additionally, final model performance was validated on a holdout subset containing 16 real projects, ensuring that evaluation was not driven solely by synthetic patterns. Synthetic augmentation was used to improve model robustness; however, synthetic records cannot fully reproduce all real-world project dynamics [10].

Final model performance was additionally validated on a holdout subset containing only real project records, in order to ensure that the reported results were not driven solely by synthetic patterns.

The Table 1 shows the major things that were used in this study to guess the costs of IT projects. Some of these traits are quantitative, such Project Size (measured in lines of code), Team Size, and Development Time (measured in person-days). Others are qualitative, including Project Complexity and Development Methodology. Estimated and Real Costs, shown in US dollars, are important results for checking how accurate cost estimating algorithms are. We chose these variables because they are well-known in the software engineering literature and are available in both real-world and

synthetically created project datasets. In this study, Actual Cost (USD) was used as the prediction target, whereas Estimated Cost (USD) was included as an explanatory input reflecting the initial budget assumption.

The model tries to represent the many different aspects of IT project cost drivers by including a variety of parameters.

Table 1. Example of dataset features

Feature Name	*Description*	*Type*	*Example Values*
Project Size (LOC)	*Lines of code in the project*	*Numerical*	*1,500; 15,000; 120,000*
Team Size	*Number of people in the project team*	*Numerical*	*3; 8; 15*
Development Time	*Duration in person-days*	*Numerical*	*50; 210; 650*
Project Complexity	*Complexity level of the project*	*Categorical*	*Simple; Moderate; Complex*
Development Methodology	*Development process model used*	*Categorical*	*Agile; Waterfall; Hybrid*
Estimated Cost (USD)	*Initially planned project cost*	*Numerical*	*20,000; 75,000; 200,000*
Real Cost (USD)	*Real cost after project completion*	*Numerical*	*23,000; 72,000; 210,000*

The Table 2 shows the statistical features and distributions utilized to synthetic data generation that adds to the real dataset. Synthetic data production was used to increase the training dataset because data scarcity is a big problem, especially in places like Kazakhstan where past IT project data may not be available or may be proprietary. A statistical distribution that fit the patterns seen in real-world data was chosen for each feature (for example, log-normal or normal). Based on the properties of the first dataset, we set the mean, standard deviation, and value ranges. By using this method, the synthetic data accurately reflected possible project situations, which made the machine learning models more reliable and applicable to a wider range of situations.

Table 2. Synthetic data generation summary

Attribute	*Distribution Used*	*Mean*	*Std. Dev.*	*Range*
Project Size (LOC)	*Log-normal*	*10,000*	*3,000*	*1,000 – 150,000*
Team Size	*Normal*	*8*	*2*	*2 – 20*
Development Time (days)	*Normal*	*200*	*50*	*30 – 700*
Estimated Cost (USD)	*Log-normal*	*50,000*	*25,000*	*5,000 – 300,000*
Real Cost (USD)	*Log-normal*	*55,000*	*30,000*	*6,000 – 350,000*

Table 3 shows how well the machine learning models created in this study predict compared to a standard approach of estimating. The Random Forest model did the best, with a mean absolute error (MAE) of 0.09 and a coefficient of determination (R^2) of 0.603. This means that it explains around 60.3% of the differences in project costs. Gradient Boosting did well too, although not as well as Random Forest. Its MAE was 0.10 and its R^2 was 0.557. On the other hand, the typical COCOMO-based estimate had a lot more errors and a lot less explanatory power ($R^2 = 0.380$). These results show how ensemble machine learning approaches can help capture complicated, nonlinear interactions between project variables.

Table 3. Model performance metrics

Model	*MAE*	*RMSE*	*R^2*
Random Forest	*0.09*	*0.15*	*0.603*
Gradient Boosting	*0.10*	*0.17*	*0.557*
COCOMO (Baseline)	*0.22*	*0.29*	*0.380*

Before training the model, exploratory data analysis (EDA) and correlation analysis were done to look at the relationships between variables and find any possible multicollinearity. To make the model more stable and easier to understand, features with low variance or strong mutual correlations were either changed or left out. We used one-hot encoding to encode all of the categorical variables so that they would work with machine learning methods. We used two ensemble machine learning methods to build our model: Random Forest regression because it is resistant to noise, can find nonlinear correlations, and has a built-in feature importance analysis. Gradient Boosting regression was chosen because it can accurately predict outcomes and explain complicated data connections by iteratively refining them. We used Python's scikit-learn module to build both models and then fine-tuned their hyperparameters using grid search methods. We trained the model on a dataset that had both real and synthetic data. We used conventional regression metrics like Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), and Coefficient of Determination (R^2) to check how well the models worked. We used cross-validation methods, such as k-fold cross-validation, to check how well the model works on new data and to lower the danger of overfitting. We also did a feature importance analysis to find out which project features had the biggest effect on cost projections. This analysis gives project managers useful information and helps make sure that the model is useful and easy to understand. This study's goal is to make a strong and useful tool for estimating the costs of IT projects by mixing real and synthetic data with powerful machine learning techniques. This tool will be especially useful in situations when there isn't enough or accurate historical data.

Results of the study

The study's results show that machine learning technologies, especially ensemble methods like Random Forest and Gradient Boosting, may make IT project cost estimates far more accurate than classic models like COCOMO. The fact that Random Forest has a mean absolute error (MAE) of 0.09 and a R^2 of 0.603 shows that it can simulate complex, nonlinear connections between project variables quite well. This is especially useful in places where there isn't much historical data or it's not complete, which is a common problem in emerging economies like Kazakhstan. Using synthetic data was very important in solving the problem of not having enough data. The study was able to train machine learning models on a wider range of data by adding synthetic project situations to the original dataset that were similar to real-world statistical trends. Stable learning curves and consistent performance across cross-validation testing showed that this method not only made the model more robust but also lowered the risk of overfitting. The feature importance study gave us useful information on what makes IT project expenses go up. Project size and development time turned shown to be the most important factors, making up more than 65% of the importance weight in the Random Forest model. This is in line with what other software engineering research has found: bigger and longer projects always cost more and are less certain. Other factors, such the size of the team, the complexity of the project, and the development technique, also affect project costs, though not as much. This means that estimating costs is a problem with many dimensions. Figure 1 shows that the Random Forest model gets better at predicting both training and validation data as the size of the training set grows.

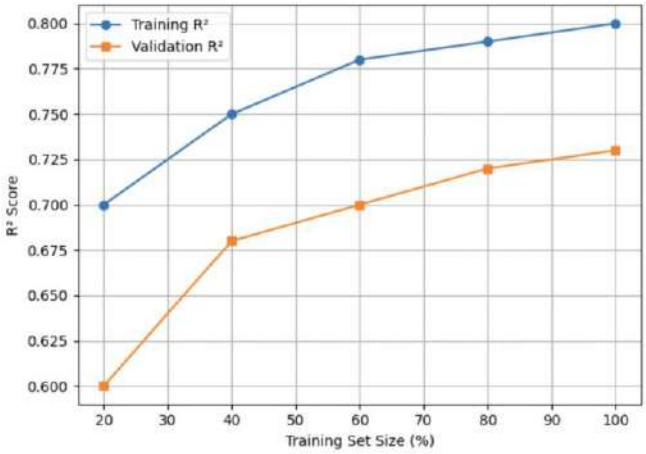


Figure 1. Learning curve for Random Forest model

Validation R^2 goes up from roughly 0.60 to 0.73, which means that the model is better at generalizing. The curves getting closer together shows that utilizing additional data makes the model more reliable for estimating costs and less likely to fit the data too closely. Figure 2 shows the learning curve for the Gradient Boosting model. It shows how the model's performance changes as the size of the training dataset grows. The graph shows two lines: the blue line shows the training R^2 score and the orange line shows the validation R^2 score.

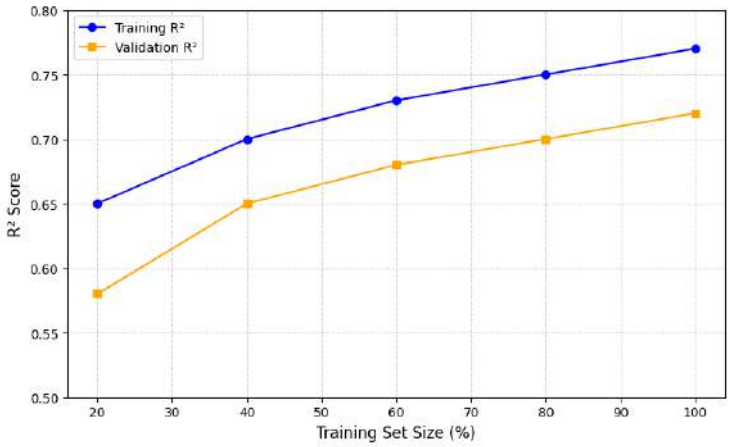


Figure 2. Learning curve for Gradient Boosting model

The training R^2 score goes up from about 0.65 to roughly 0.77 as the size of the training set grows from 20% to 100%. This constant rise shows that the model is learning more about the patterns in the data as it gets more training samples. The Gradient Boosting model seems to suit the training data well because all of the training sizes have excellent training R^2 values. The validation R^2 score also goes up a lot as the training data gets bigger, going from about 0.58 to about 0.72. The fact that this trend is going higher shows that the model gets better at generalizing to new data with additional training data. The validation R^2 curve, on the other hand, is always below the training curve. This shows that there is a gap that shows how hard it is for the model to properly generalize beyond the training data. The training and validation R^2 curves are not very far off, which means that the Gradient Boosting model does a good job of avoiding overfitting, especially when the training set is bigger. Still, the curves show that more data can aid performance, but at a certain point, the benefits start to level off. This is because the rate of increase in R^2 slows down after a training size of about 80%. This learning curve shows that Gradient Boosting is a strong method for estimating the costs of IT projects. It can give quite accurate predictions even when there isn't much previous data to work with. The results show how important it is to increase the amount of training data, for example by making

synthetic data, to make the model more reliable and lower the number of mistakes it makes in real-world situations.

Figure 3 shows a radar chart that compares the performance of two machine learning models, Random Forest and Gradient Boosting, that were used to estimate the costs of IT projects. The graphic shows three important numbers: the R^2 score, the Mean Absolute Error (MAE), and the Root Mean Squared Error (RMSE).

The blue polygon on the radar chart shows how well the Random Forest model works, and the orange polygon shows how well Gradient Boosting works. A greater value on the R^2 axis means that the predictions are more accurate. A lower value on the MAE and RMSE axes means that the predictions are less wrong and hence better. The graphic shows that Random Forest does a little better than Gradient Boosting when it comes to R^2, with a value close to 0.60 compared to Gradient Boosting's score of about 0.55. This means that Random Forest explains a bigger part of the difference in project expenses. On the other hand, Gradient Boosting has somewhat higher MAE and RMSE values, which means that its predictions are a little less accurate than those of Random Forest.

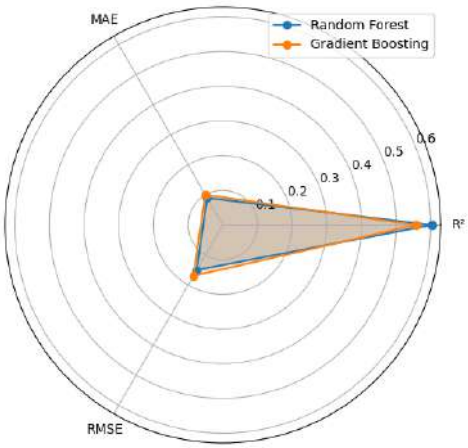


Figure 3. Model performance comparison

Both models work rather well, but Random Forest has a little edge in all areas, which suggests that it might be preferable for estimating costs, especially when it's important to keep errors to a minimum and maximize predictive ability. The study of cost overruns was another key thing to note from the results. The statistics showed that most projects went beyond their original cost projections, with overruns of 5% to 15%, especially for those that were considered complicated. This shows a problem that keeps coming up in IT project management and shows how more accurate estimation models could help project managers lower their financial risks. Overall, the results show that ensemble machine learning methods can be used in real life to estimate the costs of IT projects. They are a good alternative to traditional methods. The addition of synthetic data is a big step forward since it makes it possible to create accurate models even when there isn't a lot of historical data available. These results are very essential for project managers and policymakers who want to make IT project budgets more accurate, lower risks, and make the best use of resources.

Discussion of scientific results

Because the study relied on a mixed real-and-synthetic development dataset, the reported performance should be interpreted with caution. Although synthetic augmentation improved sample coverage, an external evaluation on an independent real-only dataset remains necessary to confirm generalizability under operational conditions.

Although the Random Forest model achieved the best performance in this study ($R^2 = 0.603$), this value should be interpreted as moderate predictive accuracy rather than near-complete explanatory power. In practical terms, the model is suitable for preliminary budgeting, comparative scenario analysis, and early identification of projects with elevated cost-overrun risk. However, this level of

accuracy is not sufficient to justify fully automated final budget approval, particularly for large-scale or high-complexity IT projects. Accordingly, the proposed model should be treated as a decision-support tool that complements expert judgment, rather than as a replacement for managerial review.

The research illustrates that ensemble machine learning models may significantly enhance the precision and dependability of IT project cost prediction, particularly in contexts with scarce historical data. Conventional estimating methods like COCOMO or expert judgment frequently neglect the nonlinear and multidimensional interrelations among project variables, resulting in recurrent mistakes. In contrast, the use of Random Forest and Gradient Boosting facilitates the modeling of intricate connections among project size, development duration, team attributes, and methodological selections. The use of synthetic data is crucial in alleviating data constraint, enabling models to be trained on a broader spectrum of realistic project situations and diminishing the likelihood of overfitting. Moreover, feature significance analysis offers valuable insights into the variables that most significantly affect cost behavior, facilitating enhanced planning and resource allocation. These findings together underscore the benefits of machine learning in creating more accurate, data-driven decision support systems for IT project management.

The present study focused on two ensemble tree-based models, Random Forest and Gradient Boosting, because these methods are robust on tabular data, tolerate nonlinear relationships, and remain interpretable under limited-data conditions. Nevertheless, the current experiment did not include comparisons with simpler regression baselines (e.g., Linear Regression or Support Vector Regression) or with more recent boosting methods such as XGBoost. Therefore, although the obtained results support the usefulness of ensemble learning, they do not yet establish that the selected models are universally optimal for this task. Future work should extend the benchmark to include additional baseline and advanced models under the same evaluation protocol.

Conclusion

This study demonstrated that ensemble machine-learning methods can improve IT project cost estimation under conditions of limited historical data. Among the evaluated approaches, Random Forest produced the best overall results (MAE = 0.09, RMSE = 0.15, $R^2 = 0.603$), outperforming both Gradient Boosting and the COCOMO baseline. The findings indicate that project size and development time are the most influential predictors of project cost. At the same time, the observed level of predictive accuracy should be regarded as adequate for preliminary estimation and decision support rather than for fully automated final budgeting. The use of synthetic data improved sample coverage, but it also introduces limitations, as synthetic records cannot fully reproduce all real-world project conditions. Future research should validate the model on larger real-world datasets and extend the comparison to additional baseline and advanced learning methods, including XGBoost and other regression models.

References

[1] Suleiman, Z., S. Shaikholla, D. Dikhanbayeva, E. Shehab, and A. Türkyılmaz. 2022. "Industry 4.0: Clustering of Concepts and Characteristics." Cogent Engineering. Article 2034264. https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2034264.

[2] Bach, M. P., A. Topalovic, Z. Krstic, and A. Ivec. 2023. "Predictive Maintenance in Industry 4.0 for the SMEs: A Decision Support System Case Study Using Open-Source Software." Designs 7, no. 4: 98. https://doi.org/10.3390/designs7040098.

[3] Sarker, I. H. 2021. "Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions." SN Computer Science. Article 5. https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x.

[4] Çakır, M., M. A. Güvenç, and S. Mıstıkoğlu. 2021. "The Experimental Application of Popular Machine Learning Algorithms on Predictive Maintenance and the Design of IoT-Based Condition Monitoring System." Computers & Industrial Engineering 151: 106948. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106948.

[5] Sembina, G., Aitim A, and Shaizat M. 2022. "Machine Learning Algorithms for Predicting and Preventive Diagnosis of Cardiovascular Disease." In 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), 1–5. https://doi.org/10.1109/sist54437.2022.9945708.

[6] Fernandes, M., J. M. Corchado, and G. Marreiros. 2022. "Machine Learning Techniques Applied to Mechanical Fault Diagnosis and Fault Prognosis in the Context of Real Industrial Manufacturing Use-Cases: A Systematic Literature Review." Applied Intelligence 52: 14246–14280. https://doi.org/10.1007/s10489-022-03344-3.

[7] Frankó, A., G. Hollósi, D. Ficzere, and P. Varga. 2022. "Applied Machine Learning for IoT and Smart Production—Methods to Improve Production Quality, Safety and Sustainability." Sensors 22, no. 23: 9148. https://doi.org/10.3390/s22239148.

[8] Kane, A. P., A. S. Kore, A. N. Khandale, S. S. Nigade, and P. P. Joshi. 2022. "Predictive Maintenance Using Machine Learning." arXiv. Article 2205.09402. https://doi.org/10.48550/arxiv.2205.09402.

[9] Arboretti, R., R. Ceccato, L. Pegoraro, and L. Salmaso. 2021. "Design of Experiments and Machine Learning for Product Innovation: A Systematic Literature Review." Quality and Reliability Engineering International 38: 1131–1156. https://doi.org/10.1002/qre.3025.

[10] Aitim, A., and Sembina G. 2024. "Modeling of Human Behavior for Smartphone with Using Machine Learning Algorithm." News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physico-Mathematical Series (4): 17–28. https://doi.org/10.32014/2024.2518-1726.304.

МРНТИ 20.53.19

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.022

Н.А. Тойганбаева[1*], Ғ. Әбдіманап[2], А. Муса[1], Н. Абдурахмонова[3]

[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[2]«ҚазМұнайГаз Инжиниринг» ЖШС, Астана қ., Қазақстан
[3]Мирзо Ұлықбек атындағы Өзбекстан Ұлттық Университеті, Ташкент қ., Өзбекстан
[*]*e-mail: nazkon@gmail.com*

ҚАЗАҚ ТІЛІНЕ АРНАЛҒАН LLM ҮШІН ДЕРЕКТЕРДІ OCR АРҚЫЛЫ ДАЙЫНДАУ

Аңдатпа

Соңғы жылдары жасанды интеллект және үлкен тілдік модельдер (LLM) қарқынды дамуда. Бұл модельдердің тиімділігі оларды үйретуге пайдаланылған деректер сапасына тәуелді. Қазақ тіліне арналған құрылымдалған мәтіндік ресурстардың тапшылығы LLM дамытуда қиындық тудырады. Мақалада қазақ тіліндегі мәтіндерді OCR технологиясы арқылы цифрландыру және олардан JSON форматында сапалы датасет жасау қарастырылады. Жұмыстың мақсаты – қазақ мәтіндерін автоматты өңдеп, LLM оқытуға жарамды құрылымдалған деректер дайындау. Бұл үшін сканерленген құжаттар жиналып, Tesseract OCR арқылы танылып, JSON құрылымына келтірілді. Нәтижесінде 37 062 құжат өңделіп, LLaMA3.2 3B моделін қазақ тілінде оқытуға қолданылды. Модель ұлттық стильді меңгеріп, поэтикалық мәтіндер құра алды. Train/loss графигі оқыту тұрақтылығын көрсетті.

Түйін сөздер: OCR, JSON, датасет, қазақ тілі, LLM, тану, өңдеу, модель.

Н.А. Тойганбаева[1], Г. Абдиманап[2], А. Муса[1], Н. Абдурахмонова[3]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
[2]ТОО «КазМунайГаз Инжиниринг», г. Астана, Казахстан
[3]Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан

ПОДГОТОВКА ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ OCR ДЛЯ LLM НА КАЗАХСКОМ ЯЗЫКЕ

Аннотация

В последние годы наблюдается стремительное развитие искусственного интеллекта и крупных языковых моделей (LLM). Эффективность таких моделей во многом зависит от качества данных, использованных для их обучения. Недостаток структурированных текстовых ресурсов на казахском языке представляет собой серьёзную проблему для развития LLM. В данной статье рассматривается процесс оцифровки казахскоязычных текстов с помощью технологии OCR и создание на их основе качественного датасета в формате JSON. Цель работы – автоматическая обработка казахских текстов и подготовка структурированных данных, пригодных для обучения LLM. Для этого были собраны отсканированные документы, распознаны с помощью Tesseract OCR и преобразованы в структуру JSON. В результате было обработано 37 062 документа, которые использовались для обучения модели LLaMA 3.2 3B на казахском языке. Модель успешно освоила особенности национального стиля и смогла генерировать поэтические тексты. График train/loss продемонстрировал стабильность обучения.

Ключевые слова*:* OCR, JSON, датасет, казахский язык, LLM, распознавание, обработка, модель.

N.A. Toiganbayeva[1], G. Abdimanap[2], A. Musa[1], N. Abdurakhmonova[3]
[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]KazMunayGas Engineering LLP, Astana, Kazakhstan
[3]National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Toshkent, Uzbekistan

PREPARATION OF DATA WITH THE HELP OF OCR FOR LLM IN KAZAKH LANGUAGE

Abstract

In recent years, artificial intelligence and large language models (LLMs) have undergone rapid development. The effectiveness of these models largely depends on the quality of the training data. However, the scarcity of structured text resources in the Kazakh language poses a significant challenge for LLM

development. This paper explores the digitization of Kazakh-language texts using OCR technology and the creation of a high-quality dataset in JSON format. The main objective of the study is to automatically process Kazakh texts and prepare structured data suitable for training LLMs. For this purpose, scanned documents were collected, processed using Tesseract OCR, and converted into a structured JSON format. As a result, 37,062 documents were processed and used to train the LLaMA 3.2 3B model in the Kazakh language. The model demonstrated an understanding of national linguistic style and was capable of generating poetic texts. The train/loss graph indicated stable training performance.

Keywords: OCR, JSON, dataset, Kazakh language, LLM, recognition, processing, model.

Кіріспе

Үлкен тілдік модельдер (LLM, Large Language Models) қазіргі уақытта жасанды интеллект жүйелерінің өзегі саналады. Үлкен тілдік модельдер мәтінді түсіну, генерациялау, аудару, сұрақтарға жауап беру, диалог жүргізу және күрделі лингвистикалық тапсырмаларды орындау қабілеттеріне ие. Бірақ аталған модельдердің тиімділігі оларды қандай деректермен және қандай тілде үйретілгеніне тікелей байланысты. Қазіргі таңда әлемдік LLM-дардың басым бөлігі ағылшын тіліне негізделген. Қазақ тіліне бейімделген LLM құру үшін алдымен үлкен, әртүрлі және сапалы мәтіндік деректер жинау керек. Цифрлық дәуірде жасанды интеллект, үлкен тілдік модельдер және жалпы тілдік технологиялар үшін сандық мәтіндердің мол болуы – негізгі талаптардың бірі. Алайда қазақ тілі үшін бұл бағытта елеулі қиындықтар бар. Қазақ тіліндегі цифрланған, құрылымданған және өңдеуге дайын мәтіндер көлемі басқа ірі тілдермен салыстырғанда өте аз. Кез келген жасанды интеллект жүйесі үйретілген деректердің сапасынан аспайтыны белгілі. Сондықтан деректердің мазмұны, тазалығы, алуан түрлілігі мен тілдік дұрыстығы – LLM өнімділігін айқындайтын негізгі факторлар. Қазақ тіліндегі дереккөздерден алынған мәліметтер әр түрлі форматта болады. Қазақ тілінде LLM жасау үшін датасет жинау – ең маңызды және жауапты қадам. Қазақ тілінде цифрланған мәтіндердің тапшылығын ескерсек, OCR (OCR, Optical Character Recognition) технологиясының маңызы өте жоғары. OCR – бұл мәтін бейнесін (мысалы, сканерленген құжаттар, фотосуреттер, скриншоттар) машиналық түрде оқуға болатын мәтінге айналдыратын технология. OCR мәтіндік мазмұнды цифрландырудың, жазбаша ақпаратты машинада оқылатын пішімдерге түрлендірудің және кең қолжетімділікті қамтамасыз етудің таптырмас технологиясына айналды. OCR технологиясы – қазақ тіліндегі мәтіндік деректерді жедел әрі тиімді цифрлау құралы. Оптикалық таңбаларды тану LLM моделін үйретуде корпусты сапалы кеңейтіп, қазақ тілінің цифрлық өрісін кеңейтуге үлкен үлес қосады. Осыдан зерттеу тақырыбының өзектілігі – қазақ тілін цифрлық кеңістікке бейімдеу, сапалы мәтіндік деректерді қолжетімді ету және тілдік модельдердің даму мүмкіндіктерін кеңейту қажеттілігімен анықталады. Бұл бағыттағы ғылыми жұмыстар тек техникалық емес, сонымен қатар мәдени, білім беру және ұлттық тіл саясаты тұрғысынан да ерекше мәнге ие.

İ. Çetıntas зерттеу жұмысында тарихи түрік құжаттарын OCR арқылы өңдеуде кездесетін қиындықтарды шешу туралы қарастырылған. Эксперимент 1930–1970 жылдар аралығындағы 30 түрлі газет бетіне жүргізілген. Алынған сөздер NLP құралдары арқылы тексеріліп, ұсынылған әдіс OCR дәлдігін орта есеппен 18%-ға арттыратыны анықталған. Бұл алдын ала бейнеөңдеудің тарихи мәтіндерді танудағы маңызын дәлелдейді [1].

Y. Chen қолмен жазылған мәтінді тану сапасын арттыру және доменге бейімделу мүмкіндігін кеңейту мақсатында OCR моделін тілдік модельмен біріктіруді ұсынған. TrOCR және CharBERT модельдерінің үйлесімі визуалды және лингвистикалық ақпаратты тиімді біріктіре отырып, мәтіннің түпнұсқалығын сақтайтынын көрсеткен [2].

T. Nguyen мақаласында тарихи құжаттардағы OCR нәтижелерінің сапасын арттырудың маңыздылығы және оның ақпаратты іздеу мен табиғи тілді өңдеу жүйелеріне әсері туралы қарастырылған. Пост-OCR өңдеудің мәселелері сипатталып, оның типтік пайплайны мен заманауи әдістеріне шолу жасалған. Сонымен қатар, бағалау метрикалары, қолжетімді

деректер жиынтықтары және қолдануға ыңғайлы құралдар ұсынылып, болашақ зерттеу бағыттары айқындалған [3].

Соңғы бес жылда қазақ тіліне арналған деректер жиынтықтарын (датасеттерді) құру бағытында бірқатар маңызды бастамалар жүзеге асырыла бастады. Жинақталып жатқан бұл деректер қорлары қазақ тілінің технологиялық дамуына серпін беріп, оны цифрлық экожүйеге толыққанды енгізудің алғышартына айналуда. 1-кестеде қазақ тіліндегі датасеттерге шолу жасалған.

Кесте 1. Қазақ тіліндегі датасеттерге шолу

№	Датасет атауы	Авторлар	Сипаттамасы	Сілтеме
1	KazNERD [4]	Yeshpanov Y., Khassanov H., Atakan V.	Қорытынды деректер жиынтығы 112 702 сөйлем мен 25 атаулы мән санатына жататын 136 333 аннотациядан тұрады.	https://issai.nu.edu.kz/ru/kaznerd-rus/ (11.07.2025)
2	Kazakh Speech Corpus (KSC2) [5]	Mussakhojayeva S., Khassanov Y., Huseyin A.V.	Жалпы алғанда, KSC2-де 600 мыңнан астам мәлімдемені қамтитын шамамен 1,2 мың сағаттық жоғары сапалы транскрипцияланған деректер бар.	https://issai.nu.edu.kz/kz-speech-corpus/ (11.07.2025)
3	KOHTD [6]	Toiganbayeva N, Kasem M., Abdimanap G., Bostanbekov K., Abdallah A, Alimova A., Nurseitov D.	Жинақ 3000 қолмен жазылған емтихан парағын, 140 335-тен астам кескінделген жолақтарды қамтиды және шамамен 922 010 таңбадан тұрады.	https://github.com/abdoelsayed2016/KOHTD (11.07.2025)
4	KazSAnDRA [7]	Yeshpanov R., Varol H. A.	Қазақ тіліндегі пікірталдау (sentiment analysis) үшін арнайы әзірленген және өз саласында алғаш рет ашық түрде жарияланған ең ірі деректер жиынтығы. Бұл жиынтық әртүрлі дереккөздерден алынған 180 064 пікірді қамтиды және әр пікірге 1-ден 5-ке дейінгі сандық баға берілген, бұл тұтынушылардың көзқарасын сандық түрде бейнелеуге мүмкіндік береді.	https://issai.nu.edu.kz/2024/07/01/kazsandra-kazakh-sentiment-analysis-dataset-of-reviews-and-attitudes/ (11.07.2025)
5	QThink-Task Dataset [8]	Kadyrbek N., Tuimebayev Z., Mansurova M., Viegas V.	Бұл LLM модельдеріне арналған, түрлі пайымдау мен тілдік түсіну қабілеттерін бағалайтын, қазақстандық контекске негізделген көптапсырмалы деректер жиынтығы.	https://huggingface.co/datasets/nur-dev/QThink-Task (11.07.2025)

Датасет – үлкен тілдік модельдердің құрылымындағы негізгі компоненттердің бірі және модельдің меңгеретін біліміне, тілдік құрылымына, логикалық пайымына және мазмұн сапасына тікелей әсер етеді. Сондақтан деректерді мұқият іріктеу мен сапалы өңдеу – LLM әзірлеу үдерісіндегі шешуші қадамдардың бірі болып табылады.

Зерттеу әдіснамасы

OCR (Optical Character Recognition, оптикалық таңбаларды тану) – бұл мәтін бар кескіндерді машинамен оқуға болатын мәтіндік деректерге түрлендіру технологиясы. Бұл технология құжаттарды цифрландыруда, қолжазбаларды тануда және баспа материалдарын өңдеуде кеңінен қолданылады. OCR жұмысының негізгі принципі – кескінді талдау, мәтіндік аймақтарды бөліп алу және оларды мәтіндік таңбаларға айналдыру. Бұл компьютерлік көру алгоритмдері, атап айтқанда мәтінді сегменттеу, таңба белгілерін шығару және оларды жіктеу арқылы жүзеге асырылады.

Осы зерттеу жұмысында OCR жүзеге асыру үшін Tesseract OCR құралы таңдалды. Tesseract-ті таңдаудың себептері:

- Қазақ тілін қолдау: Tesseract – қазақ тіліндегі мәтінді тану үшін тілдік пакеттерді ұсынатын санаулы ашық кітапханалардың бірі, бұл жоба үшін басты талап болып табылады.
- Ашық бастапқы код: ашық бастапқы кодқа ие құрал ретінде Tesseract лицензиялық шектеулерден бос, бұл оны жобаға еш қосымша шығынсыз біріктіруге мүмкіндік береді.
- Жоғары өнімділік: Tesseract алдын ала кескіндерді өңдеу арқылы шу мен бұрмаланулардың әсерін азайтып, мәтінді жоғары дәлдікпен тануды қамтамасыз етеді. Tesseract қазақ тілінен басқа да көптілдермен жұмыс жасауға мүмкіндігі бар, бұл көптілді құжаттармен жұмыс істегенде маңызды.
- Икемділік пен баптау мүмкіндігі: Tesseract тілдік модельдер мен OCR параметрлерін баптауға мүмкіндік береді, бұл ең жақсы нәтижелерге қол жеткізуге көмектеседі.
- Белсенді әзірлеушілер қауымдастығы: құралды қолданушылардың кең қауымдастығы мен үнемі жаңартылып отыруы сенімді және ыңғайлы шешімге қабылдауға үлес қосады.

Мәтінді тану дәлдігін арттыру үшін кескіндерді алдын ала өңдеу үдерісі қолданылды. Бұл үдерісте суреттерді сұр түске түрлендіру, морфологиялық өңдеу арқылы көлеңкелерді жою және жарықтылықты қалыпқа келтіру қадамдары қамтылды. Бұл кезеңдер артефактілерді жоюға және мәтіндік аймақтардың контрастылығын арттыруға мүмкіндік беріп, OCR сапасын едәуір жақсартады. Құжаттардың көптілді сипатын ескере отырып, Tesseract OCR баптауларында kaz+rus+eng тілдік пакеті қолданылды. OCR нәтижелері артық таңбалардан тазартылып, құрылымды мәтін алу үшін пішімделді (2-кесте).

Кесте 2. OCR үрдісіне дейінгі және кейінгі файлдар

OCR -ге дейінгі файлдар	*OCR -ден кейінгі файлдар*
Бұл файлдар PDF немесе сурет (JPEG, PNG, TIFF) форматында болады.	*Құжаттарды сандық архивке енгізу жеңілдейді*
Файлдарда мәтінді таңдап көшіру, өңдеу, іздеу мүмкін болмайды.	*Құжаттың ішіндегі мәтінді көшіріп, өзгертіп, іздеуге болады.*
Файлда суреттер болғандықтан, файл көлемі көбіне үлкен болады.	*Файлдың көлемі кішірейіп, құрылымы дұрысталады, тек қажет ақпарат сақталып, артық визуалды элементтер жойылады.*
Көзі нашар көретін адамдарға немесе автоматтандырылған жүйелерге бұл файлдармен жұмыс істеу қиын.	*Мәтіндік файлдар экран оқитын бағдарламалармен және басқа ассистивті технологиялармен жақсы үйлеседі.*

OCR (оптикалық тану) технологиясы – қағаз негізіндегі құжаттар мен сканерленген бейнелерді құрылымдалған және іздеуге жарамды сандық деректерге түрлендірудің тиімді тәсілі болып табылады. Бұл технологияның қолданылуы құжаттармен жұмыс істеу үдерісін айтарлықтай оңтайландырып, ақпараттық ресурстардың қолжетімділігін арттырады. OCR технологиясын енгізу мәліметтерді сақтау, өңдеу және іздеу мүмкіндіктерін кеңейтіп, сандық архивтер мен ақпараттық жүйелердің функционалдық әлеуетін арттырады. Осыған байланысты ұйымдар мен жеке пайдаланушылар үшін деректерді тиімді басқару мақсатында

OCR технологиясын қолдану заманауи ақпараттық инфрақұрылымның маңызды құрамдас бөлігі болып табылады.

OCR дереккөздері:

- әл-Фараби атындағы ҚазҰУ кітапханасынан алынған оқулықтар, оқу құралдары монографиялар, диссертациялар;
- газет-журналдар.

Жалпы көлемі 198 ГБ болатын мәтіндік деректер OCR-сервисі арқылы өңделіп, құрылымдалған JSON форматына түрлендірілді.

OCR процесі аяқталғаннан кейін алынған мәтіндік файлдар құрылымдалған JSON форматындағы деректерге түрлендірілді. Әрбір JSON файлы келесі негізгі өрістерден тұрды (Сурет 1):

1. author – құжат авторы;
2. name – құжаттың атауы;
3. annotation – аннотация (қысқаша сипаттама);
4. text – құжаттың толық мәтіні.

1-суретте JSON (JavaScript Object Notation) форматында жазылған құрылымды мәтін берілген. Бұл құрылым белгілі бір кітап туралы мәліметті сипаттайды және төрт негізгі кілттен (параметрден) тұрады:


```
{
    "autor": "Досжан Д.",
    "name": "Жазмыштың формуласы",
    "annotation": "Кейіпкер бойындағы алып- жұлып бара жатқан құштарлық, ашыну
мен жеріну, ұрынып жүріп ырзық- несібені теріп жеу – осы мінездердің қазақ
кейіпкерінің бойындағы – сегіз қыры, бір сыры деп білгейсіз",
    "text": "Дүкенбай\nДОСЖАН\nКЕР ннен нні\nЖАЗМЫПЛТЫР\nФОРМУЛАС\nЖАЗМЫЙЛЫН
\nФОРМУЛАСЫ\nХикаяттар\nБАСПАСЫ\n64 Досжан Дүкенбай\nЖазмыштың формуласы.
Хикаяттар. Астана:  Фолиант ,\n536 бет.\nӨмір тауға шыққандай хал. Биік басына
көтерілген кезде:  Жеттім бе, жетпедім бе?  деп соңына қарасаң жалаңаяқ шалғынды
кешіп жүгірген балалық шақ көз алдыңа мөлдіреп келе қалады әлі алынбаған асулар
бас айналдырып, көңіл өрекпітеді, өліп-өшіп тырмысып биіктей бересің. Сіз бен
бізге ешқашан жан шақырып аялдау жазбаған, жазмыш формуласы солай.\nӘр кітаптың
мінезі болады. Сонғы жылдары жазған жеті хикаяттан құралған қолыңыздағы кітаптың
мінезі кемелдену мен ілгерілеу, кешегіні бүгін міске тұтпау, көбіне адалдықтан
опық жеу. Кейіпкер бойындағы алыпжұлып бара жатқан құштарлық, ашыну мен жеріну,
ұрынып жүріп ырзықнесібені теріп жеу осы мінездердің қазақ кейіпкерінің
бойындағы сегіз қыры, бір сыры деп білгейсіз.\nДосжан Дукенбай, 2008\n6
```


Сурет 1. JSON файлы

Аннотацияны бөліп алу жұмыстың маңызды кезеңдерінің бірі болды, себебі аннотация мәтіннің мазмұнын қысқаша сипаттап, оның тақырыптық бағытын көрсетеді. Аннотацияны анықтау үшін мәтіндегі арнайы үлгілерге негізделген эвристикалық ережелер қолданылды: мысалы, «Аннотация», «Қысқаша сипаттама», «Түйін» сияқты кілтсөздер мен олардың мәтіндегі орналасу реті ескерілді. Егер аннотация нақты берілмесе немесе ашық көрсетілмесе, мәтіннің алғашқы абзацтарына негізделген табиғи тілді өңдеу әдістері арқылы автоматты түрде аннотация жасалды.

Барлық элементтерді бөліп алғаннан кейін, деректер стандарттау кезеңінен өтті: артық таңбалар мен бос орындар жойылды, OCR қателері түзетілді, мәтін бірыңғай UTF-8 кодтау форматына келтірілді. Нәтижесінде алынған JSON файлдары құрылымдалған, машинамен оқуға жарамды дереккөз ретінде сақталып, әрі қарайғы талдау мен ақпараттық жүйелерге енгізуге дайын болды.

OCR-сервисін оңтайландыру шеңберінде екі түрлі өңдеу механизмі енгізілді:

1. Локалды режимде – ProcessPoolExecutor көмегімен көппроцессорлық өңдеу
2. Серверлік режимде – Celery және RabbitMQ негізінде асинхронды өңдеу.

Жүргізілген жүктемелік тестілеу нәтижелері өңдеу уақытының едәуір қысқарғанын көрсетті: локалды режимде 4-8 процессорлық ағын қолданылғанда 100 файлды өңдеу уақыты

шамамен 180 секундтан 40 секундқа дейін қысқарды. Ал серверлік режимде бұл көрсеткіш бір файл үшін орта есеппен 1,3 секундқа дейін азайды. Өңдеу тиімділігіне әсер ететін негізгі шектеуші факторлар ретінде дискілік енгізу/шығару (I/O), үлкен бейнелерді өңдеудегі CPU-ге түсетін жүктеме, және хабарламалар кезегіне (message queue) түсетін жүктеме анықталды. Аталған шектеулерді азайту мақсатында жүйеге буферлеу механизмі, параллель өңдеуді шектеу, воркерлерді автоматты масштабтау, сондай-ақ метрикаларды бақылау және мониторинг жүргізу құралдары енгізілді.

Зерттеу нәтижелері

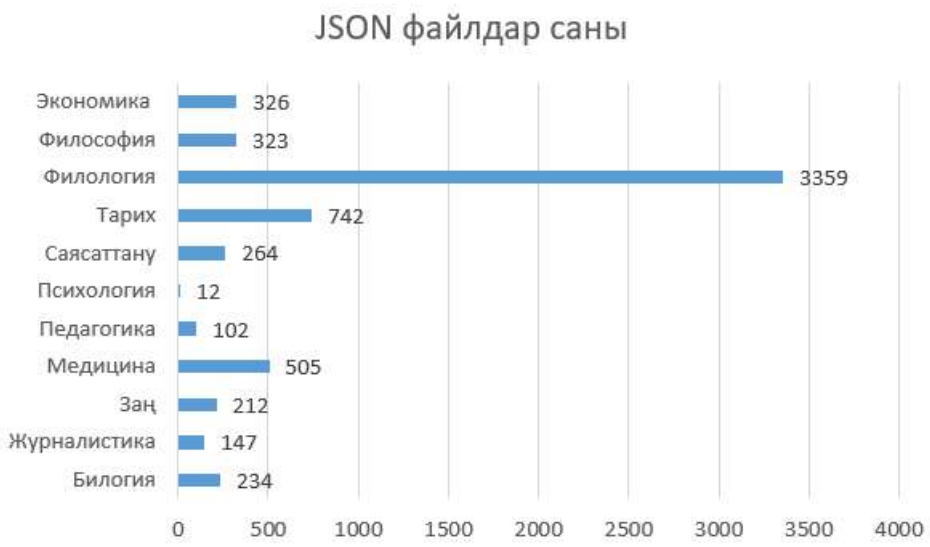
Қазақ тіліндегі үлкен көлемді мәтіндік деректерді жинау және өңдеу мақсатында арнайы OCR-сервис әзірленіп, FastAPI платформасында жүзеге асырылды. Аталған сервис PDF-файлдар мен сурет форматындағы деректерді қабылдап, олардың ішіндегі мәтінді Tesseract OCR кітапханасы арқылы таниды. Жоғары өнімділікке қол жеткізу үшін көппроцессорлық өңдеу әдісі қолданылды. OCR нәтижелері құрылымдалған JSON форматында сақталды. 3-кестеде көрсетілген нәтижесінде, жалпы саны 37 062 файл OCR-сервисі арқылы өңделіп, JSON форматына автоматты түрде түрлендірілді.

Кесте 3. Әртүрлі сала бойынша JSON файлдар саны

Сала атауы	*JSON файлдар саны*
Биология	*234*
Журналистика	*147*
Заң	*212*
Медицина	*505*
Педагогика	*102*
Психология	*12*
Саясаттану	*264*
Тарих	*742*
Филология	*3359*
Философия	*323*
Экономика	*326*
Егемен Қазақстан газеті	*29492*
Басқа сала	*1344*
Барлығы	*37062*

Егемен Қазақстан газетіндегі әрбір мақала JSON форматында жеке файл ретінде бөлінді. 2-суреттегі гистограммада сүйенсек, филология саласындағы JSON файлдар саны – 3359, бұл басқа барлық салалардан айтарлықтай жоғары. Бұл көрсеткіш филология саласында, әсіресе қазақ тілінде жазылған материалдардың (кітаптар, мақалалар, оқулықтар және т.б.) көптігін білдіреді.

Қазіргі ақпараттық технологиялар дәуірінде ұлттық мәдени және тілдік мұраны сақтау – қоғамның рухани қауіпсіздігін қамтамасыз етудің маңызды бағыттарының бірі болып табылады. Қазақ тіліндегі әдеби шығармалар, фольклорлық мұралар, тарихи құжаттар және тілтанымдық материалдар – ұлттың болмысын айқындайтын баға жетпес құндылықтар. Бұл мұраларды болашақ ұрпаққа жеткізудің ең тиімді жолы – құнды ақпараттарды сандық форматқа көшіру. Атап айтқанда, материалдарды JSON (JavaScript Object Notation) секілді құрылымдалған, өңдеуге және сақтауға ыңғайлы форматтарда цифрландыру қазіргі таңда кең таралып келеді. Мұндай тәсіл мұрағаттық құжаттарды, әдеби мәтіндерді және тіл ресурстарын оңай іздеуге, қайта өңдеуге, тіпті жасанды интеллект жүйелерінде қолдануға мүмкіндік береді.



Сурет 2. Әртүрлі сала бойынша JSON файлдар саны

Сонымен қатар, цифрланған материалдар отандық және халықаралық ғылыми айналымға енуге жол ашады, әрі заманауи білім беру мен зерттеу үдерістеріне тиімді ықпал етеді.

Соңғы жылдары жасанды интеллект саласында үлкен тілдік модельдер қарқынды дамып келеді. Бұл модельдер – мәтінді түсіну, генерациялау және талдау сияқты күрделі тілдік міндеттерді орындай алатын қуатты құралдар. Алайда мұндай модельдердің тиімділігі мен сапасы оларды оқыту үшін қолданылатын датасеттерге тікелей тәуелді. Бұл орайда мемлекеттік қазақ тіліндегі тілдік ресурстардың жетіспеушілігі айтарлықтай мәселе туғызады. OCR технологиясының көмегімен бұрын тек қағаз күйінде сақталған әдеби және ғылыми еңбектер, тарихи мұрағаттар мен оқулықтар цифрлы форматқа көшіріліп, олардан автоматты түрде JSON құрылымындағы мәтіндік датасеттер жасақталуда. Бұл қазақ тілінің табиғи мәтіндердегі қолданыс ерекшеліктерін ескере отырып, LLM модельдерін ана тілімізде оқытуға және дамытуға зор мүмкіндік береді.

Brown T. және басқалар ұсынған мақалада GPT-3 моделінің үлкен тілдік модельдер көмегімен машинаны табиғи тілде оқытуға болатынын дәлелдейді [9]. Бұл жұмыстың нәтижелері LLM саласында тұтас жаңа парадигманың бастамасы болды.

GPT-4 – OpenAI әзірлеген модель – көпмодальды, көптілді және кең контекстік мүмкіндіктерге ие заманауи үлкен тілдік модель. Ол мәтінмен қатар визуалды ақпаратты да өңдеуге қабілетті, логикалық пайымдау мен тапсырмаларды орындауда жоғары нәтижелер көрсетеді. GPT-4 моделі табиғи тіл өңдеу саласындағы күрделі мәселелерді шешуге арналған тиімді құрал болып табылады [10].

PaLM моделі 6144 TPU v4 чипін пайдалана отырып Pathways жүйесі негізінде үйретілді және көлемі аса үлкен, әртүрлі көздерден жинақталған көптілді деректер жиынтығында жаттықтырылды. Ауқымды және әртараптандырылған датасет үлгінің күрделі тілдік тапсырмаларда, соның ішінде көптілді пайымдау мен код генерациясында жоғары нәтижелер көрсетуіне ықпал етті [11].

Xue және басқалар ұсынған модель mT5 — T5 моделінің көптілді нұсқасы болып табылады және ол Common Crawl негізінде жасалған 101 тілді қамтитын деректер жиынтығында алдын ала үйретілген. Модель көптілді бенчмарктерде жоғары нәтижелер көрсетіп, нөлдік-shot жағдайында кездейсоқ аударманы болдырмау үшін арнайы әдіс ұсынылды. Зерттеуде қолданылған код пен модель салмақтары ашық түрде қолжетімді [12].

Үлкен тілдік модельдердің тиімділігі мен генеративті қабілеттері тікелей түрде оларды үйретуде қолданылатын деректер жиынтығының көлемі, сапасы және алуан түрлілігіне тәуелді. Ауқымды және әртүрлі тілдік корпус модельдің лексикалық қамтылуын арттырып

қана қоймай, семантикалық түсіну, көптілділік және контексті дұрыс болжау сияқты жоғары деңгейлі қабілеттерін дамытады. Сондықтан аз ресурсты тілдер үшін сапалы әрі теңгерімді деректер жинау – үлкен тілдік модельдердің әділ, бейтарап және көптілді қолдану мүмкіндігін қамтамасыз етудің негізгі алғышарты болып саналады.

OCR технологиясы қолданылып, қазақ тіліндегі кітаптар мен құжаттар сандық форматқа көшірілді. Бұл мәтіндер негізінде құрылымдалған датасеттер жасалып, олар LLM (мысалы, LLaMA 3.2 3B) моделін оқытуда пайдаланылды. Нәтижесінде, модель қазақ тіліндегі мәтіндерді жақсы түсініп, өндей алатын деңгейге жетті. 3-суретте LlaMA моделі қазақ халқының дүниетанымдық ерекшеліктерін, поэтикалық құрылымын және күйші ретінде жазылған тілдік стильдерді тануға мүмкіндік берді.

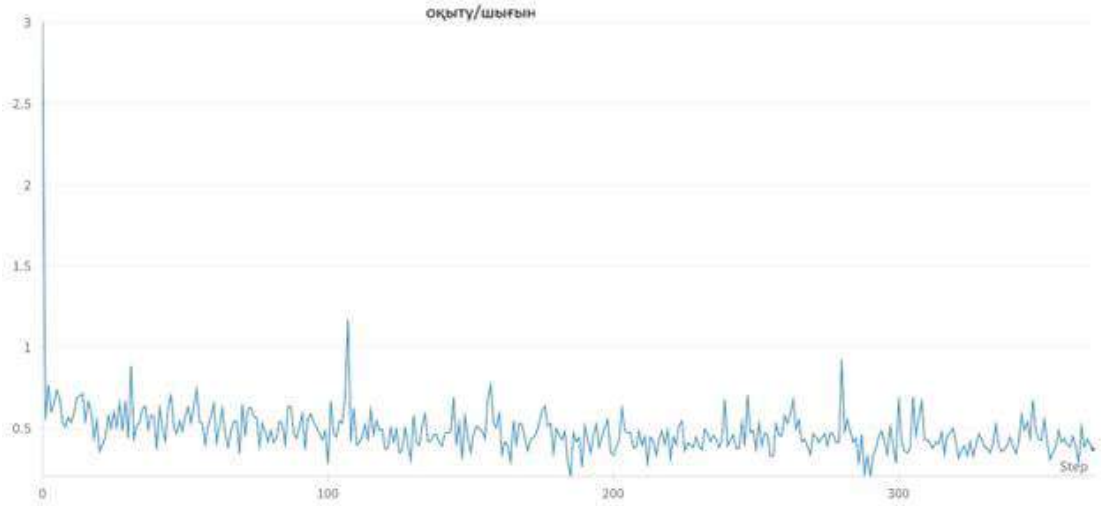
```
model_input = tokenizer(eval_prompt, return_tensors="pt").to("cuda")

model.eval()
with torch.inference_mode():
    print(tokenizer.decode(model.generate(**model_input, max_new_tokens=100)[0], skip_special_tokens=True))
```

```
Setting `pad_token_id` to `eos_token_id`:128001 for open-end generation.


күйші стил ретінде өмір туралы жазып беріңіз

---
Қазір де, ақырда да
Біздің мұның арасында
Ешқайда да жоқ емес
Өмірдің бұл мүшелінің
Біздің бұл мүшелінің
Өмір туралы жазып беріңіз
θ
```

Сурет 3. Модельдің берген жауабы

Бұл тәжірибе LLama 3.2 3B моделін пайдалану арқылы орындалған. Модель tokenizer арқылы мәтіндік сұранысты (prompt) өңдеп, generate әдісімен жаңа мәтін құраған. LLaMA 3.2 3B (Large Language Model Meta AI) – Meta компаниясы әзірлеген, 3.2 миллиард параметрден тұратын, қуатты және жеңілдетілген үлкен тілдік модель. Бұл модель LLaMA 3 сериясының шағын, бірақ тиімді нұсқасы болып саналады және төмен ресурсты құрылғыларда (мысалы, бір A10 немесе T4 GPU-да) қолдануға бейімделген [13].

4-суретте LLM моделін оқыту барысындағы **train/loss** (оқыту шығыны) метрикасының графигі көрсетілген. X осінде – оқыту қадамдары (step), Y осінде – шығын мәні (loss) бейнеленген.



Сурет 4. LLM моделін оқыту барысындағы train/loss (оқыту/шығын) метрикасының графигі

Алғашқы оқыту қадамдарында шығын мәні (loss) жоғары болғанымен (~2.8), бірнеше он қадам ішінде күрт төмендеп, тұрақты мәндерге жақындағаны байқалады. Оқыту процесі барысында loss шамамен 0.4–0.6 аралығында тербеліп отырды, бұл модельдің деректерге бейімделу деңгейінің жеткілікті екенін көрсетеді.

Дискуссия

Сирек кездесетін биік шыңдар — жеке қадамдардағы қиын үлгілерге немесе шағын батч өлшеміне байланысты ауытқулар. Дегенмен, жалпы тренд бойынша модельдің тұрақты үйренгені және артық үйрену (overfitting) белгілерінің байқалмағаны көрініп тұр. Бұл нәтижелер модельдің қазақ тіліндегі OCR арқылы алынған мәтіндермен және ұлттық стильдегі (мысалы, күйші тілі) тілдік құрылымдармен сәтті оқытылғанын дәлелдейді. Модель генерация барысында бейнелі, поэтикалық мәтіндер құра алатын деңгейге жетті, бұл оның тілдің терең құрылымдарын меңгеру қабілетін көрсетеді.

Қорытынды

Құрастырылған датасет LLM модельдерін оқыту үшін жоғары құндылыққа ие. Біріншіден, мәтіндер тақырыптар мен жанрлар тұрғысынан кең ауқымды қамтиды, бұл модельдің әртүрлі деректерге бейімделіп үйренуіне мүмкіндік береді. Екіншіден, метаақпараттың енгізілуі модельге мәтіннің контексін, авторын және жанрлық ерекшеліктерін жақсырақ түсінуге көмектеседі. Бұл әсіресе мәтін генерациясы, машиналық аударма және тақырыптық құрылымды талдау сияқты міндеттер үшін аса маңызды. JSON форматы өңдеуге ыңғайлы әрі қазіргі NLP фреймворктарына үйлесімді болғандықтан таңдалды.

Атқарылған жұмыстың нәтижелері жасалған тәсілдің масштабталатын және әмбебап екенін көрсетеді. Өңделген деректер тек LLM модельдерін оқытуда ғана емес, сонымен қатар арнайы тілдік ресурстарды – тақырыптық корпустарды, жиілік сөздіктерді және тіл талдауға арналған дерекқорларды жасау үшін де қолдануға болады. Бұл қазақ тіліндегі NLP бағыттарын дамытудың жаңа мүмкіндіктерін ашады, соның ішінде машиналық аударманы жақсарту, мәтіндерді автоматты түрде рефераттау және интеллектуалды іздеуді дамыту.

Алғыс

Бұл зерттеу жұмысы Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің BR24993001 бағдарламалық-нысаналы қаржыландыруы аясында «Қазақ тілін және технологиялық прогресті қолдау үшін үлкен тілдік модельді (LLM) құру» жобасы бойынша қаржылық қолдауымен орындалды.

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1] Çetintaş İ., Müngen A. A. Using Pre-Processing Methods to Improve OCR Performances of Digital Historical Documents // Proceedings of the 2021 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). – 2021. – P. 1–5.

[2] Chen Y., Ströbel P. B. TrOCR Meets Language Models: An End-to-End Post-correction Approach // Proceedings of the IEEE International Conference on Document Analysis and Recognition. – 2024.

[3] Nguyen T., Jatowt A., Coustaty M., Doucet A. Survey of Post-OCR Processing Approaches // ACM Computing Surveys. – 2021. – Vol. 54. – P. 1–37.

[4] Yeshpanov R., Khassanov Y., Varol H. A. KazNERD: Kazakh Named Entity Recognition Dataset // Proceedings of the Thirteenth Language Resources and Evaluation Conference (LREC 2022). – Marseille, France: European Language Resources Association, 2022. – P. 417–426.

[5] Mussakhojayeva S., Khassanov Y., Varol H. A. KSC2: An Industrial-Scale Open-Source Kazakh Speech Corpus // Proceedings of the 23rd INTERSPEECH Conference. – 2022. – P. 1367–1371.

[6] Toiganbayeva N. A., Kasem M., Abdimanap G., Bostanbekov K., Abdelrahman A., Alimova A., Nurseitov D. KOHTD: Kazakh Offline Handwritten Text Dataset // Signal Processing: Image Communication. – 2022. – Vol. 108. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596522001217

[7] Yeshpanov R., Varol H. A. KazSAnDRA: Kazakh Sentiment Analysis Dataset of Reviews and Attitudes // Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024). – Torino, Italy: ELRA, ICCL, 2024. – P. 9657–9667.

[8] Kadyrbek N., Tuimebayev Z., Mansurova M., Viegas V. The Development of Small-Scale Language Models for Low-Resource Languages, with a Focus on Kazakh and Direct Preference Optimization // Big Data and Cognitive Computing. – 2025. – Vol. 9, № 5. – Art. 137. – DOI: 10.3390/bdcc9050137.

[9] Brown T., Mann B., Ryder N., et al. Language Models are Few-Shot Learners // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020). – 2020. – Vol. 33. – P. 1877–1901.

[10] Achiam O. J., Adler S., Agarwal S., et al. GPT-4 Technical Report. – 2023.

[11] Chowdhery A., Narang S., Devlin J., et al. PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways // arXiv. – 2022. – arXiv:2204.02311.

[12] Xue L., Constant N., Roberts A., et al. mT5: A Massively Multilingual Pre-trained Text-to-Text Transformer // Proceedings of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. – 2020.

[13] Meta AI. LLaMA: Open Foundation and Instruction Models [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://ai.meta.com/llama/ (дата обращения: 17.12.2025).

References

[1] Çetintaş İ., Müngen A. A. Using Pre-Processing Methods to Improve OCR Performances of Digital Historical Documents // Proceedings of the 2021 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). – 2021. – P. 1–5.

[2] Chen Y., Ströbel P. B. TrOCR Meets Language Models: An End-to-End Post-correction Approach // Proceedings of the IEEE International Conference on Document Analysis and Recognition. – 2024.

[3] Nguyen T., Jatowt A., Coustaty M., Doucet A. Survey of Post-OCR Processing Approaches // ACM Computing Surveys. – 2021. – Vol. 54. – P. 1–37.

[4] Yeshpanov R., Khassanov Y., Varol H. A. KazNERD: Kazakh Named Entity Recognition Dataset // Proceedings of the Thirteenth Language Resources and Evaluation Conference (LREC 2022). – Marseille, France: European Language Resources Association, 2022. – P. 417–426.

[5] Mussakhojayeva S., Khassanov Y., Varol H. A. KSC2: An Industrial-Scale Open-Source Kazakh Speech Corpus // Proceedings of the 23rd INTERSPEECH Conference. – 2022. – P. 1367–1371.

[6] Toiganbayeva N. A., Kasem M., Abdimanap G., Bostanbekov K., Abdelrahman A., Alimova A., Nurseitov D. KOHTD: Kazakh Offline Handwritten Text Dataset // Signal Processing: Image Communication. – 2022. – Vol. 108.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596522001217

[7] Yeshpanov R., Varol H. A. KazSAnDRA: Kazakh Sentiment Analysis Dataset of Reviews and Attitudes // Proceedings of the 2024 Joint International Conference on Computational Linguistics, Language Resources and Evaluation (LREC-COLING 2024). – Torino, Italy: ELRA, ICCL, 2024. – P. 9657–9667.

[8] Kadyrbek N., Tuimebayev Z., Mansurova M., Viegas V. The Development of Small-Scale Language Models for Low-Resource Languages, with a Focus on Kazakh and Direct Preference Optimization // Big Data and Cognitive Computing. – 2025. – Vol. 9, № 5. – Art. 137. – DOI: 10.3390/bdcc9050137.

[9] Brown T., Mann B., Ryder N., et al. Language Models are Few-Shot Learners // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020). – 2020. – Vol. 33. – P. 1877–1901.

[10] Achiam O. J., Adler S., Agarwal S., et al. GPT-4 Technical Report. – 2023.

[11] Chowdhery A., Narang S., Devlin J., et al. PaLM: Scaling Language Modeling with Pathways // arXiv. – 2022. – arXiv:2204.02311.

[12] Xue L., Constant N., Roberts A., et al. mT5: A Massively Multilingual Pre-trained Text-to-Text Transformer // Proceedings of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. – 2020.

[13] Meta AI. LLaMA: Open Foundation and Instruction Models [Electronic resource]. – 2024. – URL: https://ai.meta.com/llama/ (accessed December 17, 2025).

МРНТИ 28.23.15

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.023

Д. Узак [1*], М.М. Мералиев [2], А. Г. Серек [3], А.К. Хачатрян [4], Д.У. Сексенова [5]

[1]Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан
[2]Университет имени Сулеймана Демиреля (SDU), г. Алматы, Казахстан
[3]Astana IT University, г. Астана, Казахстан
[4]Каспийский государственный университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, г.Актау, Казахстан
[5]Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан,
[*]*e-mail: d_uzak@kbtu.kz*

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Аннотация

В исследовании предлагается гибридный метод автоматизированного тестирования на основе искусственного интеллекта для повышения качества программного обеспечения. Он включает предсказание дефектов на основе нейронных сетей BiLSTM, расчёт приоритета тестов с помощью Q-обучения и метаморфное тестирование для проверки в средах без оракула. Метод обеспечивает более эффективное тестирование с повышенной точностью и экономией затрат. Компоненты системы были реализованы на Python с использованием PyTorch и OpenAI Gym, а развертывание осуществлялось с помощью Docker Swarm в среде CI/CD. Эксперименты показали сокращение времени тестирования на 50%, повышение точности обнаружения дефектов на 35-40% и снижение человеческого участия на 60-70% по сравнению с ручным тестированием. Предложенный подход демонстрирует практическую применимость в agile-средах и конвейерах CI/CD.

Ключевые слова: автоматизированное тестирование, искусственный интеллект, машинное обучение, BiLSTM, Q-обучение, метаморфное тестирование, качество ПО, DevOps.

Д. Узак[1], М.М. Мералиев[2], А. Г. Серек[3], А.К. Хачатрян[4], Д.У. Сексенова[5]
[1]Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[2]Сулейман Демирель атындағы университет (SDU), Алматы қ., Қазақстан
[3]Astana IT University, Астана қ., Қазақстан
[4]Ш. Есенов атындағы Каспий мемлекеттік технологиялар және инжиниринг университеті, Ақтау қ., Қазақстан,
[5]Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

БАҒДАРЛАМАЛЫ ҚҰРАЛДЫҢ САПАСЫН АРТТЫРУ ҮШІН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ НЕГІЗІНДЕГІ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН СЫНАҚ ЖҮЙЕЛЕРІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЕНГІЗУ

Аңдатпа

Зерттеу бағдарламалық жасақтаманың сапасын арттыру үшін жасанды интеллект негізіндегі гибридті автоматтандырылған сынақ әдісін ұсынады. Ол BiLSTM жасанды нейрондық желілері негізіндегі ақаулы болжауды, Q-оқыту арқылы сынақтың басымдығын есептеуді және оракулсыз орталарда тексеру үшін метаморфтық сынақты қолданады. Әдіс жоғары дәлдік пен шығындарды үнемдеу тұрғысынан тиімдірек сынақты қамтамасыз етеді. Жүйе компоненттері CI/CD ортасында Docker Swarm арқылы іске қосылуымен бірге Python тілінде PyTorch және OpenAI Gym көмегімен іске асырылды. Эксперименттер қолмен жүргізілетін сынақпен салыстырғанда сынақ уақытын 50% қысқартуды, ақауларды анықтау дәлдігін 35-40% арттыруды және адамның қатысуын 60-70% азайтуды көрсетті. Ұсынылған тәсіл agile-орталарда және CI/CD конвейерлерінде практикалық қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Түйін сөздер: автоматтандырылған сынақ, жасанды интеллект, машиналық оқыту, BiLSTM, Q-оқыту, метаморфтық сынақ, бағдарламалық жасақтама сапасы, DevOps.

D. Uzak[1], M.M. Meraliyev[2], A.G. Serek[3], A.K. Khachatryan[4], D.U. Seksenova[5]
[1]Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan
[2]Suleyman Demirel University (SDU), Almaty, Kazakhstan
[3]Astana IT University, Astana, Kazakhstan
[4]Caspian State University of Technologies and Engineering named after Sh. Yessenov, Aktau, Kazakhstan
[5]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AI-BASED AUTOMATED TESTING SYSTEMS FOR IMPROVING SOFTWARE QUALITY

Abstract

The study proposes a hybrid AI-driven automated testing method for enhancing software quality. It employs defect prediction based on BiLSTM neural networks, test priority calculation via Q-learning, and metamorphic testing for verification in oracle-free environments. The method achieves more effective testing with greater accuracy and cost savings. System components were implemented in Python using PyTorch and OpenAI Gym, with deployment via Docker Swarm in a CI/CD environment. Experiments demonstrated a 50% reduction in testing time, 35-40% improvement in defect detection accuracy, and 60-70% decrease in human involvement compared to manual testing. The proposed approach shows practical applicability in agile environments and CI/CD pipelines.

Keywords: automated testing, artificial intelligence, machine learning, BiLSTM, Q-learning, metamorphic testing, software quality, DevOps.

Введение

Основные положения. Предложен гибридный фреймворк автоматизированного тестирования, интегрирующийBiLSTM для предсказания дефектов, Q-обучение для приоритизации тестов и метаморфное тестирование для валидации в условиях отсутствия оракула. Экспериментальные результаты показывают значительное улучшение ключевых метрик: сокращение времени выполнения тестов на 50%, повышение точности обнаружения дефектов на 35-40% и снижение затрат на человеческие ресурсы на 60-70%. Система демонстрирует хорошую масштабируемость и адаптивность к проектам различногоразмера и сложности, что подтверждает её практическую применимость в современных agile- и DevOps-средах разработки ПО.

С каждым годом программные системы становятся всё сложнее, что увеличивает затраты и усилия на поддержание качества кода [1]. Согласно оценкам, около 95% дефектов не обнаруживаются на начальных этапах разработки, и почти 90% программного обеспечения выпускается с дефектами, которые исправляются уже после релиза. Эти дефекты могут приводить к уязвимостям безопасности, проблемам производительности и неудовлетворённости конечных пользователей, существенно влияя на надёжность выпускаемых систем.

Традиционные методы тестирования программного обеспечения, включая ручное тестирование, модульное тестирование и автоматизацию на основе скриптов, обычно требуют значительных временных и человеческих ресурсов и подвержены ошибкам [2]. Даже такие инструменты автоматизации, как Selenium и JUnit, всё ещё сильно зависят от разрабатываемых вручную тестовых случаев, что ограничивает их масштабируемость и гибкость. Кроме того, эти инструменты с трудом успевают за быстрой эволюцией современной разработки ПО в различных средах, таких как agile-методологии и среды CI/CD, где интеграция нового кода требует быстрого тестирования и развёртывания [3].

Развитие культуры DevOps в сочетании с распространением экосистем open-source программного обеспечения значительно увеличило количество и частоту изменений кода, что часто делает непрактичным тщательную ручную проверку каждого изменения. Автоматизированные фреймворки тестирования могут устаревать, становиться ненадёжными и слишком общими, что приводит к пропуску дефектов и ложным срабатываниям. Эти

проблемы требуют разработки более совершенных, динамичных и масштабируемых методов тестирования [4].

Достижения в области искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) открыли новые парадигмы тестирования [5]. Системы на основе ИИ могут автоматизировать ключевые задачи тестирования, такие как предсказание ошибок, генерация тестовых случаев и определение приоритетов тестирования. Например, архитектуры глубокого обучения, включая сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и их двунаправленный вариант (BiLSTM), показали высокую эффективность при работе с последовательными данными, особенно при анализе исходного кода [6]. Модели BiLSTM имеют дополнительное преимущество, заключающееся в возможности улавливать как прямые, так и обратные зависимости в коде, что делает их более точными в прогнозировании аномалий или ошибок.

Однако опора исключительно на нейронные сети недостаточна. Эти системы требуют больших объёмов, размеченных данных высокого качества, значительных вычислительных ресурсов и могут принимать решения, которые сложно объяснить. Аналогично, эвристические и правила-ориентированные системы также имеют ограничения в обобщаемости выявленных паттернов. Таким образом, гибридные модели, сочетающие сильные стороны различных методологий для достижения лучшего баланса между точностью, объяснимостью и масштабируемост привлекают всё больше внимания [7].

Данное исследование представляет интегрированный фреймворк для автоматизированного тестирования, состоящий из трёх взаимосвязанных элементов:

- BiLSTM – нейронная сеть для прогнозирования дефектов на уровне кода;
- Q-обучение – алгоритм обучения с подкреплением для динамической приоритизации тестов;
- Метаморфное тестирование – для валидации в условиях отсутствия оракула, когда ожидаемые выходные данные неизвестны или неоднозначны.

Интеграция этих методологий позволяет системе проводить автоматический анализ кода, определять релевантные тестовые случаи и оценивать производительность системы при неполных спецификациях. Контекстное моделирование последовательностей с помощью BiLSTM помогает обнаруживать код, потенциально содержащий дефекты. Агент Qобучения учится переупорядочивать выполнение тестов на основе предыдущих результатов и эффективности покрытия. Кроме того, метаморфное тестирование помогает повысить надёжность, обеспечивая согласованное поведение в ответ на определённые преобразования входных данных независимо от наличия тестового оракула.

Предлагаемый гибридный фреймворк направлен на снижение затрат на тестирование, увеличение покрытия тестами, уменьшение человеческого вмешательства и адаптацию к постоянному росту кодовых баз. В отличие от решений, использующих облачные вычисления, этот фреймворк создан и работает на локальном оборудовании, что обеспечивает воспроизводимость и контроль затрат [8].

Цель настоящего исследования – изучить и оценить практическую применимость предложенного гибридного подхода на реальных наборах данных программного обеспечения. Задача состоит в том, чтобы продемонстрировать улучшения в обнаружении дефектов, эффективности процедур тестирования и оптимизации ресурсов. Результаты могут способствовать лучшему пониманию интеллектуального тестирования программного обеспечения с акцентом на практические решения по сравнению с традиционными ручными и скриптовыми методологиями.

Методология исследования

В данном исследовании представлен гибридный фреймворк тестирования, состоящий из трёх взаимозависимых элементов: механизма прогнозирования ошибок на уровне кода с помощью нейронной сети архитектуры BiLSTM, метода динамического определения приоритетов тестов на основе Q-обучения и компонента метаморфного тестирования,

используемого для проверки результатов в случаях, когда традиционный тестовый оракул недоступен. Фреймворк был разработан и реализован с использованием доступных локальных ресурсов.

Архитектура системы

Система состоит из трёх взаимосвязанных модулей:

- BiLSTM для идентификации потенциально ошибочных сегментов кода;
- Q-обучение для определения приоритетов выполнения тестовых случаев;
- Метаморфное тестирование для проверки корректности в сценариях без оракула.

Как показано на рисунке 1, BiLSTM анализирует паттерны программных дефектов в кодовой базе. Затем информация передаётся агенту Q-обучения, который определяет приоритеты и упорядочивает тестовые случаи в соответствии с собранными метриками производительности. Наконец, метаморфное тестирование оценивает, остаётся ли поведение кода согласованным в соответствии с заданными преобразованиями входных данных.

Рисунок 1. Архитектура предлагаемого гибридного фреймворка тестирования.

Прогнозирование дефектов с помощью BiLSTM. На первом этапе используется двунаправленная сеть с долгой краткосрочной памятью (BiLSTM) для анализа последовательностей кода. Данная модель обрабатывает предоставленные токены кода в обоих направлениях, что позволяет лучше идентифицировать сложные контекстные взаимосвязи. Для обучения модели используется набор данных CodeXGLUE, который включает различные подзадачи, такие как генерация модульных тестов, обнаружение дефектов, а также исправление кода. Модель выдаёт бинарный результат, определяющий, содержит ли данный фрагмент кода дефект. Предыдущие исследования показали, что BiLSTM эффективно справляется с этой задачей [9].

Определение приоритетов тестов с помощью Q-обучения. После прогнозирования дефектов процесс оценки оптимизируется с помощью методов обучения с подкреплением. Процесс формулируется как марковский процесс принятия решений (МППР), в котором:

- Состояние отражает текущие метрики покрытия, результаты прогнозирования BiLSTM и историю предыдущих запусков тестов;
- Действие связано с выбором следующего тестового случая;
- Вознаграждение рассчитывается на основе прироста покрытия тестами, снижения ложных срабатываний и эффективности тестирования.

Алгоритм Q-обучения постоянно обновляет Q-таблицу, накапливая опыт, полученный в процессе тестирования, что способствует прогрессивной оптимизации стратегии выбора тестовых случаев. Цель итеративной оптимизации в данном контексте – найти больше программных дефектов за меньшее количество циклов, тем самым повышая эффективность [10].

Метаморфное тестирование. В случаях, когда ожидаемые результаты неясны или их сложно определить, система использует метаморфное тестирование. Этот подход основан на идее метаморфных отношений – организованных связей между изменениями входных данных и последующими различиями в выходных данных [11]. Например, если обращение входной строки должно приводить к обращённому выходу, любые отклонения от этого поведения указывают на наличие потенциальной ошибки. Это позволяет фреймворку оценивать поведение в ситуациях без предопределённого оракула.

Реализация и инструменты. Система написана на Python. Модель BiLSTM реализована с использованием PyTorch. Аспект обучения с подкреплением реализован с помощью пользовательской среды в стиле OpenAI Gym. Управление CI/CD осуществляется с помощью Jenkins. Для создания среды развёртывания и выполнения используется Docker Swarm [12].

Все обучение и тестирование выполняются локально на рабочей станции с графическим процессором NVIDIA RTX 5070 Ti и процессором AMD Ryzen 7 7800X3D. Локальное выполнение обеспечивает воспроизводимость и снижает эксплуатационные расходы.

Метрики оценки.

Производительность системы оценивается по следующим метрикам:

- F1-мера – для оценки точности прогнозирования дефектов;
- Время выполнения тестов – для записи общего ускорения;
- Эффективность затрат – прирост производительности по сравнению с использованием ресурсов.

В следующем разделе будут представлены измерения и анализ этих метрик.

Результаты исследования

Для определения эффективности предложенного гибридного фреймворка тестирования был проведён ряд экспериментов, в которых проводилось сравнение нашей системы на основе искусственного интеллекта с традиционными подходами ручного тестирования. Оценка основывалась на трёх основных параметрах: длительность тестирования, общая стоимость и точность обнаружения дефектов. Эти три параметра представляют фундаментальные компромиссы, присущие любому конвейеру тестирования, особенно в средах быстрой разработки, таких как рабочие процессы на основе agile и DevOps.

Сравнение с ручным тестированием. На рисунке 2 представлено сравнение традиционных практик ручного тестирования и предлагаемого фреймворка на основе искусственного интеллекта по трём основным показателям производительности: время, стоимость и точность. Диаграмма показывает, что подход на основе ИИ стабильно превосходит ручное тестирование по всем рассматриваемым аспектам, что указывает на его реализуемость в реальных приложениях, требующих своевременного выполнения, а также в крупномасштабных средах разработки.

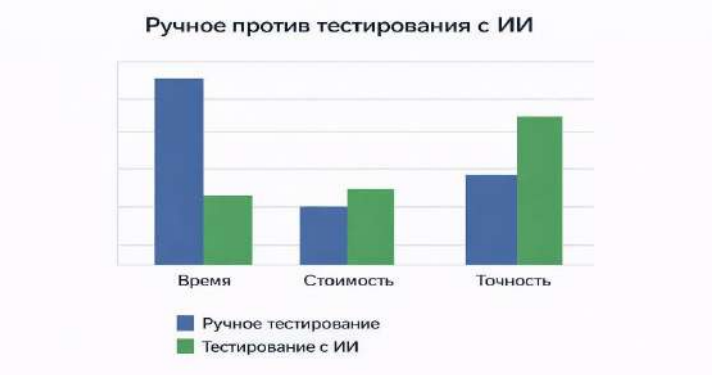


Рисунок 2. Сравнение производительности ручного и AI-тестирования по трём ключевым метрикам.

Время выполнения. Система ИИ сократила традиционное время, затрачиваемое на тестовые циклы, более чем на 50%. Это увеличение в значительной степени связано с компонентом Q-обучения, который эффективно научился определять приоритеты тестовых случаев с более высоким потенциалом раннего обнаружения дефектов [13]. С другой стороны, ручное тестирование следует жёсткому и часто громоздкому порядку выполнения, что приводит к значительной неэффективности при нехватке времени.

Точность обнаружения дефектов. Компонент BiLSTM значительно повысил точность идентификации дефектов. Эффективно выявляя контекстные аномалии, часто невидимые для традиционных методов, основанных на правилах или эвристиках, путём изучения различных исполнений исходного кода с обеих сторон, система искусственного интеллекта продемонстрировала среднюю точность обнаружения дефектов на 35-40% выше, особенно в сложных блоках кода с несколькими уровнями логики [14].

Эффективность затрат. Создание и обучение системы искусственного интеллекта требуют первоначальных вложений ресурсов, а также времени для разработки модели; однако текущие эксплуатационные расходы значительно ниже [15]. Традиционное ручное тестирование предполагает высокий уровень человеческого участия, что может замедлять обширные или итеративные практики разработки. Предложенная система сократила человеческое участие на 60-70%, особенно в областях регрессионного тестирования, а также в множественных итерациях тестовых циклов [16].

Вклад компонентов. Каждый элемент предложенного фреймворка вносит вклад в определение общего воздействия:

- BiLSTM – повысил локализацию дефектов за счёт понимания сложной семантики кода и взаимозависимостей [17];

- Q-обучение – улучшил планирование тестовых случаев, сократив время, затрачиваемое на менее ценные тесты [10];

- Метаморфное тестирование – позволяет проводить валидацию без необходимости точных ожидаемых выходных данных, что особенно полезно для функций преобразования данных и конвейеров ИИ [18]. Вместе эти компоненты дополняют друг друга, предлагая более полную и универсальную методологию тестирования, чем традиционные фреймворки.

Масштабируемость и адаптивность. Система тестировалась на проектах разного размера – от небольших служебных скриптов до крупных open-source систем. Она продемонстрировала значительную гибкость как по размеру кодовой базы, так и по сложности. В частности, агент Q-обучения корректировал свои политики тестирования в соответствии с архитектурной структурой и историей покрытия каждого проекта [19].

Воспроизводимость и инфраструктура. Тестирование проводилось локально с использованием графического процессора NVIDIA RTX 5070 Ti и процессора Ryzen 7 7800X3D. Использование локальной инфраструктуры позволило обеспечить воспроизводимость, контроль затрат и максимальную прозрачность в настройке сред. Docker Swarm и Jenkins использовались для эмуляции интеграции CI/CD [12].

Ограничения. Несмотря на эти обнадёживающие результаты, были выявлены некоторые ограничения. Производительность модели BiLSTM зависит от качества и количества обучающих данных [20]. Для конкретных языков программирования или редких паттернов кодирования точность может снижаться. Аналогично, Q-обучение требует времени на исследование и может выбирать субоптимальные порядки тестов на ранних этапах. Наконец, метаморфное тестирование также предполагает наличие хороших метаморфных отношений [11], которые могут отсутствовать для сложной доменной логики.

Резюме результатов. В целом, гибридная инфраструктура тестирования на основе ИИ обеспечила стабильно улучшенную производительность с точки зрения скорости, точности, а также экономической эффективности. Она может смягчить узкие места в тестировании, а также повысить качество продукта, особенно в agile-средах или средах быстрого развёртывания.

Дискуссия

Представленный гибридный фреймворк демонстрирует значительный потенциал для трансформации процессов тестирования программного обеспечения. Полученные результаты подтверждают, что интеграция методов машинного обучения, обучения с подкреплением и метаморфного тестирования позволяет эффективно решать ключевые проблемы современных практик разработки ПО.

Сравнение с традиционными методами показало, что предложенный подход не только сокращает временные и финансовые затраты, но и повышает надёжность обнаружения дефектов. Это особенно важно в контексте DevOps и CI/CD, где скорость и качество обратной связи критически важны. Способность системы адаптироваться к различным кодовым базам и проектам указывает на её универсальность и практическую применимость в реальных условиях.

Однако следует отметить, что успешное внедрение подобных систем требует определённых условия. Качество и репрезентативность обучающих данных остаются ключевыми факторами, влияющими на эффективность компонента BiLSTM. Кроме того, необходимость формулирования метаморфных отношений для специфических областей может требовать привлечения экспертов, что частично ограничивает автоматизацию.

Важным аспектом для обсуждения является также интерпретируемость решений, принимаемых ИИ-компонентами. В отличие от традиционных методов, где логика тестирования явно задана, в системах на основе машинного обучения процесс принятия решений может быть неочевидным. Это создаёт дополнительные требования к обеспечению прозрачности и доверия со стороны разработчиков и тестировщиков.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция онлайнобучения, которое позволит системе непрерывно адаптироваться к изменениям в кодовой базе без необходимости полного переобучения. Кроме того, расширение поддержки различных языков программирования и парадигм разработки сделает фреймворк более универсальным.

Заключение

В данной статье представлена новая гибридная система тестирования на основе машинного обучения, которая может радикально улучшить качество программного обеспечения за счёт автоматизации большей части процесса тестирования. Эта система сочетает существующие методы машинного обучения с интеллектуальным управлением тестированием, а также новые методы валидации для решения некоторых ключевых проблем разработки программного обеспечения, включая обнаружение скрытых ошибок, оптимизацию тестовых ресурсов, а также проверку в случаях, когда доверенный тестовый оракул отсутствует.

Ключевыми компонентами фреймворка являются: двунаправленная сеть с долгосрочной краткосрочной памятью (BiLSTM) для точного обнаружения дефектов на уровне кода; метод обучения с подкреплением Q-обучение для интеллектуального, адаптивного определения приоритетов тестовых случаев; и метаморфное тестирование для обеспечения высокоэффективной проверки в средах без оракула. Комбинированный подход использует сильные стороны каждого из этих методов для достижения синергетического эффекта, превосходящего традиционные ручные и правила-ориентированные методы тестирования.

Практический опыт работы с рядом программных проектов подтвердил практическую ценность гибридного подхода. В частности, интеграция с BiLSTM способствовала обнаружению сложных аномалий кода, которые обычно ускользают от традиционных статических анализаторов, что позволило обеспечить раннее обнаружение дефектов. В то же время Q-обучение постепенно улучшало последовательность, а также набор тестовых случаев для адаптации к различным результатам тестов, что повысило эффективность локализации неисправностей, а также сократило общее время выполнения тестов. Метаморфизм способствовал более эффективной проверке покрытия за счёт всестороннего тестирования

согласованности поведения кода относительно преобразований входных данных, что успешно обошло проблему оракула, распространённую в большинстве реальных приложений.

Система была разработана, реализована и тщательно протестирована в средах локального оборудования, и она неизменно обеспечивала прирост производительности с точки зрения точности, эффективности, а также экономической эффективности в различных проектах разработки программного обеспечения. Результаты показывают огромный потенциал для беспроблемного внедрения в текущую практику разработки программного обеспечения, особенно в конвейерах непрерывной интеграции/непрерывного развёртывания (CI/CD) и agile-разработке, где важны быстрая обратная связь и оперативность.

Несмотря на обнадёживающие результаты, следует отметить некоторые оговорки. Успех фреймворка во многом зависит от качества, а также репрезентативности используемых наборов данных при обучении моделей BiLSTM. Низкокачественные или неоднородные наборы данных могут негативно повлиять на эффективность прогнозирования дефектов. Во-вторых, идентификация подходящих метаморфных отношений требует знаний предметной области и может быть не всегда возможна для некоторых категорий программных систем, что в краткосрочной перспективе затрудняет применение метаморфного тестирования в этих случаях.

Будущие направления исследований включают преодоление этих проблем. Повышение способности BiLSTM к обобщению за счёт обучения на более крупных и разнообразных наборах данных, а также более продвинутое дополнение данных должно быть приоритетом. Дальнейшая поддержка других языков программирования сделает фреймворк более универсальным в различных программных средах. Включение возможностей онлайн-обучения позволит системе непрерывно адаптироваться к развивающимся кодовым базам и средам тестовых случаев, что позволит обеспечить высокую точность и релевантность предметной области в течение длительного периода.

В заключение, предлагаемый здесь гибридный фреймворк тестирования на основе ИИ представляет собой значительный шаг вперед в автоматизации и оптимизации процессов тестирования программного обеспечения. Интеграция современных методов машинного обучения, обучения с подкреплением и метаморфного тестирования закладывает прочную основу для будущих исследований в области обеспечения качества программного обеспечения, направленных на создание более надежных и сопровождаемых программных систем.

Информация о материале публикации. Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы. Автор выражает благодарность научному руководителю проф. С.С. Оспанову за ценные замечания и руководство в ходе исследования.

Список использованных источников

[1] Kumar S. Reviewing Software Testing Models and Optimization Techniques: An Analysis of Efficiency and Advancement Needs // Journal of Computers, Mechanical and Management. – 2023. – Vol. 2, No. 1. doi: 10.57159/gadl.jcmm.2.1.23041

[2] Salahat M., Said R.A., Hamid K., et al. Software Testing Issues Improvement in Quality Assurance // 2nd International Conference on Business Analytics for Technology and Security (ICBATS). – 2023. doi: 10.1109/ICBATS57792.2023.10111145

[3] Al-Adhaileh M.H., Aldhyani T.H.H., Alsaade F.W., et al. Groundwater Quality: The Application of Artificial Intelligence // Journal of Environmental and Public Health. – 2022. – Vol. 2022. doi: 10.1155/2022/8425798

[4] Jha N., Popli R. Artificial Intelligence for Software Testing – Perspectives and Practices // 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Technologies (CCICT). – 2021. doi: 10.1109/CCICT53244.2021.00075

[5] Carlos T.M., Ibrahim M.N. Practices in Software Testing in Cameroon: Challenges and Perspectives // Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries. – 2021. – Vol. 87, No. 3. doi: 10.1002/isd2.12165

[6] Dörsam B. Softwaretests- und Software-Qualitätsthemen in der Hochschullehre // In: Plödereder E., Grunske L., Schneider E., Ull D. (Hrsg.), Informatik 2014. – Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V., 2014. – P. 1745-1746. URL: https://dspace.gi.de/handle/20.500.12116/2787

[7] Pournaghshband H. Software Quality Testing – Issues and Concerns // Proceedings of the International Conference on Software Engineering Theory and Practice (SETP 2010). – 2010. URL: http://foreigndata.cmes.org/ztHYlist.aspx?id=1044139

[8] Goodenough J.B., McGowan C.L. Software Quality Assurance: Testing and Validation // Proceedings of the IEEE. – 1980. – Vol. 68, No. 9. doi: 10.1109/PROC.1980.11808

[9] Aleti A. Software Testing of Generative AI Systems: Challenges and Opportunities // 2023 IEEE/ACM International Conference on Software Engineering: Future of Software Engineering (ICSE-FoSE). – 2023. doi: 10.1109/ICSE-FoSE59343.2023.00009

[10] Job M.A. Automating and Optimizing Software Testing using Artificial Intelligence Techniques // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2021. – Vol. 12, No. 5. doi: 10.14569/IJACSA.2021.0120571

[11] Gao J., Tao C., Jie D., Lu S. Invited Paper: What is AI Software Testing? And Why // 13th IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE). – 2019. doi: 10.1109/SOSE.2019.00015

[12] Tao C., Gao J., Wang T. Testing and Quality Validation for AI Software – Perspectives, Issues, and Practices // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937107

[13] Tahvili S., Hatvani L. Artificial Intelligence Methods for Optimization of the Software Testing Process: With Practical Examples and Exercises. – Elsevier, 2022. doi: 10.1016/C2021-0-00433-8

[14] Ozekbay Y. Designing Artificial Intelligence for Deep Software Testing using the Method of Model Checking // InterConf. – 2022. – No. 28(137). doi: 10.51582/interconf.19-20.12.2022.039

[15] Ramchand S., Shaikh S., Alam I. Role of Artificial Intelligence in Software Quality Assurance // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 295. doi: 10.1007/978-3-030-82196-8_10

[16] Krichen M. How Artificial Intelligence Can Revolutionize Software Testing Techniques // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 649. doi: 10.1007/978-3-031-27499-2_18

[17] Verma I., Kumar D., Goel R. Implementation and Comparison of Artificial Intelligence Techniques in Software Testing // 6th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON). – 2023. doi: 10.1109/ISCON57294.2023.10112041

[18] Boukhlif M., Hanine M., Kharmoum N. A Decade of Intelligent Software Testing Research: A Bibliometric Analysis // Electronics (Switzerland). – 2023. – Vol. 12, No. 9. doi: 10.3390/electronics12092109

[19] Borah S., Aliliele K.C., Rakshit S., Vajjhala N.R. Applications of Artificial Intelligence in Software Testing // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 375. doi: 10.1007/978-981-16-8763-1_60

[20] Hourani H., Hammad A., Lafi M. The Impact of Artificial Intelligence on Software Testing // 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT). – 2019. doi: 10.1109/JEEIT.2019.8717439

References

[1] Kumar S. (2023). Reviewing Software Testing Models and Optimization Techniques: An Analysis of Efficiency and Advancement Needs. Journal of Computers, Mechanical and Management, 2(1). doi: 10.57159/gadl.jcmm.2.1.23041

[2] Salahat M., Said R.A., Hamid K., et al. (2023). Software Testing Issues Improvement in Quality Assurance. 2nd International Conference on Business Analytics for Technology and Security (ICBATS). doi: 10.1109/ICBATS57792.2023.10111145

[3] Al-Adhaileh M.H., Aldhyani T.H.H., Alsaade F.W., et al. (2022). Groundwater Quality: The Application of Artificial Intelligence. Journal of Environmental and Public Health, 2022. doi: 10.1155/2022/8425798

[4] Jha N., Popli R. (2021). Artificial Intelligence for Software Testing – Perspectives and Practices. 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Technologies (CCICT). doi: 10.1109/CCICT53244.2021.00075

[5] Carlos T.M., Ibrahim M.N. (2021). Practices in Software Testing in Cameroon: Challenges and Perspectives. Electronic Journal of Information Systems in Developing Countries, 87(3). doi: 10.1002/isd2.12165

[6] Dörsam B. (2014). Softwaretests- und Software-Qualitätsthemen in der Hochschullehre. In: Plödereder E., Grunske L., Schneider E., Ull D. (Eds.), Informatik 2014. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V., pp. 1745-1746. URL: https://dspace.gi.de/handle/20.500.12116/2787 (accessed: 12.04.2026)

[7] Pournaghshband H. (2010). Software Quality Testing – Issues and Concerns. Proceedings of the International Conference on Software Engineering Theory and Practice (SETP 2010). URL: http://foreigndata.cmes.org/ztHYlist.aspx?id=1044139 (accessed: 12.04.2026)

[8] Goodenough J.B., McGowan C.L. (1980). Software Quality Assurance: Testing and Validation. Proceedings of the IEEE, 68(9). doi: 10.1109/PROC.1980.11808

*[9] Aleti A. (2023). Software Testing of Generative AI Systems: Challenges and Opportunities. *2023 IEEE/ACM International Conference on Software Engineering: Future of Software Engineering (ICSE-FoSE)*. doi: 10.1109/ICSE-FoSE59343.2023.00009*

[10] Job M.A. (2021). Automating and Optimizing Software Testing using Artificial Intelligence Techniques. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 12(5). doi: 10.14569/IJACSA.2021.0120571

*[11] Gao J., Tao C., Jie D., Lu S. (2019). Invited Paper: What is AI Software Testing? And Why. *13th IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*. doi: 10.1109/SOSE.2019.00015*

[12] Tao C., Gao J., Wang T. (2019). Testing and Quality Validation for AI Software – Perspectives, Issues, and Practices. IEEE Access, 7. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937107

[13] Tahvili S., Hatvani L. (2022). Artificial Intelligence Methods for Optimization of the Software Testing Process: With Practical Examples and Exercises. Elsevier. doi: 10.1016/C2021-0-00433-8

[14] Ozekbay Y. (2022). Designing Artificial Intelligence for Deep Software Testing using the Method of Model Checking. InterConf, 28(137). doi: 10.51582/interconf.19-20.12.2022.039

[15] Ramchand S., Shaikh S., Alam I. (2022). Role of Artificial Intelligence in Software Quality Assurance. Lecture Notes in Networks and Systems, 295. doi: 10.1007/978-3-030-82196-8_10

[16] Krichen M. (2023). How Artificial Intelligence Can Revolutionize Software Testing Techniques. Lecture Notes in Networks and Systems, 649. doi: 10.1007/978-3-031-27499-2_18

[17] Verma I., Kumar D., Goel R. (2023). Implementation and Comparison of Artificial Intelligence Techniques in Software Testing. 6th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON). doi: 10.1109/ISCON57294.2023.10112041

[18] Boukhlif M., Hanine M., Kharmoum N. (2023). A Decade of Intelligent Software Testing Research: A Bibliometric Analysis. Electronics (Switzerland), 12(9). doi: 10.3390/electronics12092109

[19] Borah S., Aliliele K.C., Rakshit S., Vajjhala N.R. (2022). Applications of Artificial Intelligence in Software Testing. Lecture Notes in Networks and Systems, 375. doi: 10.1007/978-981-16-8763-1_60

[20] Hourani H., Hammad A., Lafi M. (2019). The Impact of Artificial Intelligence on Software Testing. 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT). doi: 10.1109/JEEIT.2019.8717439

ИНФОРМАТИКАНЫ ОҚЫТУ ӘДІСТЕМЕСІ. БІЛІМ БЕРУДІ АҚПАРАТТАНДЫРУ

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ИНФОРМАТИКИ. ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

METHODS OF TEACHING COMPUTER SCIENCE. INFORMATIZATION OF EDUCATION

ҒТАХР 20.01.45, 14.33.09

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.024

Б.Г. Бостанов[1*], А.А. Абдисаметова[1], Д.А. Смаилова[2], Т.Т. Тойшыбек[3]

[1]Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[2] Мұхаметжан Тынышбаев атындағы ALT Университеті, Алматы қ., Казахстан
[3]Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[*]*e-mail: bostanov.b@qyzpu.edu.kz*

ОҚУШЫЛАРДА АЛГОРИТМДІК ОЙЛАУ ДАҒДЫЛАРЫН ҚАЛЫПТАСТЫРУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТКЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ОҚЫТУДЫҢ ҚАЖЕТТІЛІГІ

Аңдатпа

Қазіргі білім беруде жасанды интеллект (ЖИ) технологиялары оқу процесінің белсенді қатысушысына айналуда, алайда олардың оқушылардың когнитивтік қабілеттеріне, атап айтқанда алгоритмдік ойлауына әсері әлі де жеткілікті зерттелмеген. Осыған орай мақаланың мақсаты оқушылардың ЖИ-ді пайдалану арқылы алгоритмдік ойлау дағдыларын қалыптастыру процесін сандық және сапалық тұрғыдан талдауға негізделген кешенді аралас зерттеудің нәтижелерін көрсету болып табылады. Мақалалық зерттеуде PRISMA әдісі бойынша библиометриялық талдауды, тесттер мен Лайкерт шкаласы бойынша сауалнамаларды қолдана отырып педагогикалық экспериментті, сондай-ақ оқушылармен сұхбаттарды сапалық тақырыптық талдауды қамтитын аралас дизайн қолданылу барысы баяндалады. Алгоритмдік ойлауды қалыптастыруда ЖИ-дің әсерін зерттеу үшін бақылау және эксперименттік топтарға бөлінген 60 оқушы қатысты. Нәтижелер эксперименттік топта алгоритмдік ойлау деңгейінің статистикалық маңызды өскенін көрсетті. Сауалнама декомпозиция және сыни тұрғыдан ойлау дағдыларының дамуындағы оң динамиканы анықтады (мода мен медиананың ығысуы). Сұхбаттардың тақырыптық талдауы қарапайым сұраулардан диалогқа, нәтижелерді тексеруге және метатанымдық дағдыларды дамытуға дейінгі ЖИ-мен өзара әрекеттесу стратегияларының эволюциясын ашты. Бұл педагогикалық тұрғыдан ұйымдастырылған ЖИ-мен өзара әрекеттесу оқушылардың ойлау стратегияларын өзгертіп, оларды неғұрлым саналы және құрылымды ететіні, сондай-ақ құбылысты зерттеу үшін аралас тәсілдің өнімділігін растайды деген қорытынды жасауға мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: алгоритмдік ойлау, жасанды интеллект, оқушылар, сандық зерттеу, сапалық зерттеу, аралас зерттеу, PRISMA, тақырыптық талдау, Лайкерт шкаласы, есептеу ойлауы.

Б.Г.Бостанов[1], А.А. Абдисаметова[1], Д.А. Смаилова[2], Т.Т. Тойшыбек[3]
[1]Казахский национальный женский педагогический университет, г Алматы., Казахстан
[2]АЛТ Университет имени Мухаметжана Тынышбаева, г Алматы, Казахстан
[3]Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г.Алматы, Казахстан

НЕОБХОДИМОСТЬ ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ФОРМИРОВАНИИ У УЧАЩИХСЯ НАВЫКОВ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ

Аннотация

В современном образовании технологии искусственного интеллекта (ИИ) становятся активным участником учебного процесса, однако их влияние на когнитивные способности учащихся, в частности

на алгоритмическое мышление, остается недостаточно изученным. В связи с этим целью статьи является представление результатов комплексного смешанного исследования, направленного на количественный и качественный анализ процесса формирования алгоритмического мышления у учащихся при использовании ИИ. А также в статье описывается применение смешанного дизайна исследования, включающего библиометрический анализ по методу PRISMA, педагогический эксперимент с использованием тестов и анкетирования по шкале Лайкерта, а также качественный тематический анализ интервью с учащимися. В исследовании приняли участие 60 учащихся, разделённых на контрольную и экспериментальную группы, для изучения влияния ИИ на формирование алгоритмического мышления. Результаты показали статистически значимое повышение уровня алгоритмического мышления в экспериментальной группе. Анкетирование выявило положительную динамику в развитии навыков декомпозиции и критического мышления (смещение моды и медианы). Тематический анализ интервью продемонстрировал эволюцию стратегий взаимодействия с ИИ – от простых запросов к диалогу, проверке результатов и развитию метакогнитивных навыков. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что педагогически организованное взаимодействие с ИИ изменяет стратегии мышления учащихся, делая их более осознанными и структурированными, а также подтверждает продуктивность смешанного подхода для исследования данного явления.

Ключевые слова: алгоритмическое мышление, искусственный интеллект, учащиеся, количественное исследование, качественное исследование, смешанное исследование, PRISMA, тематический анализ, шкала Лайкерта, вычислительное мышление.

B.G. Bostanov[1], A.A. Abdisametova[1], D. Smailova[2], T.T. Toishybek[3]
[1]Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan
[2]Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan;
[3]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

THE NEED FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED TEACHING TO DEVELOP ALGORITHMIC THINKING SKILLS IN STUDENTS

Abstract

In modern education, artificial intelligence (AI) technologies are becoming an active participant in the learning process; however, their impact on students' cognitive abilities, particularly on algorithmic thinking, remains insufficiently studied. In this regard, the aim of the article is to present the results of a comprehensive mixed-method study aimed at the quantitative and qualitative analysis of the process of forming algorithmic thinking in students when using AI. The article also describes the application of a mixed research design, including a bibliometric analysis using the PRISMA method, a pedagogical experiment employing tests and questionnaires based on the Likert scale, as well as a qualitative thematic analysis of interviews with students. The study involved 60 students divided into control and experimental groups to examine the impact of AI on the formation of algorithmic thinking. The results showed a statistically significant increase in the level of algorithmic thinking in the experimental group. The survey revealed positive dynamics in the development of decomposition and critical thinking skills (a shift in the mode and media). The thematic analysis of interviews demonstrated the evolution of strategies of interaction with AI-from simple queries to dialogue, verification of results, and the development of metacognitive skills. The obtained results allow us to conclude that pedagogically organized interaction with AI changes students' thinking strategies, making them more conscious and structured, and also confirms the effectiveness of the mixed-method approach for studying this phenomenon.

Keywords: algorithmic thinking, artificial intelligence (AI), students, quantitative research, qualitative research, mixed methods research, PRISMA, thematic analysis, Likert scale, computational thinking.

Кіріспе

Негізгі ережелер. Ғылыми көзқарастарды нақтылау үшін сандық-сапалық әдістер күрделі құбылыстарды терең түсінуге және мазмұнды білім алуға мүмкіндік беретін таптырмас зерттеу құралдарына айналды. Мақала сапалық зерттеу үдерісіне қатысты кең тараған қате түсініктерді сейілтіп, оның көпқырлы аспектілерімен жұмыс істеуге арналған жан-жақты шолу мен практикалық стратегияларды ұсынуды мақсат етеді. Сандық зерттеулер сандық деректер мен статистикалық талдауға негізделсе, сапалық зерттеулер адам тәжірибесінің бай

мазмұны мен көзқарастарын ашып, сандық өлшеу барысында жиі ескерусіз қалатын контекст пен мағыналық реңктерді қамтиды. Сапалық зерттеуге жүгіну – бұл тек әдіснамалық таңдау емес, әлеуметтік құбылыстардың терең қабаттарын зерттеуге бағытталған ұстаным, ол зерттеушіге зерттелушілердің субъективті тәжірибесін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Зерттеу мақсаты екі бағытты көздейді. Біріншіден, күрделі құбылыстарды зерттеу барысында этикалық әрі ғылыми тұрғыдан қатаң сапалық зерттеулер жүргізу. Екіншіден, сапалық зерттеулер арқылы зерттеу объектісіне қатысты қалыптасқан жаңсақ пікірлерді жойып, сол саладағы түсінікті кеңейту арқылы ғылыми дискурсқа үлес қосу.

Сараптама мен тәжірибеде сапалық деректердің маңыздылығы барған сайын артып, ғылыми ортада нақты бағдар береді. Әсіресе адамдық және әлеуметтік тәжірибенің нәзік қырларын тек сандық көрсеткіштер арқылы толық сипаттау мүмкін емес қазіргі кезеңде сапалық зерттеулердің де құндылығы ерекше. Сондықтан да оқушыларда алгоритмдік ойлау дағдыларын қалыптастыруда жасанды интеллектке негізделген оқытудың қажеттілігін анықтау үшін сандық және сапалық деректерді жинау, өңдеу, сұрыптау, саралау зерттеуді тереңінен талдауға мүмкіндік береді.

Қазіргі білім беру даму кезеңі оқу процесіне жасанды интеллект технологияларының белсенді енгізілуімен сипатталады. Зерттеушілер ЖИ тек ақпарат іздеу құралы емес, білім берудегі өзара әрекеттесудің толыққанды қатысушысына айналып, оқытудың дәстүрлі тәсілдерін түрлендіруге қабілетті екенін атап өтеді [1]. Бүгінгі оқушылар оқу тапсырмаларын орындау үшін нейрожелілер мен басқа да ЖИ-сервистерді белсенді пайдаланады, алайда көп жағдайда бұл қолдану стихиялық сипатта және дайын шешімдерді алуға бағытталған болып келеді [2]. Осы зерттеудің өзектілігі ЖИ технологияларының оқушылардың когнитивтік қабілеттерін дамытудағы кең мүмкіндіктері мен оларды педагогикалық практикада қолданудың ғылыми негізделген әдістемелерінің жоқтығы арасындағы қарама-қайшылық мәселесін шешумен анықталады. Бұл мәселе оқушылардың алгоритмдік ойлауын қалыптастыру контекстінде ерекше маңызға ие, өйткені алгоритмдік ойлау программалауды сәтті меңгерудің ғана емес, сонымен қатар кез келген логикалық күрделі мәселелерді шешуге қажетті әмбебап оқу іс-әрекеттерін дамытудың негізі болып табылады [3].

Алгоритмдік ойлау қазіргі психологиялық-педагогикалық әдебиетте әрекеттер тізбегін құру, есеп шарттарын талдау, маңызды операцияларды анықтау және өзінің ойлау процестерін рефлексиялау қабілеті ретінде қарастырылады [4]. Оны оқушыларда қалыптастыру әдетте информатика мен математика пәндері арқылы жүзеге асады, бірақ ЖИ қолдану бұл процесті тиімдірек етеді, өйткені ЖИ құралдары метатанымдық дағдыларды (рефлексия, жоспарлау, өзін-өзі бақылау) дамытып, алгоритмдік құрылымдарды терең түсінуге және проблеманы шешу қабілетіне ықпал етеді [5]. Осыған орай мақаланың мақсаты – оқу іс-әрекетінде жасанды интеллект технологияларын пайдалану кезінде оқушыларда алгоритмдік ойлау дағдыларын қалыптастыру процесін сандық және сапалық тұрғыдан талдауға бағытталған кешенді зерттеу нәтижелерін көрсету болып табылады.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі міндеттерді шешу қажет болды: 1) PRISMA әдісін қолдана отырып, тақырып бойынша заманауи зерттеулерге библиометриялық талдау жүргізу мен аралас зерттеу әдіснамасын сипаттау; 2) Лайкерт шкаласы бойынша сауалнама деректерін қоса алғанда, эксперименттік деректердің сандық талдау нәтижелерін ұсыну; 3) сұхбаттардың тақырыптық талдауы негізінде оқушылардың ойлау стратегияларындағы сапалық өзгерістерді сипаттау; 4) алынған сандық және сапалық зерттеу қорытындыларын жинақтау және одан әрі зерттеулердің перспективаларын анықтау. Жұмыстың теориялық негізін педагогика және ойлау психологиясы саласындағы шетелдік зерттеулер [6-7], есептеу ойлауын қалыптастыру бойынша заманауи жұмыстар [8], сондай-ақ білім беруде жасанды интеллектті қолдануға арналған жарияланымдар [9] құрады. Әдіснамалық негіз педагогикалық эксперименттегі сауалнаманың сандық әдістері мен сұхбаттасудың сапалық әдістерінің үйлесімін көздейтін аралас зерттеу дизайны болып табылды [10].

Зерттеу әдіснамасы

Теориялық әдістер. Зерттеу өрісінің ағымдағы жай-күйін анықтау үшін PRISMA әдісі бойынша әдебиетке жүйелі шолу жүргізілді [11]. Іздеу Scopus және Web of Science дерекқорларында келесі кілт сөздер: algorithmic thinking, computational thinking, artificial intelligence, AI, secondary education, high school students бойынша жүзеге асырылды. Іріктелген жарияланымдарды талдау (n=47) VOSviewer программалық құралын қолдана отырып, терминдерді кластерлеу картасын құруды қамтыды.

Зерттеуге қатысушылар және дизайн. Зерттеуге Алматы қаласының жалпы білім беретін мектебінің 10-11 сыныптарының 60 оқушысы қатысты, олар бақылау және эксперименттік топтарға үлгерім көрсеткіші және алгоритмдік ойлаудың бастапқы деңгейін ескеру арқылы бөлінді. Эксперименттік топ бір оқу жартыжылдығы ішінде информатика бойынша оқу тапсырмаларын ЖИ-құралдарын (кодтарды генерациялауға және алгоритмдерді түсіндіруге арналған нейрожелілер) қолдана отырып орындады. Бақылау тобы ЖИ-ді қолданбай, дәстүрлі әдістеме бойынша оқыды.

Сандық әдістер. Алгоритмдік ойлау деңгейін диагностикалау үшін экспериментке дейін және одан кейін қолданылатын Computational Thinking Test (CTt) тестінің бейімделген нұсқасы пайдаланылды [12]. ЖИ-ді қолдануға деген субъективті қатынасты және оқушылардың өз дағдыларын бағалау үшін Лайкерттің 5 балдық шкаласы бойынша өлшенетін тұжырымдары бар авторлық сауалнама қолданылды. Статистикалық деректерді өңдеу үлестірімнің қалыптылығын тексеруді, сипаттамалық статистиканы есептеуді (мода, медиана) және тәуелсіз іріктемелер үшін Стьюденттің t-критерийін қолдануды қамтыды.

Сапалық әдістер. ЖИ-мен өзара әрекеттесудің терең процестері мен стратегияларын түсіну үшін эксперимент аяқталғаннан кейін эксперименттік топтың 15 оқушысымен жартылай құрылымдалған сұхбаттар жүргізілді. Сұрақтар олардың тәжірибесіне, промттарды дұрыс тұжырымдау стратегияларына, ЖИ жауаптарын тексеру тәсілдеріне және өзгерістердің өзіндік рефлексиясына қатысты болды. Сұхбаттардың транскрипттері тақырыптық талдау әдісімен өңделді [13]. Ол кодтауды тақырыптар мен кіші тақырыптарды іздеу және анықтауды қамтыды. Қосымша іс-әрекет өнімдеріне (нейрожелілерге сұраулар тарихына) талдау жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері

1. Қазіргі зерттеулерге библиометриялық талдау. Зерттеудің бірінші кезеңінде біз PRISMA әдісі бойынша әдебиетке жүйелі шолу жүргіздік, оның нәтижелері 1-кестеде ұсынылған.

Кесте 1. PRISMA әдісі бойынша дереккөздерді іріктеу кезеңдері

Кезең	*Дереккөздер саны*	*Сипаттамасы*
Идентификация	*n = 345*	*Дерекқорлардан табылды (Scopus, WoS)*
Скрининг	*n = 210*	*Дубликаттар және атауы бойынша өзекті еместер алынып тасталды*
Жарамдылығын бағалау	*n = 98*	*Аннотацияларды талдағаннан кейін алынып тасталды (тақырыпқа немесе жас тобына сәйкес келмейді)*
Талдауға қосу	*n = 47*	*Толық мәтінді талдағаннан кейін алынып тасталды (эмпирикалық деректердің болмауы)*

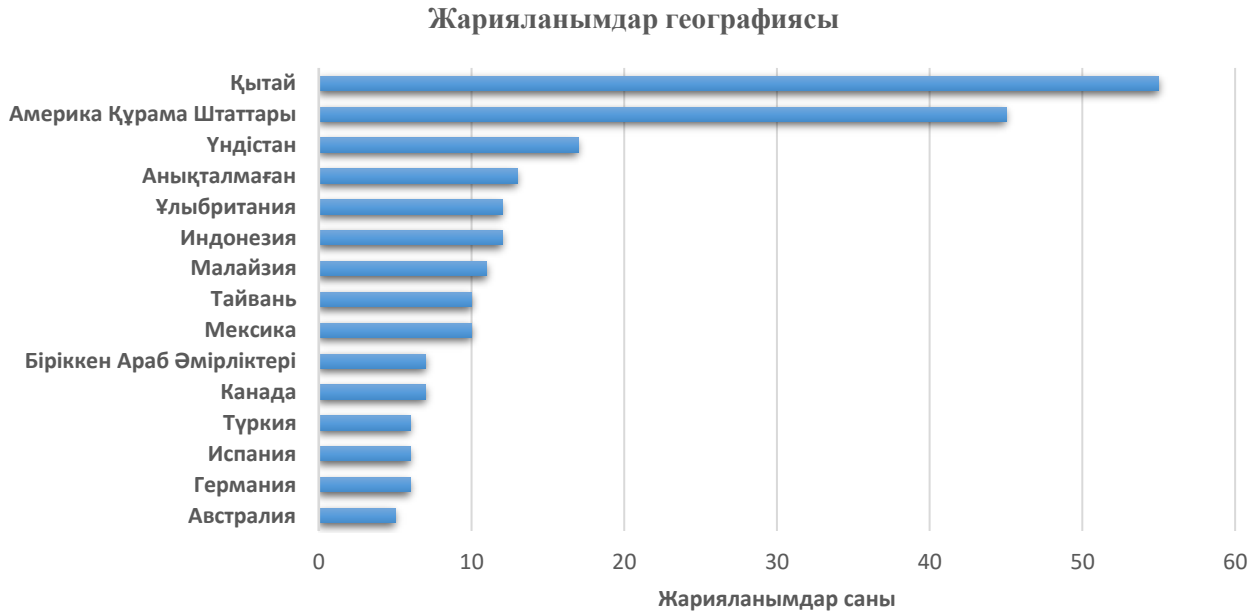
Іріктелген 47 жарияланымды талдау негізгі тенденцияларды анықтауға мүмкіндік берді.

1-суретте Scopus және Web of Science дерекқорларындағы 2006-2026 жылдар аралығы бойынша жарияланым белсенділігінің динамикасы көрсетілген. Динамика көрсеткендей, 2006 жылдан бастап тақырып бойынша жарияланымдар тұрақты түрде пайда бола бастаған. Алайда, нақты өсуі 2020 жылдан кейін байқалады, ал 2024-2025 жылдары экспоненциалды өсу

орын алған (2024 жылы 75 құжат, 2025 жылы 140 құжат). Бұл жаһандық деңгейде генеративті ЖИ құралдарының қолжетімді болуымен және олардың білім берудегі әлеуетіне қызығушылықтың күрт артуымен түсіндіріледі.

Сурет 1. Зерттеу тақырыбы бойынша жарияланымдар динамикасы

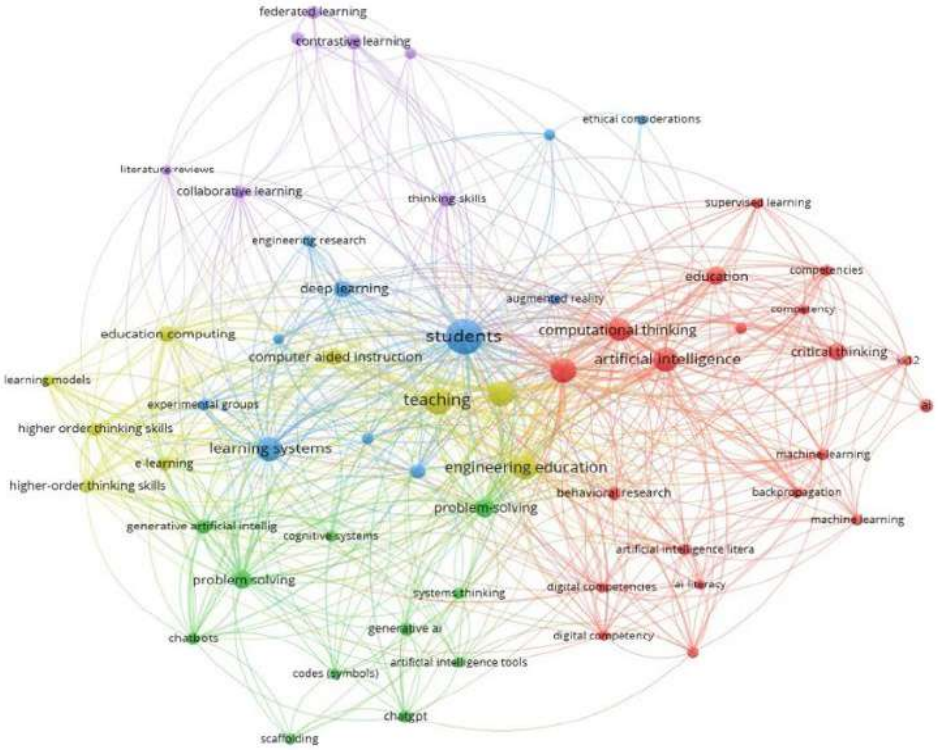
Географиялық талдау (2-сурет) зерттеуге ең көп үлес қосқан елдерді анықтауға мүмкіндік берді. Төмендегі кестеде және сәйкес диаграммада елдер бойынша жарияланымдардың таралуы көрсетілген.



Сурет 2. Жарияланымдардың географиялық таралуы

Географиялық талдау нәтижелеріндегі зерттеу тақырыбы бойынша абсолютті көшбасшы Қытай (56 құжат) екенін көруге болады, одан кейін АҚШ (48 құжат) екінші орында. Үндістан (15 құжат) үшінші орынды иеленеді. Еуропалық елдер ішінде Ұлыбритания (10 құжат) мен Германия (4 құжат) ерекше көзге түседі. Сонымен қатар, Индонезия (11 құжат), Малайзия (9 құжат) және Мексика (8 құжат) сияқты дамушы елдердің де осы салаға белсенді қызығушылық танытып отырғанын атап өткен жөн. Бұл алгоритмдік ойлау мен ЖИ-ді білім беруде қолдану мәселесі жаһандық сипатқа ие екендігін және әртүрлі аймақтарда қарқынды зерттеліп жатқанын көрсетеді. Ғылыми бағыттардың негізгі басымдықтарын визуализациялау үшін

VOSviewer программасында терминдерді кластерлеу картасы құрылды (3-сурет). Талдау зерттеулердің пәнаралық сипатын растайтын үш негізгі кластерді анықтады.



Сурет 3. VOSviewer программасындағы терминдерді кластерлеу картасы

2. Сандық талдау нәтижелері

2.1 Алгоритмдік ойлау деңгейінің динамикасы

Педагогикалық эксперимент нәтижелері эксперименттік топта CTt тесті бойынша орташа баллдың статистикалық маңызды өскенін көрсетті (52.3-тен 68.7-ге дейін, $p < 0.01$, t-критерий). Бақылау тобында өзгерістер шамалы болды (53.1-ден 55.4-ке дейін, $p > 0.05$). Бұл алгоритмдік ойлауды дамыту құралы ретінде ЖИ-ді қолданудың тиімділігін көрсетеді.

2.2 Лайкерт шкаласы бойынша сауалнама нәтижелері

Оқушылардың ЖИ-ді қабылдауы мен қолдану стратегияларындағы өзгерістерді бағалау үшін эксперименттік топта сауалнама жүргізілді. 2-кестеде негізгі сұрақтар бойынша сипаттамалық статистика нәтижелері (мода және медиана) ұсынылған.

Кесте 2. Эксперименттік топ оқушыларының Лайкерт шкаласы бойынша сауалнама нәтижелері

Тұжырым	*Экспериментке дейін*		*Эксперименттен кейін*	
	Мода	*Медиана*	*Мода*	*Медиана*
Мен алгоритмдердің қалай жұмыс істейтінін түсінемін	*3*	*3.2*	*5*	*4.5*
ЖИ маған күрделі есептерді бөліктерге бөлуге көмектеседі	*2*	*2.4*	*5*	*4.3*
Мен ЖИ-ден алынған жауаптарға сыни көзқараспен қараймын	*2*	*2.1*	*4*	*4.1*
Мен ЖИ ұсынған шешімнің логикасын түсіндіре аламын	*2*	*2.3*	*4*	*4.0*
ЖИ-ді қолдану оқу процесін қызықты етеді	*4*	*4.1*	*5*	*4.7*

Кестеден көрініп тұрғандай, алгоритмдерді түсінуге және рефлексияға байланысты барлық тұжырымдар бойынша мода мен медиана жоғары мәндерге қарай ығысқан. Бұл алгоритмдік ойлау компоненттерінің қалыптасуындағы оң динамиканы көрсетті. Ең үлкен ығысу «ЖИ маған күрделі есептерді бөліктерге бөлуге көмектеседі» деген тұжырым бойынша байқалады, бұл декомпозиция дағдысының дамуын растайды.

3. Сапалық талдау нәтижелері (сұхбаттардың тақырыптық талдауы)

Сандық өзгерістердің негізінде жатқан механизмдерді тереңірек түсіну мақсатында 15 сұхбаттың транскрипттеріне тақырыптық талдау жүргізілді. 3-кестеде анықталған тақырыптар мен кіші тақырыптардың құрылымы иллюстративті үзінділермен ұсынылған.

Кесте 3. Сұхбаттардың тақырыптық талдауының нәтижелері

Тақырып	*Кіші тақырып*	*Үзінді*
ЖИ-мен өзара әрекеттесу стратегияларының эволюциясы	*Қарапайым сұраудан диалогқа*	*«Басында мен жай ғана «код жаз» деп жазатынмын, кейін ол [ЖИ] мағынасыз нәрсе шығарғанда, қандай айнымалыларды, қандай кітапхананы қолдану керектігін нақтылау керектігін түсіне бастадым» (Қатысушы 5).*
	Нәтижелерді тексеру	*«Мен қазір оның кодын әрқашан тексеремін. Өз компьютерімде іске қосып, жұмыс істейтінін көремін. Егер жоқ болса, неге қателескенін түсінуге тырысамын» (Қатысушы 9).*
Метатанымдық дағдылардың дамуы	*Өз түсінбеушілігін сезіну*	*«Ең пайдалысы – ол [ЖИ] түсініксіз сәттерді түсіндіргенде. Сен кенеттен тақырыпты дәл не түсінбегеніңді ұғынасың» (Қатысушы 3).*
	Шешімді жоспарлау	*«Мен алдымен қағазда программаның құрылымын жасаймын, содан кейін ғана ЖИ-ден күрделі бөліктерді жүзеге асыруға көмектесуді сұраймын» (Қатысушы 12).*
Эмоционалды қабылдау	*ЖИ көмекші ретінде*	*«Қателесуден қорқу азайды. Егер бірдеңе шықпаса, мен ЖИ-ден кеңес сұрап, қай бағытта ойлау керектігін түсіне аламын» (Қатысушы 7).*
	ЖИ-ден көңілі қалу	*«Кейде ол мені ашуландырады. Оған нақты тапсырма бересің, ал ол бір мағынасыз нәрсе істеп береді. Сонда өзің отырып түсінуге тура келеді» (Қатысушы 14).*

Сапалық талдау тестілеу әдістерімен анықталмайтын маңызды процестерді айқындалды. Оқушылар есептерді жақсы шешіп қана қоймай, оларды шешуге деген көзқарастарын өзгертті. Олар жоспарлаудан бастады, ЖИ-мен диалог жүргізуді үйренді, әрі оның шешімдерін тексеріп, сынай бастады. Сұхбат деректері сауалнама нәтижелерін растап, оларды түсіндіріп, сандық және сапалық деректердің өзара үйлесімділігін көрсетеді.

Дискуссия

Алынған нәтижелер алгоритмдік ойлауды дамытуда білім беру процесіне ЖИ-дің қажеттілігін көрсетеді. Эксперименттік топта байқалған статистикалық тұрғыдан маңызды өсім ЖИ-дің тек ақпараттық құрал ретінде ғана емес, сонымен қатар когнитивті дамудың катализаторы ретінде де әрекет ете алатынын көрсетеді. Бақылау тобындағы елеулі өзгерістердің болмауы ЖИ-ді қолданудың өздігінен жүрмей, арнайы құрылымдалған түрде болуы керек екенін көрсетеді. Сандық және сапалық деректердің сәйкес келуі ерекше қызықты. Студенттердің сұхбаттарында ЖИ-мен диалогқа қатысу, оның жауаптарын тексеру және өздерінің түсінбеушіліктерін анықтау сияқты стратегияларды әзірлегенін хабарлауы

сауалнамада көрсетілген ыдырау және сыни ойлау дағдыларының жақсаруымен толығымен сәйкес келеді. Бұл ЖИ-мен педагогикалық тұрғыдан тиісті өзара әрекеттесу студенттердің ойлау стратегияларын сапалы түрде өзгертетінін, оларды саналы және құрылымдық ететінін көрсетеді.

Қорытынды

Жүргізілген аралас зерттеу ЖИ-ді қолдану кезінде оқушыларда алгоритмдік ойлауды қалыптастырудың тұтас бейнесін алуға мүмкіндік берді және алға қойылған гипотезаны растады.

1. *PRISMA әдісі бойынша библиометриялық талдау* тақырыптың жоғары өзектілігін растады және 2020 жылдан бастап оған қызығушылықтың экспоненциалды өсуін анықтады. VOSviewer программасындағы терминдерді кластерлеу картасы мәселенің педагогика, технологиялар және когнитивтік психологияның тоғысында жатқанын көрсетті, бұл аралас тәсілді қолдану қажеттілігін негіздейді.

2. *Сандық талдау* бақылау тобымен салыстырғанда эксперименттік топта алгоритмдік ойлау деңгейінің статистикалық маңызды жоғарылағанын тіркеді. Лайкерт шкаласы бойынша сауалнама деректері (мода мен медиананың ығысуы) бұл өсуді нақтылап, оқушыларда декомпозиция, сыни ойлау және рефлексия дағдыларының дамығанын көрсетті.

3. *Сұхбаттардың сапалық талдауы* осы өзгерістердің ішкі механизмдерін ашты. Тақырыптық талдау ЖИ-мен өзара әрекеттесу стратегияларының эволюциясын (қарапайым сұраулардан диалогқа және тексеруге дейін), метатанымдық дағдылардың дамуын (олқылықтарды сезіну, жоспарлау) және эмоционалды фактордың маңызды рөлін анықтады. Оқушылар ЖИ-ді дайын жауаптар көзі ретінде емес, «когнитивтік серіктес» ретінде қабылдай бастайды.

4. *Әдістердің интеграциясы* (тесттер, сауалнамалар және сұхбаттар деректерінің конвергенциясы) ойлау деңгейінің жоғарылағанын ғана емес, сонымен қатар бұл өзгерістердің *қалай* және *неге* болғанын түсіндіруге мүмкіндік берді, бұл аралас дизайнның басты артықшылығы болып табылады.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы анықталған стратегиялар (диалог, тексеру, жоспарлау) информатика сабақтарында ЖИ-мен жұмысты ұйымдастыру бойынша мұғалімдерге арналған әдістемелік ұсынымдардың негізі бола алатынында. Яғни оқушыларда алгоритмдік ойлау дағдыларын қалыптастыруда жасанды интеллектке негізделген оқытудың қажеттілігінің айқындалуында. Одан әрі зерттеулердің перспективалары оқушылардың жеке когнитивтік стильдерін ескеретін сараланған тапсырмаларды әзірлеумен және ЖИ-ді қолданудың ұзақ мерзімді әсерлерін зерттеумен байланысты.

Пайдаланылған дереккөздер тізімі

[1] Crompton, H., & Burke, D. (2023). Artificial intelligence in higher education: The state of the field. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 20(1), 1-22. https://doi.org/10.1186/s41239-023- 00392-8

[2] Treve, M. (2024). Integrating artificial intelligence in education: Impacts on student learning and innovation. International Journal of Vocational Education and Training Research, 10(2), 56-63. https://doi.org/10.11648/j.ijvetr.20241002.14

[3] Chiu, T. K. F., Xia, Q., Zhou, X., Chai, C. S., & Cheng, M. (2024). Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education. Computers and Education: Artificial Intelligence, 4, 100-118. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118

[4] Long, D., & Magerko, B. (2020). What is AI literacy? Competencies and design considerations. In Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems (pp. 1-16). ACM. https://doi.org/10.1145/3313831.3376727

[5] Zhai, Y., Nezakatgoo, B. Evaluating AI-Powered Applications for Enhancing Undergraduate Students' Metacognitive Strategies, Self-Determined Motivation, and Social Learning in English Language Education. Sci Rep 15, 35199 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-19118-z

[6] Vygotsky, L. S. (1978). Mind in society: The development of higher psychological processes. Harvard University Press.

[7] Piaget, J. (1972). The psychology of intelligence. Littlefield Adams.

[8] Wing, J. M. (2006). Computational thinking. Communications of the ACM, 49(3), 33-35. https://doi.org/10.1145/1118178.1118215

[9] Luckin, R.: Towards artificial intelligence-based assessment systems. Nat. Hum. Behav. (2017). https://doi.org/10.1038/s41562-016-0028

[10] Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). Designing and conducting mixed methods research (3rd ed.). SAGE Publications.

[11] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, The PRISMA Group (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. PLoS Med 6(7): e1000097. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097

[12] Roman-Gonzalez, M., Moreno-Leon, J., & Robles, G. (2019). Combining assessment tools for a comprehensive evaluation of computational thinking interventions. In S. C. Kong & H. Abelson (Eds.), Computational thinking education (pp. 79-98). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6528-7_6

[13] Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. Qualitative Research in Psychology, 3(2), 77-101. https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa

References

[1] Crompton, H., & Burke, D. (2023). Artificial intelligence in higher education: The state of the field. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 20(1), 1-22. https://doi.org/10.1186/s41239-023- 00392-8

[2] Treve, M. (2024). Integrating artificial intelligence in education: Impacts on student learning and innovation. International Journal of Vocational Education and Training Research, 10(2), 56-63. https://doi.org/10.11648/j.ijvetr.20241002.14

[3] Chiu, T. K. F., Xia, Q., Zhou, X., Chai, C. S., & Cheng, M. (2024). Systematic literature review on opportunities, challenges, and future research recommendations of artificial intelligence in education. Computers and Education: Artificial Intelligence, 4, 100-118. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100118

[4] Long, D., & Magerko, B. (2020). What is AI literacy? Competencies and design considerations. In Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems (pp. 1-16). ACM. https://doi.org/10.1145/3313831.3376727

[5] Zhai, Y., Nezakatgoo, B. Evaluating AI-Powered Applications for Enhancing Undergraduate Students' Metacognitive Strategies, Self-Determined Motivation, and Social Learning in English Language Education. Sci Rep 15, 35199 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-19118-z

[6] Vygotsky, L. S. (1978). Mind in society: The development of higher psychological processes. Harvard University Press.

[7] Piaget, J. (1972). The psychology of intelligence. Littlefield Adams.

[8] Wing, J. M. (2006). Computational thinking. Communications of the ACM, 49(3), 33-35. https://doi.org/10.1145/1118178.1118215

[9] Luckin, R.: Towards artificial intelligence-based assessment systems. Nat. Hum. Behav. (2017). https://doi.org/10.1038/s41562-016-0028

[10] Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). Designing and conducting mixed methods research (3rd ed.). SAGE Publications.

[11] Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, The PRISMA Group (2009) Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. PLoS Med 6(7): e1000097. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097

[12] Roman-Gonzalez, M., Moreno-Leon, J., & Robles, G. (2019). Combining assessment tools for a comprehensive evaluation of computational thinking interventions. In S. C. Kong & H. Abelson (Eds.), Computational thinking education (pp. 79-98). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6528-7_6

[13] Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. Qualitative Research in Psychology, 3(2), 77-101. https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa

IRSTI 14.35.07

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.025

G.B. Kamalova[1*], Sh.P. Turashova[1], A.M. Alimbay[1], D.B. Nauryzbayev[1], A.A. Amangeldin[1]

[1] Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan
[*]*e-mail: g.kamalova@abaiuniversity.edu.kz*

POWER BI AS A DATA VISUALIZATION AND ANALYSIS TOOL IN THE DEPARTMENT'S EDUCATIONAL MANAGEMENT

Abstract

The article is devoted to the problem of increasing the efficiency of management of the university department through the introduction of business intelligence (BI) tools. Traditional methods of data analysis are time-consuming and do not allow for prompt management decisions in a modern educational environment characterized by a large amount of data. The purpose of this study is to substantiate the feasibility of using MS Power BI, one of the most popular business intelligence tools, to optimize the management of the university's department, develop interactive dashboards for monitoring and visualizing key performance indicators of the department (faculty publication activity, student academic performance, etc.) in real time and assess their impact on improving management efficiency. activities of the department. The methodological basis of the research is a systematic approach, which uses a set of theoretical and experimental methods. To assess the impact of using Power BI on improving the effectiveness of department management, an experimental method of single-group preliminary and subsequent questionnaires was chosen. The sample consisted of 47 teachers of the Department of Informatics and Informatization of Education of the Kazakh National Pedagogical University named after Abai, 40% of whom have permanent general departmental duties. The survey was conducted in an online format using the GoogleForms service. The developed questionnaire included 21 questions on a 5-point Likert scale. The reliability of the results was confirmed using the Cronbach's alpha coefficient. The results of the study. The proposed innovative method of department management based on Power BI has proven to be highly effective. It allows you to automate the generation of reports, quickly identify problem areas and trends, which, in turn, contributes to making informed management decisions. The results of the research have practical significance and will serve as a basis for implementation in the practice of department management in other educational institutions, contributing to the development of the educational management system.

Keywords: business intelligence system, dashboard, Microsoft Power BI, data visualization, management reporting, digitalization.

Г.Б. Камалова[1], Ш.П. Тұрашова[1], А.М. Әлімбай [1], Д.Б. Наурызбаев[1], А.А. Амангелдин[1]
[1]Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

POWER BI КАФЕДРАНЫҢ БІЛІМ БЕРУ ҚЫЗМЕТІН БАСҚАРУДАҒЫ ДЕРЕКТЕРДІ ВИЗУАЛИЗАЦИЯЛАУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ

Аңдатпа

Мақала жоғары оқу орны кафедрасының қызметін басқару тиімділігін бизнес-аналитика (BI) құралдарын енгізу арқылы арттыру мәселесіне арналған. Дәстүрлі деректерді талдау әдістері еңбек сыйымдылығы жоғары және қазіргі білім беру ортасында, үлкен көлемдегі деректермен сипатталатын жағдайда, басқарушылық шешімдерді жедел қабылдауға мүмкіндік бермейді. Зерттеудің мақсаты жоғары оқу орны кафедрасының қызметін басқаруды оңтайландыру үшін бизнес-аналитиканың кең таралған құралдарының бірі болып табылатын MS Power BI қолданудың орындылығын негіздеу, кафедра қызметінің негізгі көрсеткіштерін (профессор-оқытушылар құрамының жарияланымдық белсенділігі, студенттердің үлгерімі және т.б.) нақты уақыт режимінде мониторингтеу мен визуализациялауға арналған интерактивті дашбордтарды әзірлеу және олардың басқару тиімділігін арттыруға ықпалын бағалау болып табылады. Зерттеудің әдіснамалық негізін жүйелік тәсіл құрайды, оның аясында теориялық және эксперименттік әдістер кешені қолданылды. Power BI қолданудың

кафедра қызметін басқару тиімділігіне әсерін бағалау үшін бір топқа жүргізілген алдын ала және кейінгі сауалнамаға негізделген эксперименттік әдіс таңдалды. Зерттеу іріктемесін Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті Информатика және білім беруді информатизациялау кафедрасының 47 оқытушысы құрады, олардың 40%-ы кафедра деңгейінде тұрақты міндеттер атқарады. Сауалнама Google Forms сервисін пайдалану арқылы онлайн форматта жүргізілді. Әзірленген сауалнама 5 балдық Лайкерт шкаласы бойынша 21 сұрақтан тұрды. Нәтижелердің сенімділігі Кронбах альфа коэффициенті арқылы расталды. Зерттеу нәтижелері. Power BI негізінде ұсынылған кафедраны басқарудың инновациялық тәсілі өзінің жоғары тиімділігін көрсетті. Ол есептерді қалыптастыруды автоматтандыруға, проблемалық аймақтар мен үрдістерді жедел анықтауға мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде негізделген басқарушылық шешімдерді қабылдауға ықпал етеді. Зерттеу нәтижелері практикалық маңызға ие және жоғары оқу орындары кафедраларын басқару тәжірибесіне енгізу үшін негіз бола алады, білім беруді басқару жүйесінің дамуына үлес қосады.

Түйін сөздер: бизнес-аналитика жүйесі, дашборд, Microsoft Power BI, деректерді визуализациялау, басқарушылық есептілік, цифрландыру.

Г.Б. Камалова[1], Ш.П. Турашова[1], А.М. Әлімбай [1], Д.Б. Наурызбаев[1], А.А. Амангелдин[1]
[1]Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан

POWER BI КАК ИНСТРУМЕНТ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ В УПРАВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ КАФЕДРЫ

Аннотация

Статья посвящена проблеме повышения эффективности управления деятельностью кафедры вуза через внедрение инструментов бизнес-аналитики (BI). Традиционные методы анализа данных трудоемки и не позволяют оперативно принимать управленческие решения в условиях современной образовательной среды, характеризующейся большим объемом данных. Целью данного исследования является обоснование целесообразности использования MS Power BI – одного из наиболее популярных инструментов бизнес-аналитики, для оптимизации управления деятельностью кафедры вуза, разработка интерактивных дашбордов для мониторинга и визуализации ключевых показателей деятельности кафедры (публикационной активности ППС, успеваемости студентов и др.) в режиме реального времени и оценка их влияния на повышение эффективности управления деятельностью кафедры. Методологической основой исследования является системный подход, в рамках которого использован комплекс теоретических и экспериментальных методов. Для оценки влияния использования Power BI на повышение эффективности управления деятельностью кафедры выбран экспериментальный метод одногруппового предварительного и последующего анкетирования. Выборка составила 47 преподавателей кафедры информатики и информатизации образования Казахского национального педагогического университета имени Абая, 40% из которых имеют постоянные общекафедральные обязанности. Опрос проводился в онлайн-формате с использованием сервиса GoogleForms. Разработанная анкета включала в себя 21 вопрос по 5-балльной шкале Лайкерта. Надежность результатов подтверждена с помощью коэффициента альфа Кронбаха. Результаты исследования. Предложенный инновационный метод управления кафедрой на основе Power BI доказал свою высокую эффективность. Он позволяет автоматизировать формирование отчетов, оперативно обнаруживать проблемные зоны и тенденции, что, в свою очередь, способствует принятию обоснованных управленческих решений. Результаты исследования имеют практическую значимость и послужат основой для внедрения в практику управления кафедрами и в других учебных заведениях, внося вклад в развитие системы управления образованием.

Ключевые слова: система бизнес-аналитики, дашборд, Microsoft Power BI, визуализация данных, управленческая отчетность, цифровизация.

Introduction

In today's rapidly changing world, educational institutions are faced with the need for operational analysis of large amounts of data to make informed management decisions. Departments, as structural divisions of universities, are no exception. They use diverse information about educational, scientific and educational activities. The analysis of these data plays a key role in making the right decisions to optimize the educational process, improve the quality of education and the effectiveness of the department's resource management.

Current data on the department's activities is also important when passing accreditation, which is one of the key tools for improving the quality of educational services in the higher education system of Kazakhstan. It is conducted in accordance with established standards by independent national and international accreditation agencies. The standards include measurable indicators (KPIs) for an objective assessment of the quality of educational services [1].

Traditional methods of data processing and analysis (spreadsheets) often do not ensure proper objectivity and efficiency of monitoring. At the same time, the experience of the corporate sector demonstrates the effectiveness of business intelligence systems (BI system), which not only consolidate data from various sources, but also provide opportunities for their visualization in a convenient format, which helps to make informed management decisions, as well as provide opportunities for in-depth analysis in order to identify trends, patterns, and problem areas [2-4].

Among the available BI platforms, Microsoft Power BI stands out for its extensive integration capabilities with Excel, SharePoint, Azure and other Microsoft services, as well as with interactive dashboard creation tools [5-7]. Due to its accessibility and ease of operation, the application can be used not only by professional data analysts, but also in management activities in educational institutions.

Various architectural approaches to implementing BI platforms in education are actively discussed in the scientific literature: from service-oriented (SoBI) to integrate disparate systems to the concept of Self-Service Business Intelligence (SSBI), which allows end users to work with data independently. Research confirms the effectiveness of Power BI in predicting academic performance [8-10], analyzing the causes of student dropout [11], monitoring attendance [12], and automating the work of admissions committees [13].

MS Power BI software has an extensive set of tools for data analysis and visualization, allowing you to create visual and informative reports and dashboards for operational and informed management decision-making in educational institutions. Despite the huge opportunities and growing popularity in educational management, the issues of its application for comprehensive monitoring and analysis of the activities of university departments remain insufficiently studied.

The purpose of this study is to substantiate the feasibility of using MS Power BI to optimize the management of the Department of higher education, to develop interactive dashboards for monitoring and visualizing key performance indicators of the department in real time and to assess their impact on improving the effectiveness of department management.

Research methodology

The methodological basis of the research is a systematic approach, which uses a set of theoretical and empirical methods: studying and analyzing scientific literature on the research topic; collecting data on the department's activities, comparative analysis of modern business intelligence tools; exploring the functionality and experience of using MS Power BI in other organizations; developing a data model and creating interactive dashboards in Power BI; conducting testing of developed dashboards.

To assess their impact on improving the effectiveness of the department's management, a quantitative approach was chosen using the experimental method of single-group preliminary and subsequent questionnaires. The study sample consisted of 47 teachers of the Department of Informatics and Informatization of Education of the Kazakh National Pedagogical University named after Abai, 40% of whom have general departmental duties. The survey was conducted to identify their data visualization and analysis needs, as well as to test the effectiveness of using Power BI in managing the department's activities. The survey to form the empirical basis of the study was conducted in an online format using the GoogleForms service. The developed questionnaire included 21 questions.

An analysis of the survey results using the Cronbach's alpha coefficient showed a high degree of reliability and reliability of the results both before and after the implementation of dashboards

developed on the basis of MS Power BI. The values of this coefficient were 0.962 and 0.98, respectively, which confirms the excellent internal consistency of the data.

Results of the study

To monitor the key performance indicators of the university department in the Power BI environment, a semantic model based on a subject-oriented approach has been developed. The model is a structured system of interconnected tables that provide a holistic and consistent presentation of information about the activities of the university department, and integrates data from heterogeneous sources [14]. The relationships between the tables are implemented according to the Star Schema principle, where the central fact tables are combined with measurements through key fields. This approach is a widely accepted standard in data warehouse design and is recommended for Power BI, as it provides high performance of DAX (Data Analysis Expressions) calculation measures, scalability and fast integration of data from diverse sources: LMS, Excel reports, sensors installed in smart classrooms, MySQL databases [14]. This semantic model ensures the logical integrity of the data and serves as the foundation for building interactive dashboards.

The Power BI Desktop application is sufficient to create informative reports with data visualization and subsequent analysis and forecasting. This tool combines all the necessary steps: from data acquisition and processing to modeling and visualization. The created dashboard can be published in the Power BI Service to provide multi-user web access and rights sharing. As part of this research, a system has been developed that implements two levels of analytics through interactive dashboards:

1. A management dashboard for the department's management, which provides comprehensive monitoring of KPIs in the main areas of the department's activities: academic performance dynamics, research and development (publication activity, Hirsch index through Tree Maps), contingent forecasting. The drill-down functions allow you to move from aggregated department indicators to detailing individual achievements.

2. The pedagogical dashboard for teachers is focused on the personalization of the educational process and operational intervention: the use of scatter plots to analyze the correlation between attendance and academic results, as well as built-in Power BI machine learning tools to predict final grades based on current dynamics to identify students at risk and personalize learning.

With the help of Power BI, it can be useful to predict exam results based on the results of current student academic performance and attendance, the level of activity in mastering the topic on learning platforms, and the digital footprint in the LMS in order to provide timely support to the underachievers, provide personalized training, and adjust teaching methods. This is especially true for groups with a large number of students. At the same time, taking into account various internal and external factors that affect student academic performance gives high accuracy in predicting students' final academic performance [15]. Thus, Microsoft Power BI is not just a visualization tool, but also a methodological base for continuous improvement of the quality of education, confirming its status as an innovative tool in the field of Learning Analytics. In the field of academic management, Power BI provides scientifically based forecasting of the department's performance indicators - the number of students, the need for human, logistical and other resources. This creates a solid foundation for effective strategic planning. In addition, the use of the Power BI platform in the management of the department's educational activities contributes to improving the effectiveness of management decisions, ensures the efficiency of data analysis and increases the transparency of educational processes. The effectiveness of using the Power BI platform in managing the department's activities has been experimentally proven by comparative analysis of key performance indicators (KPIs) before and after its implementation. The experimental study was conducted during two academic years 2023-2024 and 2024-2025 on the basis of the Department of Informatics and Informatization of Education of the Kazakh National Pedagogical University named after Abai with the participation of 47 teachers of the department. Two time intervals are allocated:

– The control period before the introduction of Power BI is one academic year of the department's work with traditional reporting methods (using Excel tools, generating paper reports). During this

period, the analysis of the traditional management system of the department was carried out, its key drawbacks were identified – the high complexity of generating reports using traditional methods, fragmentation and fragmentation of data, as well as low visual visibility of the results of activities. The initial indicators are fixed.

In parallel, during this period, active work was carried out on the development and implementation of interactive reports and dashboards in the Power BI environment. The platform was integrated with the department's key data sources (LMS, Excel files on Google Disk and a web server) in order to clearly and visually visualize the selected key performance indicators (KPIs). The developed Power BI panel, structured according to the main areas of activity, has been implemented in management practice. The target aspects of the department's activities that require improvement have been identified, and scenarios for management decisions based on panel data have been worked out. The head and staff of the department began to use the panel as a tool for planning, analyzing, monitoring and forecasting management indicators;

– and the pilot period after the introduction of Power BI, also lasting one academic year, began after the introduction of the Power BI analytical platform. During this period, all key management decisions of the department, in particular those related to the analysis of academic performance and attendance, were made solely on the basis of data and visualizations presented in Power BI dashboards. A comprehensive assessment of the dynamics of key performance indicators of the department and an analysis of the level of satisfaction of the head and staff of the department with the results and process of the experiment was carried out. Both quantitative and qualitative assessment criteria were used for a comprehensive analysis. Empirical data was collected using the built-in Power BI tools, the analysis of the official accounting documentation of the department, the survey of employees, as well as the analysis of data from the learning management system (LMS).

To ensure comparability of the results, the collection of factual data in the control and experimental periods was carried out according to identical criteria of key performance indicators. The summary results of the experimental study are shown in Table 1.

Table 1. Dynamics of key performance indicators of the department in the control and experimental stages

Criteria	*Before the introduction of Power BI*	*After implementation*	*Change*
Average report preparation time	*5 days*	*2 days*	*decreased by 60%*
Frequency of using analytical tools (Power BI, Excel, text reports) in decision-making (%)	*25%*	*85%*	*increased by 60%*
The level of implementation of the planned indicators of the department (%)	*87%*	*99%*	*increase by 12%*
The level of employee satisfaction with data visualization, which contributes to a more accurate and faster interpretation of information (on a 5-point scale)	*3.2 points out of 5 possible*	*4.8 out of 5 points*	*increased by 50%*
Student academic performance (average score in the disciplines of the department)	*2.7*	*3.2*	*0.5*
Student attendance (%)	*84%*	*96%*	*12%*
Teachers' publication activity (%)	*46%*	*71%*	*25%*
The number of identified and eliminated problem areas based on the results of the analysis	*9*	*36*	*27*
The speed of obtaining analytical information (the time from the request to the finished report)	*2*	*0.5*	*The time was reduced by 75%*
Employee involvement in management processes (%)	*32%*	*84%*	*52%*

To check the statistical significance of the differences between the initial and final results, the Student's t-test was applied. The empirical value of t_{emp} =2.62 exceeds the critical value of t_{crit} =2.262 with a significance level of $p < 0.05$. This indicates that there are statistically significant differences between the results at the level of 5%, which confirms the effectiveness of using Power BI in managing the department's activities.

At the end of the experiment, a comparison of the KPI values in both the control and experimental periods showed the impact of the introduction of Power BI on the quality and speed of decision-making:

– Several specific management situations were recorded in the experimental period, demonstrating how the rapid receipt of data from Power BI led to a better and more timely decision compared to how it would have happened in the control period. The number of academic debts decreased by 15% after the introduction of Power BI, which made it possible to quickly identify "problem" groups and make timely decisions. This is proof of the increased effectiveness of data-based management decision-making.

– The introduction of the new tool has significantly increased the speed of decision-making and the overall efficiency of the department. A direct proof of the efficiency improvement was the reduction in the average time for preparing semester and annual reports from 5 days to 2 days, which is 60% time savings. In addition, the system allows you to instantly create lists of teachers who meet the specified criteria, which is very important for the prompt nomination of recommendations for prizes and awards, and the rapid identification of a list of teachers who meet the requirements for managing master's theses.

In order to subjectively assess the impact of the introduction of Power BI on improving management efficiency, an additional questionnaire survey of the head and staff of the department (47 respondents) was conducted. The questionnaire has a clear structure of three thematic blocks that ensure the completeness and reliability of the assessment:

– data visualization and analysis needs. The questions in this section are aimed at assessing the current needs of employees in data visualization and analysis, regardless of the tools used;

– experience and skills of working with Power BI. This unit evaluates the actual proficiency of the tool and its use among the department staff, including skills in creating dashboards, interpreting reports, and working with data sources;

– perception of the influence of Power BI on improving the effectiveness of department management and the organization of the educational process. These questions are aimed at assessing the staff's subjective perception of the contribution of Power BI to improving the effectiveness of the organizational and managerial activities of the department and the organization of the educational process.

As a result of the survey, it was revealed that the staff of the department are aware of the high importance of prompt, objective and centralized access to data. The vast majority of the department's staff (93.6% of respondents) consider it important to have a single, centralized platform for viewing key indicators. Power BI, as a centralized BI analytics tool, is a direct answer to this question. It provides consolidation of data on all types of department activities in a single space, which was previously impossible when using disparate tables and reports. The high assessment of the importance of using up-to-date data to improve work efficiency confirms the willingness of staff to use BI-tools to visualize and analyze data, and make informed decisions based on them.

The responses from employees with experience working with Power BI (section 2) demonstrate a generally positive attitude towards the tool and its main characteristics. The majority of respondents (66%) agree that data visualization in Power BI reports is clear and informative, and they also consider the Power BI interface intuitive. Satisfaction with one's own skills in working with Power BI and the degree of agreement with the intuitiveness of the interface showed the lowest levels among the positive responses. A moderate level of satisfaction with current qualifications, with an overall positive attitude towards the tool, indicates the need for further development of training and resources, rather than rejection of the platform itself.

Discussion

The survey results in section 3 directly confirm that Power BI is an effective tool for managing the department's activities. The vast majority of employees (87.2%) agree that Power BI speeds up the reporting process and helps to objectively evaluate the department's performance. The high percentage of agreement that Power BI reports contribute to the timely identification of problems demonstrates the transition from reactive to proactive management. The final question showed a high consensus that the introduction of Power BI is justified in terms of improving management efficiency.

The survey confirmed that the head and staff of the department not only feel an urgent need for modern data analysis and visualization tools, but also positively assess the existing experience in using Power BI. The reliability of the data obtained is confirmed by high internal consistency: the Cronbach's alpha coefficient (α) was 0.962. This indicates a high internal consistency of the data.

Thus, Power BI has proven its effectiveness as a tool for:

– improving the objectivity and speed of management decisions,

– improving transparency and coordination of the department's activities,

– providing employees with access to critical data.

Moreover, the positive impact of the platform on management processes is confirmed by the results obtained during a questionnaire survey of the staff and the head of the department. Their satisfaction with access to data and the quality of reporting has increased significantly.

Conclusion

The conducted research confirms that the implementation of the Power BI platform in the department's management transforms disparate data sets into a strategic asset for making informed decisions. The transition from static reports to the Data-Driven Management model has made it possible to overcome data fragmentation and automate monitoring of key performance indicators.

The main results of the study are as follows:

– centralized collection of information from LMS, DBMS, and IoT sensors was implemented, which ensured high accuracy and efficiency of analytics,

– The developed interactive dashboards allow not only to visualize the current state of educational and scientific activities, but also to identify latent trends and "risk zones" at early stages,

– The use of predictive analytics tools has created a methodological basis for the transition to proactive resource planning and personalization of educational trajectories.

Thus, the proposed approach to the digitalization of academic management contributes to the formation of a culture of analytical thinking at the university. The developed semantic model and the Power BI toolkit are an effective basis for continuous improvement of the quality of education and optimization of administrative processes in the context of digital transformation of higher education.

Acknowledgements

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan within the project «IoT Transformation of an Educational Institution: Design, Implementation of Smart Classrooms and Training of Specialists in the Field of IoT for Education» (IRN AP23490844).

Список использованных источников

[1] Мухатаев А. Национальный стандарт аккредитации педагогического образования URL: https://www.kaznpu.kz/docs/docs/25.04.2023_5.pdf (дата обращения 14.03.2026)

[2] G. Akçapınar, A. Altun, P. As¸kar Using learning analytics to develop early-warning system for at-risk students, Int. J.Educ. Technol. High. Educ. 16 (1) (2019), https://doi.org/10.1186/s41239-019-0172-z

[3] Power BI [Электронный ресурс] – URL: https://powerbi.microsoft.com/ru (дата обращения 14.03.2026)

[4] Ahmadi, M.M., Zare, S., 2021. Business intelligence technology in research organizations (case study of academic institutes in Tehran). J. Syst. Manag. 6 (4), 69–101 https://doi.org:/10.30495/JSM.2021.1915695.1408

[5] Power BI – поддерживаемые источники данных. – URL: https://coderlessons.com/tutorials/bolshie-dannye-i-analitika/izuchite-power-bi/power-bi-podderzhivaemye-istochniki-dannykh (дата обращения 14.03.2026)

[6] Рогожа А.И. Анализ возможностей BI-систем в цифровой трансформации управленческой отчетности// Математика и информатика в образовании и бизнесе. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – М.: Aegitas, 2020. С. 477-482

[7] Константинова Е.Е. Сравнительный анализ программ бизнес-аналитики//Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. Под общей редакцией А.И. Вострецова. 2017 Издательство: Научно-издательский центр "Мир науки" (ИП Вострецов Александр Ильич) (Нефтекамск)/ – С.221-228

[8] Reymark D. Deleña, Norniña J. Dia, Redeemtor R. Sacayan, Joseph C. Sieras, Suhaina A. Khalid, Amer Hussien T. Macatotong, Sacaria B. Gulam Predicting student retention: A comparative study of machine learning approach utilizing sociodemographic and academic factors. Systems and Soft Computing, Volume 7, 2025, https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200352.

[9] A.I. Adekitan, E. Noma-Osaghae Data mining approach to predicting the performance of first year student in a university using the admission requirements Educ. Inf. Technol., 24 (2) (2018), pp. 1527-1543, https://doi.org/10.1007/S10639-018-9839-7

[10] J. Niyogisubizo, L. Liao, E. Nziyumva, E. Murwanashyaka, P.C. Nshimyumukiza Predicting student's dropout in university classes using two-layer ensemble machine learning approach: a novel stacked generalization Comput.Educ., https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100066

[11] Эзрох Ю.С., Каширина А.М. Академическая задолженность в высшей школе: анализ причин и возможностей преодоления // Высшее образование в России. 2023. Т. 32. №1. С. 71–92. https://doi.org/10.31992/0869-3617-2023-32-1-71-92

[12] Турашев М. Создание адаптированной системы управления образованием с использованием интеллектуальных технологий. //Сборник материалов XVIII Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Ǵylym jáne bilim - 2023» С.773-776

[13] Голубин А.В. Внедрение Power BI для визуализации данных абитуриентов и оценки работы приемной комиссии университета Smart Digital Economy. Vol.2. №1,2022. – P.58-63 https://www.j-ets.net/collection/published-issues/27_1

[14] Работа с представлением моделирования в Power BI Desktop. URL: https://learn.microsoft.com/ru-ru/power-bi/transform-model/desktop-modeling-view

[15] Шухман А.Е., Парфенов Д.И., Легашев Л.В., Гришина Л.С. Анализ и прогнозирование успеваемости обучающихся при использовании цифровой образовательной среды // Высшее образование в России. 2021. Т. 30. № 8-9. С. 125-133. https://doi.org/10.31992/0869 3617-2021-30-8-9-125-133

References

[1]Muhataev A. Nacional'nyj standart akkreditacii pedagogicheskogo obrazovanija. URL: https://www.kaznpu.kz/docs/docs/25.04.2023_5.pdf (date of request 14.03.2026) (In Russian)

[2] G. Akçapınar, A. Altun, P. As¸kar Using learning analytics to develop early-warning system for at-risk students, Int. J.Educ. Technol. High. Educ. 16 (1) (2019), https://doi.org/10.1186/s41239-019-0172-z

[3] Power BI [Jelektronnyj resurs] – URL: https://powerbi.microsoft.com/ru (date of request 14.03.2026) (In Russian)

[4] Ahmadi, M.M., Zare, S., 2021. Business intelligence technology in research organizations (case study of academic institutes in Tehran). J. Syst. Manag. 6 (4), 69–101 https://doi.org:/10.30495/JSM.2021.1915695.1408

[5] Power BI – podderzhivaemye istochniki dannyh. – URL: https://coderlessons.com/tutorials/bolshie-dannye-i-analitika/izuchite-power-bi/power-bi-podderzhivaemye-istochniki-dannykh (date of request 14.03.2026) (In Russian)

[6] Rogozha A.I. Analiz vozmozhnostej BI-sistem v cifrovoj transformacii upravlencheskoj otchetnosti// Matematika i informatika v obrazovanii i biznese. Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – M.: Aegitas, 2020. S. 477-482 (In Russian)

[7] Konstantinova E.E. Sravnitel'nyj analiz programm biznes-analitiki//Materialy Mezhdunarodnoj (zaochnoj) nauchno-prakticheskoj konferencii. Pod obshhej redakciej A.I. Vostrecova. 2017 Izdatel'stvo: Nauchno-izdatel'skij centr "Mir nauki" (IP Vostrecov Aleksandr Il'ich) (Neftekamsk)/ – S.221-228 (In Russian)

[8] Reymark D. Deleña, Norniña J. Dia, Redeemtor R. Sacayan, Joseph C. Sieras, Suhaina A. Khalid, Amer Hussien T. Macatotong, Sacaria B. Gulam Predicting student retention: A comparative study of machine learning approach utilizing sociodemographic and academic factors. Systems and Soft Computing, Volume 7, 2025, https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200352.

[9] A.I. Adekitan, E. Noma-Osaghae Data mining approach to predicting the performance of first year student in a university using the admission requirements Educ. Inf. Technol., 24 (2) (2018), pp. 1527-1543, https://doi.org/10.1007/S10639-018-9839-7

[10] J. Niyogisubizo, L. Liao, E. Nziyumva, E. Murwanashyaka, P.C. Nshimyumukiza Predicting student's dropout in university classes using two-layer ensemble machine learning approach: a novel stacked generalization Comput.Educ., https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100066

[11] Jezroh Ju.S., Kashirina A.M. Akademicheskaja zadolzhennost' v vysshej shkole: analiz prichin i vozmozhnostej preodolenija // Vysshee obrazovanie v Rossii. 2023. T. 32. №1. S. 71–92. https://doi.org/10.31992/0869-3617-2023-32-1-71-92 (In Russian)

[12]Turashev M. Sozdanie adaptirovannoj sistemy upravlenija obrazovaniem s ispol'zovaniem intellektual'nyh tehnologij. //Sbornik materialov XVIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii studentov i molodyh uchenyh «Ġylym jáne bilim - 2023» S.773-776 (In Russian)

[13] Golubin A.V. Vnedrenie Power BI dlja vizualizacii dannyh abiturientov i ocenki raboty priemnoj komissii universiteta Smart Digital Economy. Vol.2. №1,2022. – P.58-63 https://www.j-ets.net/collection/published-issues/27_1 (In Russian)

[14] Rabota s predstavleniem modelirovanija v Power BI Desktop. URL: https://learn.microsoft.com/ru-ru/power-bi/transform-model/desktop-modeling-view (In Russian)

[15] Shuhman A.E., Parfenov D.I., Legashev L.V., Grishina L.S. Analiz i prognozirovanie uspevaemosti obuchajushhihsja pri ispol'zovanii cifrovoj obrazovatel'noj sredy // Vysshee obrazovanie v Rossii. 2021. T. 30. № 8-9. S. 125-133. https://doi.org/10.31992/0869 3617-2021-30-8-9-125-133 (In Russian)

ҒТАХР 14.35.09

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.026

Е. Мұсират[1*], Е.Ы. Бидайбеков[1], Н.И. Пак[2], Н.Т.Ошанова[1], И.Т. Сәлғожа[1*]

[1] Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[2]В.П. Астафьев атындағы Красноярск мемлекеттік педагогикалық университеті, Красноярск қ., Ресей
[*]*e-mail: erzat.en@gmail.com*

ПЕДАГОГТЕРДІ IT-МИКРОБІЛІКТІЛІКТЕРГЕ ОҚЫТУҒА АРНАЛҒАН АДАПТИВТІ EDTECH-ПЛАТФОРМАЛАР: ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАНДЫҚ ТӘЖІРИБЕГЕ ШОЛУ

Аңдатпа

Бұл мақалада педагогтерді IT-микробіліктіліктерге оқытуға арналған адаптивті EdTech-платформалардың қазақстандық және халықаралық тәжірибесіне шолу жасалған. Зерттеудің мақсатына сай педагогтарды үздіксіз кәсіби дамту контекстінде IT-микробіліктіліктерді қалыптастыруға көздейтін цифрлық платформалардың педагогикалық әлеуеті талданып, оларды жобалау мен пайдаланудың теориялық негіздерін жүйелеу. Зерттеу барысында келесі әдістері қолданылды: салыстырмалы талдау, контент-талдау және жүйелеу. Мақалада халықаралық (Coursera, edX, Microsoft Learn және т.б.) және қазақстандық EdTech-платформалардың функционалдық мүмкіндіктері, адаптивтілік элементтері және педагогтарға арналғандығы қарастырылды. Нәтижелер адаптивті оқыту механизмдері педагогтерді жеке оқу траекториясы бойынша қалыптастыруда және IT-микробіліктіліктерді игертуде маңызды рөл атқаратынын көрсетті. Зерттеу нәтижелері педагогтарға арналған адаптивті EdTech-платформаларын жобалаудың ғылыми-әдістемелік негіздерін айқындауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: IT-микробіліктіліктер, педагогтердің кәсіби дамуы, адаптивті оқыту, EdTech-платформалар, цифрлық білім беру, lifelong learning.

Е. Мұсират[1], Е.Ы. Бидайбеков[1], Н.И. Пак[2], Н.Т.Ошанова[1], И.Т. Сәлғожа[1]
[1]Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан
[2] Красноярский государственный педагогический университет им. В.П.Астафьева, г.Красноярск, Россия

АДАПТИВНЫЕ EDTECH-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕДАГОГОВ IT-МИКРОКВАЛИФИКАЦИЯМ: ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНОГО И КАЗАХСТАНСКОГО ОПЫТА

Аннотация

В данной статье рассматривается казахстанский и международный опыт адаптивных EdTech-платформ для обучения учителей ИТ-микронавыкам. В соответствии с целями исследования анализируется педагогический потенциал цифровых платформ, направленных на формирование ИТ-микронавыков в контексте непрерывного профессионального развития учителей, и систематизируются теоретические основы их проектирования и использования. В исследовании использовались следующие методы: сравнительный анализ, контент-анализ и систематизация. В статье рассматриваются функциональные возможности, элементы адаптивности и дизайн для учителей международных (Coursera, edX, Microsoft Learn и др.) и казахстанских EdTech-платформ. Результаты показывают, что адаптивные механизмы обучения играют важную роль в формировании учителей по индивидуальной траектории обучения и развитии ИТ-микронавыков. Результаты исследования позволяют определить научно-методологические основы проектирования адаптивных EdTech-платформ для учителей.

Ключевые слова: IT-микроквалификации, профессиональное развитие педагогов, адаптивное обучение, EdTech-платформы, цифровое образование, lifelong learning.

E. Mussirat[1], E.Y.Bidaybekov[1], N.I. Pak[2], N.T.Oshanova[1], I.T. Salgozha[1*]
[1]Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan
[2]Krasnoyarsk state pedagogical university named after V.P. Astafiev,Krasnoyarsk, Russia

ADAPTIVE EDTECH PLATFORMS FOR TRAINING TEACHERS IN IT MICRO-QUALIFICATIONS: A REVIEW OF INTERNATIONAL AND KAZAKHSTANI EXPERIENCE

Abstract

This article reviews the Kazakh and international experience of adaptive EdTech platforms for training teachers in IT micro-skills. In accordance with the objectives of the study, the pedagogical potential of digital platforms aimed at forming IT micro-skills in the context of continuous professional development of teachers is analyzed, and the theoretical foundations of their design and use are systematized. The following methods were used in the study: comparative analysis, content analysis and systematization. The article considers the functional capabilities, adaptability elements and design for teachers of international (Coursera, edX, Microsoft Learn, etc.) and Kazakhstani EdTech platforms. The results show that adaptive learning mechanisms play an important role in the formation of teachers along an individual learning trajectory and the development of IT micro-skills. The results of the study allow us to identify the scientific and methodological foundations of designing adaptive EdTech platforms for teachers.

Keywords: IT micro-qualifications, professional development of teachers, adaptive learning, EdTech platforms, digital education, lifelong learning.

Кіріспе

Қазіргі кезеңде цифрландыру процестерінің қарқынды дамуы білім беру жүйесінің мазмұны мен ұйымдастырылуына түбегейлі жаңа талаптар қоюда. Білім беру тәжірибесіне ақпараттық-коммуникациялық технологияларды жүйелі түрде енгізу мұғалімдердің өз мамандығын жүзеге асыру тәсілін түбегейлі өзгертуде. Бұрын мұғалімнің негізгі функциясы білім беру болса, бүгінде олар цифрлық білім беру ортасын жобалайтын, деректерге негізделген шешімдер қабылдайтын және технологиялық құралдарды тиімді біріктіретін маман ретінде қарастырылады.

Бұл трансформация мұғалімдердің IT құзыреттіліктерін үнемі жетілдіруді қажет етеді. Мұғалімдердің цифрлық құзыреттіліктерін жүйелеу үшін DigCompEdu және ЮНЕСКО-ның АКТ құзыреттілік шеңбері [1] сияқты шеңберлер халықаралық деңгейде ұсынылды. Үздіксіз кәсіби даму (ҮКД) тұжырымдамасы цифрлық қоғамда педагогикалық қызметкерлердің кәсіби тұрақтылығы мен бәсекеге қабілеттілігін қамтамасыз етудің стратегиялық шартына айналуда. Зерттеулер кәсіби дамудың дәстүрлі түрлері жиілігі мен мазмұны жағынан икемсіз болғандықтан, технологиялық прогрестің қарқынына ілесе алмайтынын көрсетті. Сондықтан мұғалімдердің кәсіби дамуын бір реттік оқиға ретінде емес, ұзақ мерзімді, динамикалық және жүйелі процесс ретінде қарастыру керек.

Өмір бойы білім алу тұжырымдамасы қазіргі кәсіби ортада негізгі қағидаға айналды. Цифрлық құралдар мен білім беру технологияларының үнемі жаңартылып отыруы мұғалімдердің кәсіби құзыреттіліктерін үнемі қайта қарауды талап етеді. Осыған байланысты икемді және жекелендірілген кәсіби даму модельдері барған сайын маңызды болып келеді.

Соңғы жылдары ақпараттық технологиялар саласындағы мұғалімдердің кәсіби дамуын қамтамасыз етуде IT микродағдылары тұжырымдамасы ерекше маңызға ие болды [2, 3, 4]. IT микродағдылары - қысқа мерзімде игерілетін, нақты практикалық нәтижелерге бағытталған және оқытуда тікелей қолданыла алатын цифрлық дағдылар жиынтығы. Бұл формат дәстүрлі ұзақ мерзімді курстармен салыстырғанда бірнеше артықшылықтарды ұсынады.

Біріншіден, микродағдылар мұғалімдердің нақты кәсіби қажеттіліктерін шешуге мүмкіндік береді. Әрбір мұғалімнің бастапқы дайындық деңгейі, кәсіби тәжірибесі және цифрлық құралдарға қажеттілігі әртүрлі. Микродағды форматы осы айырмашылықтарды ескереді және нақты микродағдыны дамытуға бағытталған.

Екіншіден, микродағдыларды қалыптастыру принципі мұғалімдердің цифрлық құзыреттіліктерін біртіндеп кеңейтуге жағдай жасайды. Жеке микродағдыларды кешенді

цифрлық құзыреттілік профилін қалыптастыру үшін біріктіруге болады. Бұл мұғалімдерге өздерінің кәсіби портфолиосын жүйелі түрде дамытуға мүмкіндік береді.

Үшіншіден, микродағдылар форматы мұғалімдердің оқуға деген ынтасын арттырады. Қысқа, нәтижеге бағытталған оқыту модульдері мұғалімдерге нақты жетістік сезімін береді және кәсіби дамудың өлшенетін нәтижелерін қамтамасыз етеді.

Осылайша, IT микродағдылар мұғалімдердің үздіксіз кәсіби дамуының икемді, жекелендірілген және нәтижеге бағытталған моделін әзірлеуге мүмкіндік береді. Бұл мұғалімдерге арналған IT микродағдылар оқыту моделін тиімді енгізу үшін қолдаушы цифрлық инфрақұрылымның маңызды екенін көрсетеді. Қазіргі уақытта EdTech платформалары мұндай инфрақұрылымның негізгі түрі болып табылады. Олар тек сандық форматта білім беру мазмұнын ұсынып қана қоймай, сонымен қатар модульдік, жекелендірілген және нәтижеге бағытталған кәсіби даму моделін жасауға ықпал етеді.

Халықаралық тәжірибеде микродағдылар негізіндегі курстар жетекші онлайн білім беру платформалары арқылы кеңінен таратылады. Солардың бірі - Coursera. Бұл платформа университеттермен және технологиялық компаниялармен серіктестікте оқытушыларға арналған қысқа мерзімді IT-бағытталған бағдарламаларды ұсынады.

Сол сияқты, edX платформасы MicroBachelors және Professional Certificate форматтарындағы микродағдылар бағдарламаларын ұсынады. Бұл форматтар дәстүрлі академиялық бағдарламалар мен қысқа курстар арасындағы көпір қызметін атқарады. Оқытушылар нақты модульдерді аяқтау арқылы жинақталған кредиттерге негізделген кәсіби сертификат ала алады. Бұл тәсіл микродағдылар моделін институционалдық тануға ықпал етеді. FutureLearn платформасы сонымен қатар кәсіби тәжірибемен тығыз байланысты қысқа, нәтижеге бағытталған курстарды ұсынады. Бұл платформаның ерекшелігі - курстар нақты кәсіби мәселелерді шешуге бағытталған, ал оқу мазмұны практикалық мысалдарға негізделген.

Халықаралық тәжірибені талдау ақпараттық технологиялар бойынша микродағдылар курстарын ұйымдастырудың бірнеше негізгі ұйымдастырушылық қағидаттарын анықтауға мүмкіндік береді.

Біріншіден, модульдік құрылым микродағдылар форматын тиімді енгізудің негізгі талабы болып табылады. Әрбір курс бірнеше өзара байланысты модульдерден тұрады, олардың әрқайсысы белгілі бір цифрлық құзыреттілікті дамытуға бағытталған. Модульдерге теориялық материалдар, практикалық тапсырмалар және өзін-өзі бағалау элементтері кіреді. Бұл құрылым оқытушыларға курс мазмұнын біртіндеп меңгеруге және оқу қарқынын өз бетінше реттеуге мүмкіндік береді.

Екіншіден, цифрлық сертификаттау жүйесі халықаралық микродағдылар курстарының ажырамас бөлігі болып табылады. Курсты немесе жеке модульдерді сәтті аяқтаған оқытушылар цифрлық сертификаттар немесе микробейджде алады. Бұл сертификаттар оқытушыларға алған IT дағдыларын ресми түрде растауға және кәсіби портфолиосын жақсартуға мүмкіндік береді. Халықаралық тәжірибеде мұндай сертификаттардың еңбек нарығында біртіндеп танылуы олардың кәсіби құндылығын арттырады.

Үшіншіден, университеттер мен технологиялық компаниялар арасындағы серіктестік микродағдылар бағдарламаларының сапасын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Университеттер оқу бағдарламасына ғылыми және әдістемелік қолдау көрсетсе, технологиялық компаниялар оны заманауи IT құралдарымен және нақты практикалық мысалдармен толықтырады. Бұл серіктестік оқытушыларға IT микродағдыларын тек теориялық тұрғыдан ғана емес, сонымен қатар практикалық тұрғыдан да тиімді дамытуға мүмкіндік береді.

Төртіншіден, халықаралық платформалардағы білім беру мазмұнының практикалық бағытына ерекше назар аударылады. Курстар тек теориялық ақпаратпен шектелмейді, сонымен қатар нақты цифрлық құралдарды пайдалану, деректерді талдау, онлайн оқыту ортасын басқару және цифрлық білім беру ресурстарын әзірлеу сияқты іс-шараларды

қамтиды. Бұл IT микродағдыларының оқыту тәжірибесіне тікелей интеграциялануын қамтамасыз етеді.

Жалпы алғанда, халықаралық тәжірибе IT микродағдылары курстары икемді, модульдік және нәтижеге бағытталған форматта ұйымдастырылатынын көрсетеді. Бұл модель оқытушыларға өздерінің кәсіби қажеттіліктерін ескеруге, оқу процесін жекешелендіруге және жүйелі кәсіби даму траекториясын жасауға мүмкіндік береді.

Дегенмен, микродағды моделінің толық әлеуеті бейімделген оқыту механизмдерімен үйлескенде ғана жүзеге асады. Халықаралық тәжірибеде IT микродағдылары бойынша мұғалімдерді даярлаудың тиімділігі көбінесе бейімделу және жекелендірілген оқыту принциптеріне негізделген. Микродағды форматтары мазмұнды құрылымдауға икемді тәсіл ұсынса, бейімделген EdTech платформалары бұл мазмұнды әрбір мұғалімнің жеке қажеттіліктеріне бейімдеуге мүмкіндік береді. Осылайша, технологиялық және дидактикалық компоненттердің үйлесімі кәсіби даму сапасын арттырады.

Бейімделген оқытудың маңызды элементі - диагностикалық бағалау. Курстың басында немесе халықаралық платформалардағы модульдер арасында өткізілетін бастапқы тестілер мұғалімнің IT саласындағы біліктілік деңгейін анықтауға бағытталған. Диагностикалық нәтижелерге сүйене отырып, жүйе белгілі бір модульдерді өткізіп жіберуді немесе керісінше, қосымша материалдарды игеруді ұсынады. Бұл тәсіл оқыту уақытын үнемдейді және оқытуды қажетсіз ақпаратпен шамадан тыс жүктеуден аулақ болады. Нәтижесінде мұғалімдер тек өздеріне шынымен қажет дағдыларды ғана игере алады.

Бейімделу механизмдерінің тағы бір маңызды құрамдас бөлігі - оқу қарқынын өз бетінше реттеу мүмкіндігі. Білімін кәсіби жұмысымен қатар жүргізетін мұғалімдер үшін икемді кесте өте маңызды. Асинхронды оқыту форматтарын ұсына отырып, EdTech платформалары мұғалімдерге оқу процесін жұмыс кестелеріне бейімдеуге мүмкіндік береді. Бұл үздіксіз кәсіби даму принципін іс жүзінде жүзеге асырудың маңызды алғышарты.

Сонымен қатар, халықаралық тәжірибеде ұсыныс беру жүйелері кеңінен қолданылады. Бұл жүйелер мұғалімдердің оқу белсенділігіне, тапсырма нәтижелеріне және қызығушылықтарына негізделген болашақ оқу модульдерін немесе қосымша курстарды автоматты түрде ұсынады. Бұл механизм жүйелі, үздіксіз кәсіби дамуды қамтамасыз етеді және мұғалімдерге өздерінің IT микродағдыларын үнемі кеңейтуге мүмкіндік береді.

Бейімделген платформалардың тиімділігі олардың деректерді талдау мүмкіндіктерімен де байланысты. Мұғалімдердің оқу белсенділігі, тапсырманы орындау жылдамдығы, қателік үлгілері және табыс көрсеткіштері жүйемен жазылып, талданады. Бұл ақпарат оқу мазмұнын жақсарту, қосымша қолдау көрсету және кәсіби даму траекторияларын түзету үшін негіз болып табылады. Осы тұрғыдан алғанда, бейімделген EdTech платформаларын тек оқу құралы ретінде ғана емес, сонымен қатар мұғалімдердің кәсіби дамуын басқарудың интеллектуалды жүйесі ретінде де қарастыруға болады.

IT микродағдылары курстарының тиімділігі, ең алдымен, олардың практикалық бағытымен анықталады. Халықаралық тәжірибеде оқу мазмұны нақты кәсіби міндеттерге негізделген: сандық білім беру ресурстарын әзірлеу, деректерді визуализациялау, онлайн сабақтарды ұйымдастыру және жасанды интеллект құралдарын оқытуға біріктіру. Бұл тәсіл микродағдылардың тек формальды сипатта емес, мұғалімдердің күнделікті жұмысында тиімді пайдаланылуын қамтамасыз етеді.

Курстардың кәсіби тәжірибеге тікелей интеграциялануы олардың тиімділігінің маңызды көрсеткіші болып табылады. Егер мұғалімдер оқу барысында алған цифрлық дағдыларын сабақтарды жоспарлау, оқушылардың үлгерімін талдау немесе цифрлық ресурстарды әзірлеу кезінде пайдалана алса, микродағдылар моделінің педагогикалық әлеуеті толық жүзеге асады. Бұл мұғалімдердің цифрлық құзыреттіліктерінің жылдам дамуына ықпал етеді және олардың кәсіби тиімділігін арттырады.

Сонымен қатар, цифрлық сертификаттау жүйесі мұғалімдердің оқуға деген ынтасын арттыруда маңызды рөл атқарады. Курсты немесе жеке модульдерді аяқтағаннан кейін

берілетін микробелгілер мен сертификаттар мұғалімдердің кәсіби жетістіктерін растайды және олардың үздіксіз кәсіби дамуға қызығушылығын арттырады. Халықаралық тәжірибеде микродағдылар сертификаттарын еңбек нарығында және кәсіби сертификаттау жүйесінде біртіндеп тану олардың құндылығын арттырады.

Қазақстан жағдайында мұғалімдерді IT микродағдыларына оқыту мәселесі білім беруді цифрландыру стратегиялары аясында өзекті болып табылады. Мұғалімдердің цифрлық құзыреттілігін арттыруға бағытталған мемлекеттік бағдарламаларға қарамастан, институционалдық деңгейде микродағдылар форматтары мен бейімделген оқыту механизмдерін енгізу жүйесіз болып қала береді. Сондықтан халықаралық тәжірибеде қолданылатын бейімделу, модульдік құрылым, цифрлық сертификаттау және ұсыныс жүйелері сияқты механизмдерді ғылыми тұрғыдан талдау және ұлттық білім беру жүйесіне бейімдеу маңызды. Жалпы алғанда, мұғалімдерді IT микродағдылары бойынша оқыту халықаралық тәжірибеде икемділікке, жекешелендіруге және практикалық нәтижелерге бағытталған модель ретінде өзін дәлелдеді. Бейімделген EdTech платформалары бұл модельдің технологиялық негізін құрайды және мұғалімдердің кәсіби дамуын деректерге негізделген, жүйелі және нәтижеге бағытталған процесс ретінде ұйымдастыруға мүмкіндік береді. Қазақстан жағдайында бұл тәжірибелерді ұлттық жағдайларды ескере отырып енгізу мұғалімдердің цифрлық құзыреттілігінің сапасын жақсартуға және білім беру жүйесінің цифрлық трансформациясын қамтамасыз етуге ықпал етеді.

Микробіліктіліктер мен бейімделген оқыту саласындағы зерттеулердің артуына қарамастан, ұлттық цифрлық трансформация жағдайында мұғалімдердің IT микродағдыларын дамытуда осы екі бағыттың синергетикалық қолданылуын кешенді талдау тұрғысынан ғылыми алшақтық сақталуда [5, 6, 7, 8]. Сертификаттау жүйелеріне бейімделген платформаларды институционалдық интеграциялау механизмдері, сондай-ақ микрооқытудың тұрақты тиімділігін қамтамасыз ететін педагогикалық жағдайлар әлі де жеткіліксіз зерттелген. Бұл мақаланың мақсаты - халықаралық және қазақстандық тәжірибені салыстырмалы талдау негізінде мұғалімдердің IT микродағдыларын дамытудың негізгі құралы ретінде бейімделген білім беру платформаларының педагогикалық әлеуетін ғылыми тұрғыдан негіздеу және білім берудің цифрлық трансформациясы жағдайында мұндай жүйелерді жобалауға қойылатын тұжырымдамалық және дидактикалық талаптарды анықтау.

Зерттеу әдіснамасы

Зерттеуде сапалық және сандық талдау элементтерін біріктіретін кешенді әдіснамалық тәсіл қолданылды. Негізгі әдістер халықаралық және қазақстандық EdTech платформаларын салыстырмалы талдау, ғылыми әдебиеттердің мазмұндық талдауы және алынған деректерді жүйелеу болды.

Салыстырмалы талдауда Coursera, edX, Microsoft Learn, Khan Academy, FutureLearn, Örleu және Coursera for Government сияқты платформалар ұсынатын IT микродағдылары, бейімделген оқыту механизмдері және сандық сертификаттау жүйелері бойынша курстар қарастырылды. Мазмұнды талдау IT микродағдылары, бейімделген оқыту және мұғалімдердің сандық құзыреттіліктерін дамыту бойынша халықаралық зерттеулер мен нормативтік құжаттарға негізделген.

Сонымен қатар, Қазақстандағы мектеп мұғалімдері мен университет профессорлары арасында онлайн сауалнама жүргізіліп, бейімделген платформалардың, микродағдылардың және IT құзыреттіліктерінің қажеттілігі туралы 100 респонденттің пікірлері жиналды. Сауалнама шкалаларының сенімділігі Кронбах альфасымен расталды ($\alpha = 0{,}94$). Алынған деректер ақпараттық технологиялар саласындағы микродағдыларды дамытуға арналған бейімделген платформаларды әзірлеуге арналған тұжырымдамалық және дидактикалық талаптарды анықтау үшін жүйеленді.

Зерттеу нәтижелері

Бейімделген оқыту – бұл білім беру процесі оқушының жеке ерекшеліктеріне, білім деңгейіне, оқу қарқынына және қосымша тапсырмалар мен түсіндіру қажеттілігіне негізделіп ұйымдастырылатын тәсіл. Бұл тәсіл оқушының әрекеттерін талдайтын және осыған сүйене отырып, оқытудың мазмұны мен реттілігін нақты уақыт режимінде өзгертетін интеллектуалды жүйелерге негізделген [9]. Бейімделген оқыту қазіргі уақытта тек технологиялық процесс ретінде ғана емес, сонымен қатар мұғалімдердің кәсіби дағдыларының әртүрлілігіне қажетті жауап ретінде де қарастырылады. Сызықтық курстардан айырмашылығы, бейімделген жүйелер материалдың қарқынын, мазмұнын және күрделілігін жеке пайдаланушының қажеттіліктеріне сәйкестендіру үшін алгоритмдерді пайдаланады. Зерттеулерге сәйкес [10, 11], негізгі артықшылықтардың бірі – білім алудың жоғары деңгейін сақтай отырып, оқуға жұмсалатын уақыттың қысқаруы. Бұл әсіресе IT микродағдылары тұрғысынан маңызды: тәжірибелі информатика мұғаліміне алгоритмдердің негіздерін қайта ойластыруға уақыт жұмсаудың қажеті жоқ, ал гуманитарлық ғылымдар маманына жасанды интеллект (ЖИ) көмекшілерімен біртіндеп танысу қажет болуы мүмкін. Бейімделген жүйелер білім беру жолдарын жекешелендіру үшін ЖИ, машиналық оқыту және деректерді талдау технологияларын қамтиды. Бұл оқу материалдарын тиімді таратуға және алдын ала белгіленген оқу бағдарламасына емес, оқушылардың үлгеріміне негізделген тапсырма қиындығын реттеуге мүмкіндік береді. Зерттеулер мұндай жүйелердің дәстүрлі оқу орталарымен салыстырғанда оқушылардың қатысуын арттыратынын және тереңірек оқуға ықпал ететінін көрсетті. Мұғалімдерді даярлау тұрғысынан бейімделген оқыту тек технологиялық инновация ретінде ғана емес, сонымен қатар мұғалімдерді заманауи IT қолдайтын білім беру ортасының динамикалық талаптарына дайындайтын құрал ретінде де қарастырылады: сандық мазмұнды әзірлеуден бастап оқу деректерін талдауға және оқушылардың жеке оқу жолдарында қолдауға дейін. Халықаралық деңгейде бейімделген механизмдерді енгізетін бірқатар платформалар бар. Оның айқын мысалы - оқушылардың жауаптарын талдау және динамикалық оқу жолдарын басқаруды қолдана отырып, бейімделген білім беру мазмұнын әзірлеуге арналған Smart Sparrow платформасы. Бұл платформалар әрбір пайдаланушының қажеттіліктеріне материалдардың қиындығы мен қарқынын автоматты түрде реттейді, мазмұнмен өзара әрекеттесуде жасанды интеллект пен аналитиканы пайдаланады [11]. Squirrel AI сияқты ірі халықаралық шешімдер AI-ді «негізгі сәттерді» немесе оқу материалының ең кішкентай элементтерін анықтау және оқушылардың біліміндегі олқылықтарды толтыру үшін пайдаланады. Бұл платформаға оқу жолдарын дәлірек бейімдеуге және күрделі тақырыптардың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Дәстүрлі LMS жүйелері (мысалы, Moodle) бейімделген құралдардың негізі бола алады, бірақ олар жасанды интеллектке бейімделмеген: олар оқу жолдарын автоматты түрде жекешелендіруге қарағанда курсты ұйымдастыруға көбірек көңіл бөледі.

Сондай-ақ, LMS орталарына бейімделген толықтырулар ретінде қызмет ететін, студенттердің белсенділігін талдау негізінде оқу әрекеттеріне арналған жеке ұсыныстар беретін зерттеу шешімдері (мысалы, RiPPLE) бар [12]. Бейімделген оқыту платформалары әртүрлі механизмдерді пайдаланады:

1. диагностикалық тестілеу және үздіксіз бақылау. Жүйелер студенттердің оқуын бастапқы және мерзімді бағалауды жүргізеді, содан кейін жекелендірілген оқу жолдарын жасайды;

2. жасанды интеллект және машиналық оқыту модельдері. Оқушылардың материалмен өзара әрекеттесуіне негізделген платформалар әлсіз жақтарын болжайды және қосымша ресурстарды автоматты түрде ұсынады немесе тапсырмалардың қиындығын арттырады;

3. тапсырмаларды автоматты түрде тексеру және кері байланыс. Қызметтер нақты уақыт режимінде кері байланысты есептейді және береді, мұғалімнің жұмыс жүктемесін азайтады және студенттердің қиындықтарына жауап беру жылдамдығын арттырады;

4. ұсыныс механизмдері. Жүйелер тақырып немесе күрделілік бойынша ұқсас ресурстарды ұсынады, бұл динамикалық оқу жолдарын құруға және оқу процесіне қатысуды арттыруға мүмкіндік береді.

Бұл тетіктердің үйлесімі әрбір пайдаланушы жеке білім беру тәжірибесін алатын интеллектуалды оқу ортасын жасайды, бұл әсіресе ересек оқушылар үшін маңызды, мысалы, кәсіби қажеттіліктері мен цифрлық дағдыларына бейімделген икемді кесте мен мазмұнды қажет ететін мұғалімдер үшін. Талдау көрсеткендей, заманауи платформалар бейімделуді үш негізгі механизм арқылы жүзеге асырады:

1. Жекешелендірілген оқу жолын жасау үшін қабылдау тестілеуін жүргізу.

2. Жүйе пайдаланушы қателеріне жауап береді. Егер мұғалім бұлтқа негізделген тапсырманы орындай алмаса, жүйе қосымша бейнелерді немесе жеңілдетілген кейс-стадилерді ұсынады.

3. Деректерге негізделген аналитика (LRS/LMS): оқушының күйіп қалу немесе қызығушылығын жоғалту қаупін анықтау үшін болжамды аналитиканы пайдалану.

Бейімделген оқыту платформалары бірқатар негізгі артықшылықтарды ұсынады:

- Оқуды жекешелендіру: оқу әрбір мұғалімнің қажеттіліктері мен қарқынына жекешелендірілген және бейімделген.

- Оқу жолдарының икемділігі: платформалар алдыңғы білімге негізделген әртүрлі оқу жолдарын таңдауға мүмкіндік береді.

- Оқу уақытын қысқарту: бейімделген алгоритмдерді пайдалану әлсіз білімге мақсатты қолдау көрсету арқылы жеделдетілген оқуды жеңілдете алады.

Халықаралық тәжірибеде мұндай платформалар мұғалімдерді оқыту мен кәсіби дамуда белсенді қолданылады. Олар үздіксіз және модульдік оқыту жүйесін ұсына алады, мұнда әрбір мұғалім бастапқы дайындығына негізделген сандық дағдыларын біртіндеп жаңарту мүмкіндігіне ие [13]. Микрокредиттер – нақты дағдыларды растайтын шағын, мақсатты біліктіліктер және бүкіл әлемдегі мұғалімдердің кәсіби даму жүйелерінің бөлігі болып табылады. Бұл бағдарламалар құзыреттілікке негізделген тәсілге, икемді мазмұнға және дағдыларды сандық түрде растау мүмкіндігіне бағытталған. Олар мұғалімдерге бүгінгі цифрлық ортада оқыту үшін қажетті нақты IT дағдыларын қоса алғанда, цифрлық және педагогикалық сауаттылығын тез жақсартуға мүмкіндік береді. Ұлыбританияда Ашық Университет мұғалімдерді даярлауда микрокредиттерді пайдалануды белсенді түрде насихаттайды, дәстүрлі дәрежеден тәуелсіз аяқталуы мүмкін курстарды ұсынады. Бұл мұғалімдерге заманауи білім беру талаптарына сай келетін практикалық дағдыларды дамытуға көмектеседі. Зерттеулер микрокредиттер мұғалімдердің жұмысын сақтауды жақсартатынын көрсетеді, себебі кәсіби даму процесі нақты дағдыларды практикалық қолданумен және оқыту тиімділігін арттырумен тығыз байланысты [14]. Олар сондай-ақ мұғалімдердің кәсіби қажеттіліктері мен қызығушылықтарын ескеретін икемді оқу мүмкіндіктерін ұсынады. Зерттеуде мұғалімдерге IT микродағдыларын ұсынатын жетекші платформалар талданды (1-кесте).

Кесте 1. IT-микробіліктіліктерге арналған білім беру платформаларының салыстырмалы сипаттамасы

Платформа	*Деңгейі*	*Кілттік ерекшеліктер*
Coursera / edX	*Халықаралық*	*Алғышарттарға негізделген курстарды ұсыну үшін жасанды интеллектті пайдалану*
Khan Academy	*Халықаралық*	*Шеберлікке негізделген оқыту (Mastery Learning).*
Örleu (ҚР)	*Ұлттық*	*Кәсіби дамудың мемлекеттік стандарттарымен интеграция*
Coursera for Government (ҚР)	*Серіктестік*	*Қазақстандық мұғалімдердің жаһандық IT құзыреттілік бағыттарына қол жеткізуі*

Бейімделген оқыту платформаларын мұғалімдерді даярлауға интеграциялау цифрлық трансформацияның қиындықтарына жауап болып табылады. Бүгінгі әлемде мұғалімдерге тек пәнге тән құзыреттіліктер ғана емес, сонымен қатар оқушылардың оқуын қолдау үшін цифрлық құралдарды тиімді пайдалану мүмкіндігі де қажет. Бұған бейімделген оқыту логикасын түсіну, нәтижелерді талдау және деректерді пайдалану кіреді – бұл дағдылар XXI ғасырда мұғалімдер үшін маңызды болып келеді.

Қазақстанда білім беруді цифрландыру және жасанды интеллект технологияларын енгізу мемлекеттік деңгейде дамып келеді, бұл оқушыларды оқытуда да, мұғалімдердің кәсіби дамуында да бейімделген тәсілдерді қолданудың негізін қалайды. Мемлекеттік бағдарламаларға цифрлық білім беру шешімдерін, автоматтандырылған бағалауды және бейімделген оқыту элементтерін әзірлеу кіреді.

Әлемдік тәжірибе IT дағдыларын микрооқыту арқылы ең жақсы меңгеруге болатынын растайды.

Халықаралық деңгейде Google Career Certified немесе Microsoft Certified Educator сияқты бағдарламалар мұғалімдерге халықаралық деңгейде танылған мамандандырылған біліктіліктерді (деректер сауаттылығы, мектептер үшін киберқауіпсіздік) алуға мүмкіндік береді. Қазақстанда микродағдылар жүйесін енгізу «Цифрлық Қазақстан» жобасы және мұғалімдерді сертификаттау жүйесі аясында жүзеге асырылуда. Дегенмен, ақпараттық технологиялардың кейбір салаларында (мысалы, пән мұғалімдеріне арналған Python бағдарламалау негіздері) қазақ тілінде бейімделген мазмұнды ұсынатын платформалардың жетіспеушілігі анықталды.

Дәстүрлі кәсіби даму курстары көбінесе «біркелкі» деп сынға алынады. Ақпараттық технологиялар мұғалімдерін оқытуда бейімделген жүйелерді пайдалану келесі себептерге байланысты ұсынылады:

Біріншіден, бұл уақытты үнемдейді. Мұғалімдер - жұмыс жүктемесі көп мамандар. Бейімделген оқыту оларға бұрыннан білетін нәрселерін өткізіп жіберуге мүмкіндік береді.

Екіншіден, бұл когнитивті жүктемені азайтады. Выготскийдің «Жақын даму аймағы» кітабына сәйкес, алгоритм материалды өлшенген мөлшерде жеткізеді.

Үшіншіден, ол дағдыларды растайды. Микродағдылар тез нәтиже береді және өмір бойы оқуға ынтаны арттырады.

Болашақ және қазіргі мұғалімдер арасында жүргізілген сауалнамалар бейімделген технологияларға өте оң баға берді. Болашақ мұғалімдердің цифрлық бейімделген оқытуға дайындығын зерттеу мұндай технологияларды кәсіби жұмыстарында қолдануға деген ұмтылысты, сондай-ақ цифрлық дәуірде оқыту сапасын және оқушылардың білімін жақсартудағы маңыздылығын мойындауды көрсетті [15]. Сауалнама нәтижелері мұғалімдердің цифрлық платформалардың әлеуетін мойындайтынын және білім беру мәселелерін шешу үшін бейімделген механизмдер мен жасанды интеллект құралдарын пайдалануға қызығушылық танытатынын көрсетеді. Бұл деректер бейімделген білім беру платформаларын мұғалімдерді оқытуға және IT микродағдыларында кәсіби дамуға біріктірудің орындылығын растайды.

Зерттеу аясында Қазақстан Республикасындағы мектеп мұғалімдері мен университет профессорлары арасында сауалнама жүргізілді (n=100). Сауалнама цифрлық түрде жүргізілді (Google Forms). Сауалнама үш бөлімнен тұрды:

I. Демографиялық және техникалық профиль

- IT құралдарын меңгеру (5 балдық Ликерт шкаласы бойынша өзін-өзі бағалау).

- MOOC-тармен жұмыс тәжірибесі (Coursera, Stepik, Örleu және т.б.).

II. Бейімделген механизмдерді бағалау. Респонденттерден келесі бейімделген платформа мүмкіндіктерінің маңыздылығын бағалау сұралды:

- Тест алдындағы сәйкестендіру: орналастыру сынағына негізделген таныс тақырыптарды өткізіп жіберу мүмкіндігі.

- Динамикалық мазмұнды түзету: сәтті орындауға негізделген тапсырманың қиындығын автоматты түрде реттеу.

- Микрооқыту форматы: микродағдыларды игеру үшін қысқа модульдер бойынша (10-15 минут) оқытуға дайындық.

III. Кедергілер және әлеует

- Оларда жетіспейтін нақты IT микродағдылары туралы ашық сұрақтар (мысалы, "Білім берудегі жасанды интеллект", "Деректерді талдау", "Киберқауіпсіздік негіздері").

IT дағдылары бойынша сауалнаманың сенімділігі Кронбах Альфасын қолдану арқылы тексерілді. Нәтижелер жоғары ішкі сәйкестікті көрсетті (2-кесте).

Кесте 2. Сауалнама блоктарының сенімділік көрсеткіштері

Зерттеу индекстері	*Cronbach's Alpha*
Үздіксіз кәсіби даму	*0.87*
Микробіліктілік қабылдау	*0.89*
Адаптивтілік қажеттілігі	*0.91*
Платформа сұранысы	*0.93*
Жалпы сауалнама	*0.94*

Бұл нәтижелер қолданылған сауалнама құралдарының жоғары сенімділік деңгейіне ие екенін және алынған деректердің ғылыми талдауға жарамды екенін көрсетеді.

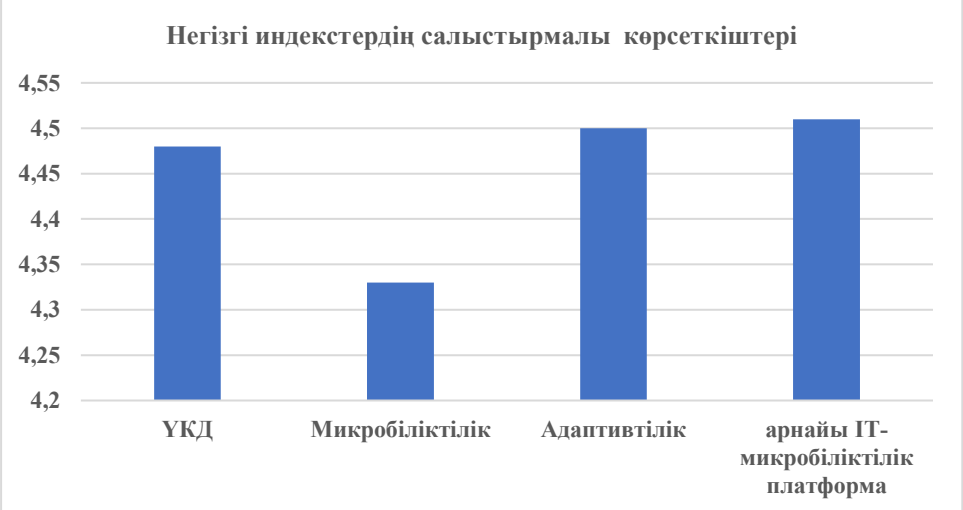
Негізгі тұжырымдар:

- Респонденттердің 82%-ы стандартты курстарда көбінесе олар үшін артық ақпарат болатынын атап өтті.

- 75%-ы өздерінің цифрлық біліктілік деңгейіне автоматты түрде адаптивті платформаларда оқуға дайын екенін білдірді.

- Негізгі кедергі: озық IT технологиялар (білім берудегі жасанды интеллект, VR/AR) бойынша жоғары сапалы локализацияланған мазмұнның болмауы.

Зерттеу нәтижелері педагогтердің IT саласындағы кәсіби дамуға деген қажеттілік жоғары екенін көрсетті. Үздіксіз кәсіби даму индексінің орташа мәні 4.48 болды. Сонымен қатар микробіліктілік форматы да оң бағаланды (Mean = 4.33). Адаптивті оқытуға қажеттілік индексі 4.50, ал арнайы IT-микробіліктілік платформасына сұраныс 4.51 болды (1-сурет).



Сурет 1. Негізгі индекстердің салыстырмалы көрсеткіштері

Қорытынды

Талдау көрсеткендей, адаптивті білім беру платформалары дербестендірілген таректория, жасанды интеллект технологияларын пайдалану және бағдарламалардың модульдік құрылымы арқылы IT мұғалімдерін микробіліктілік бойынша оқытудың тиімділігін арттыру үшін айтарлықтай әлеуетке ие. Халықаралық тәжірибе микробіліктіліктер мен адаптивті платформаларды педагогтердің кәсіби даму жүйесіне интеграциялаудың табысты үлгілерін көрсетеді, ал Қазақстандағы тәжірибе цифрлық білім беру реформалары аясында дамып келеді. Педагогикалық қауымдастықтың пікірлері мұндай құралдарға деген практикалық қажеттіліктің жоғары екенін растайды. Бұл өз кезегінде білім берудің цифрлық трансформациясы жағдайында педагогтерді даярлау жүйесіне адаптивті платформаларды енгізудің маңыздылығын айқындайды. Сонымен қатар адаптивті жүйелерді енгізу «Педагогтің цифрлық портфолиосын» қалыптастыруға мүмкіндік береді. Мұндай портфолиода микробіліктіліктер автоматты түрде жинақталып, педагогтің кәсіби құзыреттерінің объективті рейтингі қалыптасады.

Алғыс

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитеті қаржыландырды (Грант No AP23490844).

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1]Brown M., Mhichíl M.N.G., Beirne E., Costello E. The Global Micro-Credential Landscape: Charting a New Credential Ecology for Lifelong Learning // Journal of Learning for Development. 2021. DOI: https://doi.org/10.56059/jl4d.v8i2.525

[2]Ralston S.J. Higher education's microcredentialing craze: a postdigital-Deweyan critique // Postdigital Science and Education. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s42438-020-00121-8

[3]Kato S., Galán-Muros V., Weko T. The emergence of alternative credentials // OECD Education Working Papers. 2020. DOI: https://doi.org/10.1787/b741f39e-en

[4]Zawacki-Richter O., Marín V.I., Bond M., Gouverneur F. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0

[5]Chen L., Chen P., Lin Z. Artificial intelligence in education: A review // IEEE Access. 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988510

[6]Bond M., Bedenlier S., Marín V.I., Händel M. Emergency remote teaching in higher education: mapping the first global online semester // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2021. DOI: https://doi.org/10.1186/s41239-021-00282-x

[7]Ifenthaler D., Schumacher C. Learning analytics and digital transformation of education // Computers in Human Behavior. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106677

[8]Cabero-Almenara J., Palacios-Rodríguez A. Digital competence of higher education teachers: validation of DigCompEdu Check-In questionnaire // Sustainability. 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/su12135458

[9]Абдуллаев М. Адаптивные системы обучения на основе искусственного интеллекта в трансформации современного образовательного процесса // E-Conference Platform. 2025. №1(16-aprel). С. 440–444. URL: https://journals.tnmu.uz/conference/article/view/1550

[10]Brusilovsky P., Peylo C. Adaptive and Intelligent Web-based Educational Systems // International Journal of Artificial Intelligence in Education. 2003. Vol. 13. P. 159–172.

[11]Pane J.F., Steiner E.D., Baird M.D., Hamilton L.S. Informing Progress: Insights on Personalized Learning Implementation and Effects. 2017. DOI: https://doi.org/10.7249/RR2042

[12]Khosravi H., Kitto K., Williams J.J. RiPPLE: A Crowdsourced Adaptive Platform for Recommendation of Learning Activities. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.05522

[13]Myroshnichenko O. Micro-credentials for professional development of teachers: experience of open university (UK) // Continuing Professional Education: Theory and Practice. 2024. Vol. 79(2). P. 125–140. DOI: https://doi.org/10.28925/2412-0774.2024.2.10

[14]Scott A., Gath M.E., Gillon G., McNeill B., Ghosh D. Facilitators of Success for Teacher Professional Development in Literacy Teaching Using a Micro-Credential Model of Delivery // Education Sciences. 2024. Vol. 14(6). P. 578. DOI: https://doi.org/10.3390/educsci14060578

[15]Kurmasheva M., Zhorabekova A., Zheldibaeva R., Erekhanova F., Salybekova F. Gotovnost' budushchikh uchitelei inostrannogo yazyka k tsifrovomu adaptivnomu obucheniyu // Journal of Educational Sciences. 2025. T. 84(3). S. 40–51. DOI: https://doi.org/10.26577/JES20258434

Referenens

[1]Brown M., Mhichíl M.N.G., Beirne E., Costello E. The Global Micro-Credential Landscape: Charting a New Credential Ecology for Lifelong Learning // Journal of Learning for Development. 2021. DOI: https://doi.org/10.56059/jl4d.v8i2.525

[2]Ralston S.J. Higher education's microcredentialing craze: a postdigital-Deweyan critique // Postdigital Science and Education. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s42438-020-00121-8

[3]Kato S., Galán-Muros V., Weko T. The emergence of alternative credentials // OECD Education Working Papers. 2020. DOI: https://doi.org/10.1787/b741f39e-en

[4]Zawacki-Richter O., Marín V.I., Bond M., Gouverneur F. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0

[5]Chen L., Chen P., Lin Z. Artificial intelligence in education: A review // IEEE Access. 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988510

[6]Bond M., Bedenlier S., Marín V.I., Händel M. Emergency remote teaching in higher education: mapping the first global online semester // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2021. DOI: https://doi.org/10.1186/s41239-021-00282-x

[7]Ifenthaler D., Schumacher C. Learning analytics and digital transformation of education // Computers in Human Behavior. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106677

[8]Cabero-Almenara J., Palacios-Rodríguez A. Digital competence of higher education teachers: validation of DigCompEdu Check-In questionnaire // Sustainability. 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/su12135458

[9]Abdullaev M. (2025) Adaptivnye sistemy obuchenija na osnove iskusstvennogo intellekta v transformacii sovremennogo obrazovatel'nogo processa [Adaptive learning systems based on artificial intelligence in the transformation of the modern educational process]. E-Conference Platform. №1(16-aprel). 440–444. URL: https://journals.tnmu.uz/conference/article/view/1550

[10]Brusilovsky P., Peylo C. Adaptive and Intelligent Web-based Educational Systems // International Journal of Artificial Intelligence in Education. 2003. Vol. 13. P. 159–172.

[11]Pane J.F., Steiner E.D., Baird M.D., Hamilton L.S. Informing Progress: Insights on Personalized Learning Implementation and Effects. 2017. DOI: https://doi.org/10.7249/RR2042

[12]Khosravi H., Kitto K., Williams J.J. RiPPLE: A Crowdsourced Adaptive Platform for Recommendation of Learning Activities. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.05522

[13]Myroshnichenko O. Micro-credentials for professional development of teachers: experience of open university (UK) // Continuing Professional Education: Theory and Practice. 2024. Vol. 79(2). P. 125–140. DOI: https://doi.org/10.28925/2412-0774.2024.2.10

[14]Scott A., Gath M.E., Gillon G., McNeill B., Ghosh D. Facilitators of Success for Teacher Professional Development in Literacy Teaching Using a Micro-Credential Model of Delivery // Education Sciences. 2024. Vol. 14(6). P. 578. DOI: https://doi.org/10.3390/educsci14060578

[15]Kurmasheva M., Zhorabekova A., Zheldibaeva R., Erekhanova F., Salybekova F. Gotovnost' budushchikh uchitelei inostrannogo yazyka k tsifrovomu adaptivnomu obucheniyu // Journal of Educational Sciences. 2025. T. 84(3). S. 40–51. DOI: https://doi.org/10.26577/JES20258434

ҒТАХР14.35.09

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.027

А.Е. Сағымбаева[1], А.Б. Жамкеева[1*], А.Е. Жаксылыков[2], А.Е. Қожан[1]

[1] Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан
[2] Торайғыров университеті, Павлодар қ., Қазақстан
[*]*e-mail: zhamkeeva.aikenzhe@mail.ru*

СТУДЕНТТЕРДІҢ ПРОГРАММАЛАУ ЕСЕПТЕРІН ШЕШУ КӨРСЕТКІШІН БАҒАЛАУ МОДЕЛІ

Аңдатпа

Қазіргі жоғары оқу орындарында программалауды оқыту барысында студенттердің тек соңғы алынған нәтижесін ғана емес, есепті шешу үдерісінде көрінетін танымдық және алгоритмдік әрекеттерін бағалау өзекті мәселе болып табылады. Зерттеудің мақсаты — студенттердің программалау есептерін шешу көрсеткіштерін педагогикалық тұрғыдан жүйелеп, оларды сандық өлшемдер арқылы бағалауға мүмкіндік беретін бағалау моделін ұсыну. Зерттеудің міндеттері студенттердің есепті шешу барысында көрінетін негізгі көрсеткіштерді анықтау, оларды бағалау критерийлерімен байланыстыру және ұсынылған модельдің тиімділігін эксперименттік тұрғыда тексеру болып табылады. Зерттеу әдіснамасы педагогикалық экспериментке және сандық талдау әдістеріне негізделді. Экспериментке Python программалау тілі бойынша білім алатын 94 студент қатысты. Студенттерге қиындық деңгейі әртүрлі (жеңіл, орта және күрделі) программалау тапсырмалары ұсынылып, олардың шешімдері есепті түсіну, алгоритмдік ойлау, дұрыстық, тиімділік, код сапасы, шеттік жағдайларды өңдеу және шешімді түсіндіру қабілеті сияқты жеті педагогикалық көрсеткіш бойынша бағаланды. Сонымен қатар, бағалау барысында есептің қиындық деңгейін ескеретін қиындық коэффициенті енгізілді. Зерттеу нәтижелері есептің күрделілік деңгейі артқан сайын студенттердің дұрыс шешу көрсеткіштері төмендейтінін және бұл төмендеу негізінен алгоритмнің тиімділігі, шеттік жағдайларды өңдеу және шешімді түсіндіру сияқты жоғары деңгейлі көрсеткіштермен байланысты екенін көрсетті. Ұсынылған бағалау моделі студенттердің программалау есептерін шешу қабілетін кешенді түрде талдауға және дәстүрлі бағалау тәсілдерімен салыстырғанда олардың оқу жетістіктерін тереңірек бағалауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері программалауды оқыту үдерісінде бағалаудың педагогикалық негізделген жаңа тәсілдерін дамытуға үлес қосады.

Түйін сөздер: программалау, есепті шешу көрсеткіші, бағалау, алгоритмдік ойлау, есептің қиындық деңгейі, Блум таксономиясы.

А.Е. Сағымбаева[1], А.Б. Жамкеева[1], А.Е. Жаксылыков[2], А.Е. Қожан[1]
[1] Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан
[2] Университет Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ПРОГРАММИРОВАНИЮ СТУДЕНТАМИ

Аннотация

В современных условиях обучения программированию в высших учебных заведениях актуальной является задача оценки не только конечного результата, но и когнитивных и алгоритмических действий студентов, проявляющихся в процессе решения задач. Целью данного исследования является разработка педагогически обоснованной модели оценки показателей решения задач по программированию студентами. Задачами исследования являются определение ключевых показателей решения задач по программированию, их связь с критериями оценивания и экспериментальная проверка эффективности предложенной модели. Методология исследования основана на педагогическом эксперименте и методах количественного анализа. В эксперименте приняли участие 94 студента, изучающие программирование на языке Python. Студентам были предложены задания, дифференцированные по уровню сложности (низкий, средний и высокий). Решения оценивались по семи педагогическим показателям: понимание условия задачи, алгоритмическое мышление,

корректность, эффективность, качество кода, обработка граничных случаев и способность объяснять решение. При оценивании также учитывался коэффициент сложности задания. Результаты исследования показали, что с увеличением сложности задач снижается показатель их корректного решения, при этом наибольшие трудности у студентов возникают на этапах построения эффективных алгоритмов, обработки граничных случаев и объяснения полученных решений. Предложенная модель оценки позволяет комплексно анализировать процесс решения задач по программированию и выявлять сильные и слабые стороны подготовки студентов. Полученные результаты вносят вклад в развитие педагогически обоснованных подходов к оцениванию результатов обучения программированию и могут быть использованы в практике высшего образования.

Ключевые слова: программирование, показатель решения задачи, оценивание, алгоритмическое мышление, уровень сложности задачи, таксономия Блума.

A.Sagymbaeva[1], A.Zhamkeeva[1], A.Zhaksylykov[2], A.Kozhan[1]
[1] Kazakh National Pedagogical University named after Abai , Almaty, Kazakhstan
[2] Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

ASSESSMENT OF STUDENTS' ABILITY TO SOLVE PROGRAMMING PROBLEMS BASED ON GENAI TECHNOLOGY

Abstract

In contemporary higher education, assessing students' programming performance requires going beyond evaluating final results to considering the cognitive and algorithmic processes involved in problem solving. The aim of this study is to develop a pedagogically grounded assessment model for evaluating students' programming problem-solving performance using measurable indicators. The objectives of the study include identifying key problem-solving indicators in programming, linking them to assessment criteria, and experimentally validating the effectiveness of the proposed model. The research methodology is based on a pedagogical experiment and quantitative data analysis. The experiment involved 94 undergraduate students studying Python programming. Students were assigned programming tasks differentiated by difficulty level (easy, medium, and hard), and their solutions were evaluated using seven pedagogical indicators: problem understanding, algorithmic thinking, correctness, efficiency, code quality, handling of edge cases, and explanation ability. In addition, a difficulty coefficient was introduced to account for task complexity in the final assessment. The results indicate that as task difficulty increases, students' correct solution rates decrease, particularly in higher-level tasks requiring efficient algorithm design, edge-case handling, and solution explanation. The findings demonstrate that the proposed assessment model enables a comprehensive evaluation of students' programming problem-solving performance by capturing both process-oriented and outcome-based aspects. Compared to traditional assessment approaches, the model provides deeper insight into students' strengths and weaknesses and supports more balanced and fair evaluation. The study contributes to the development of pedagogically informed assessment practices in programming education and offers a foundation for further research on adaptive and process-based evaluation models.

Keywords: programming, problem-solving performance evaluation, algorithmic thinking, task difficulty level, Bloom's taxonomy.

Кіріспе

Негізгі ережелер. Зерттеуде студенттердің программалау есептерін шешу нәтижесін ғана емес, есепті шешу үдерісінде көрінетін педагогикалық көрсеткіштерді кешенді бағалауға мүмкіндік беретін бағалау моделі ұсынылды. Модель есепті түсіну, алгоритмдік ойлау, дұрыстық, тиімділік, код сапасы, шеттік жағдайларды өңдеу және шешімді түсіндіру қабілеті сияқты көрсеткіштерге негізделеді және есептің қиындық деңгейін ескереді. Эксперимент нәтижелері есептің қиындығы артқан сайын студенттердің шешу көрсеткіштері төмендейтінін көрсетті. Ұсынылған модель дәстүрлі бағалау тәсілдерімен салыстырғанда студенттердің программалау есептерін шешу қабілетін тереңірек және әділ бағалауға мүмкіндік береді. Бүгінгі күні ЖОО-да программалауды оқыту барысында студенттердің тек программа құру дағдыларын ғана емес, олардың логикалық ойлауын, талдау қабілетін және күрделі есептерді жүйелі түрде шешу дағдыларын қалыптастыру маңызды болып табылады. Жалпы программалау курстары бойынша есептерді шешу үдерісі студенттердің берілген

есептің шартын түсінуден бастап, алгоритм құруы, есепті шешудің тиімді әдісін таңдауы және шығарған есебінің нәтижесін түсіндіре алуы сияқты бірқатар танымдық әрекеттерді қамтуы қажет. Бұл танымдық әрекеттер студенттердің ойлау деңгейін көрсете отырып Блум таксономиясында сипатталған деңгейлерге сәйкес болуы шарт [1]. Программалау есептерін шешу барысында студент есептің шартын талдайды, оны бөліктерге бөліп жіктейді, есептің маңызды элементтерін бөліп анықтап, алгоритм құрады. Студенттердің осындай әрекеттері Computational Thinking тұжырымдамасында сипатталған декомпозиция, абстракция және алгоритмді құру әрекеттермен тікелей байланысты болады [2].

Халықаралық тәжірибеде программалау есептерін бағалау тек дұрыс нәтижені тексерумен шектелмей, шешімнің тиімділігін, кодтың сапасын, шеттік жағдайларды өңдеуін және алынған шешімді түсіндіру қабілетін ескеруді талап етеді. Мұндай бағалау критерийлері ACM және IEEE ұсынған білім беру стандарттарында нақты көрсетілген. Аталған ұсынымдар программалау тапсырмаларын бағалауда студенттің тек дұрыс нәтиже алуын ғана емес, алгоритмдік шешімнің тиімділігін, кодтың құрылымдық сапасын, ерекше жағдайларды өңдеуін және шешімді түсіндіру қабілетін ескеру қажеттігін айқындайды [3].

Дегенмен, оқытушылар көп жағдайларда студенттердің жазған программаларының соңғы нәтижесінің дұрыстығын тексеріп, бағалаумен ғана шектеліп жатады. Дәстүрлі бағалау тәсілдері көбінесе соңғы нәтижеге сүйенетіндіктен, студенттің есепті қалай шешкенін толық ашып бере алмайды. Программалауда тек соңғы нәтижені бағалау студенттің есепті шешу барысындағы логикалық ойлауын, алгоритмдік әрекетін, сонымен қатар, олардың шешім қабылдау үдерісін толығымен ашып көрсете алмайды.

Сонымен, студенттердің программалаудан шығарған есептерін бағалауда тек соңғы алған нәтижесін ғана бағаламай, есепті шешу барысында көрінетін олардың ойлау әрекеттерін, алгоритмдік шешім қабылдау және шешімді түсіндіру қабілетін есепке ала отырып бағалау қажеттілігі туындайды. Бұл студенттердің программалау есептерін шешу көрсеткіштерін педагогикалық тұрғыдан жүйелей отырып, оларды сандық өлшемдер арқылы бағалайтын және есептің қиындық деңгейін ескеретіндей бағалау моделін жасауды талап етеді.

Бүгінгі күні GenAI технологиялары студенттердің программалау іс-әрекеттерін талдауды автоматтандыруға мүмкіндік береді және зерттеу барысында GenAI технологиялары көрсеткіштерді сандық анықтауға көмекші құрал ретінде қолданылады.

Зерттеудің мақсаты - студенттердің программалау есептерін шешу көрсеткішін бағалау моделі ұсынып, оның тиімділігін эксперименттік тұрғыда негіздеу.

Зерттеудің міндеттері:

- студенттердің программалаудан есепті шешу көрсеткіштерін теориялық тұрғыдан негіздей отырып, жүйелеу;
- студенттердің программалаудан есепті шешу көрсеткіштерін сандық өлшемдер және есептің қиындық деңгейлерін ескеретін бағалау моделін жасау;
- жасалған модельдің тиімділігін дәстүрлі бағалау нәтижелерімен салыстыра отырып дәлелдеу.

Әдебиеттерге шолу

Программалаудан студенттердің есептерді шығаруын бағалауда олардың танымдық іс-әрекеттерін ескеру қажеттілігі Thompson және т.б., Fuller зерттеулерінде қарастырылған. Авторлар Блум таксономиясының деңгейлерін программалаудан емтиханда берілетін есептерге бейімдеп, программалаудан бірізді қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Зерттеу нәтижелері программалаудан шығарылған есептерді бағалау студенттің тек дұрыс жауап беруін ғана емес, есептің шартын түсіну (Understand), алгоритмді қолдану (Apply), шешімді талдау (Analyze), оны бағалау (Evaluate) және тиімді шешім құрастыру (Create) сияқты танымдық әрекеттерді ескеруді талап ететінін дәлелдейді [4, 5]. Мысалы, есептің шартын түсіну есептің кіріс және шығыс деректерін дұрыс анықтаудан көрінсе, алгоритмді қолдану есепті шешудің қадамдық жоспарын құрумен сипатталады. Шешімді талдау мен бағалау

программаның дұрыстығын тексеру және қателерді анықтау әрекеттерінде байқалады, ал тиімді шешім құрастыру студенттің уақыт пен ресурсты үнемдейтін оңтайлы алгоритм таңдауынан көрінеді.

Computational Thinking тұжырымдамасында программалау есептерін шешу үдерісі есепті бөліктерге жіктеу (decomposition), маңызды элементтерін айқындау (abstraction), ұқсастықтарды анықтау (pattern recognition) және алгоритмдік шешім құру (algorithm design) сияқты қадамдары сипатталады [2]. Бұл қадамдар программалау тапсырмасын орындау барысында студенттің есепті шешу тәсілін сипаттайды. Демек, программалау есебін шешу тек код жазу емес, жүйелі талдауды, логикалық құрылымдауды және алгоритм құру сияқты әрекеттерді қамтитын күрделі үдеріс болып табылады.

Соңғы жылдардағы зерттеулерде программалаудан студенттердің білімін бағалаудың негізгі көрсеткіштерінің бірі ретінде есепті шешу көрсеткіші кеңінен қарастырылады. Бұл көрсеткіш студенттің тек программалау тілінің синтаксисін меңгеруін ғана емес, есепті талдау, шешу жолын жоспарлау, жүзеге асыру және нәтижені тексеру сияқты танымдық қабілеттерін кешенді түрде сипаттайды.

Зерттеулерде программалау есептерін шешу үдерісі есептің шартын түсіну, шешімді жоспарлау, орындау және тексеру кезеңдерінен тұратыны көрсетіліп, бұл әрекеттер оқу жетістігімен тікелей байланысты екені дәлелденеді (Oka & Ohnishi) [6]. Сонымен қатар, есепті шешу қабілеті алгоритмдік ойлау, логикалық жоспарлау және шешімді тексеру әрекеттерінің жиынтығы ретінде сипатталып, студенттердің жалпы программалау жетістігін болжауда сенімді индикатор екені айқындалады (Kožuh et al.) [7].

Есепті шешу дағдыларын құрылымдық компоненттер мен нақты өлшенетін индикаторлар жүйесі ретінде қарастыруға болатыны да зерттеулерде көрсетіледі (Lertyosbordin et al.). Бұл жұмыстар problem solving үдерісін педагогикалық бағалауға жарамды индикаторлар жүйесі ретінде қарастыруға негіз болады [8].

Соңғы зерттеулерде GenAI құралдарын қолдану жағдайында да есепті шешу үдерісі талданады. Студенттердің кодты қабылдау, өзгерту және қайта жазу әрекеттері есепті шешу индикаторлары ретінде қарастырылатыны көрсетілсе (Tan et al.) [9], басқа зерттеулерде өнімділік артқанымен, логикалық түсіну әрдайым жоғары бола бермейтіні айтылады (Shihab et al.) [10]. Бұл нәтижелер есепті шешу көрсеткішін бағалауда тек нәтиже мен уақыт емес, логикалық түсіну деңгейін де ескеру қажеттігін дәлелдейді.

Сонымен қатар, программалау тапсырмаларын бағалау критерийлері халықаралық білім беру стандарттарында нақты көрініс тапқан. ACM және IEEE ұсынымдарында программалау тапсырмаларын бағалау тек нәтиженің дұрыстығымен шектелмей, алгоритмнің тиімділігі, кодтың құрылымдық сапасы, ерекше жағдайларды өңдеу қабілеті және шешімді түсіндіру сияқты аспектілерді қамтуы тиіс екендігі атап көрсетіледі.

Қазақстандық зерттеулерде программалаудан студенттердің білімін бағалау критерийлері мен дескрипторларын жүйелеу мәселесі де қарастырылады. Сағымбаева және т.б. (2025) еңбегінде программалау тапсырмаларын бағалауда есептің соңғы нәтижесімен қатар алгоритмдік шешімнің құрылымы, орындалу логикасы және шешімді түсіндіру сияқты сапалық аспектілерді ескеретін критерийлер мен дескрипторлар ұсынылады [11].

Жоғарыда қарастырылған теориялық және эмпирикалық зерттеулер программалау есебін шешу студенттің танымдық және алгоритмдік әрекеттерінің жиынтығы екенін көрсетеді. Блум таксономиясы бұл әрекеттердің когнитивтік сипатын айқындаса, Computational Thinking тұжырымдамасы олардың есепті шешу барысында қалай жүзеге асатынын сипаттайды. Сонымен қатар, problem solving бағытындағы зерттеулер бұл әрекеттерді өлшенетін көрсеткіштер ретінде қарастыруға болатынын дәлелдейді. Осы тұжырымдарды негізге ала отырып, студенттердің программалау есептерін шешу көрсеткіштерінің жүйесін былай анықтауға болады: есепті түсіну (U), алгоритмдік ойлау (Alg), дұрыстық (C), тиімділік (Ef), код сапасы (Q), шеттік жағдайларды (Ed) және шешімді түсіндіру қабілеті (Ex) (1-кесте).

Кесте 1. Есепті шешу көрсеткіштерін бағалау критерийлері

Көрсеткіштер	*Сипаттамасы*
Есепті түсіну (U)	*Шартты дұрыс талдау*
Алгоритмдік ойлау (Alg),	*Шешу әдісін дұрыс таңдау*
Дұрыстық (C)	*Есеп дұрыс шешілуі*
Тиімділік (Ef)	*Уақыт/жадты үнемді қолдану*
Код сапасы (Q)	*Кодтың оқылымдылығы, құрылымы*
Шеттік жағдайлар (Ed)	*Шеттік/ерекше жағдайларда да дұрыс жұмыс істеуі*
Түсіндіру қабілеті (Ex)	*Өз шешімін дәлелдей алу*

Сонымен, студенттердің программалаудан есепті шешу көрсеткіштерін дұрыс, тиімді және саналы түрде орындау деңгейін сипаттайтын өлшенетін критерийлер жиынтығы деп түсінеміз.

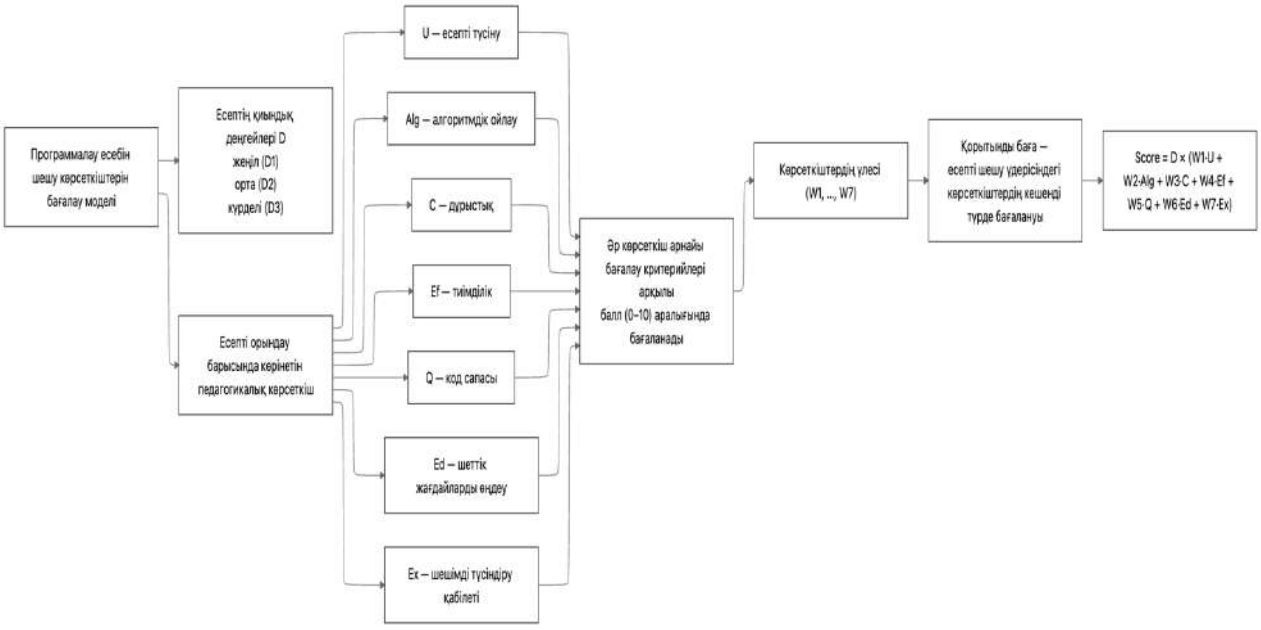
Зерттеу әдіснамасы

Экспериментке Абай атындағы ҚазҰПУ-нің «Информатика» оқу бағдарламасының студенттері, барлығы 94 студент қатысты. Студенттерге «Python программалау тілінен» қиындық деңгейі бойынша сараланған программалау тапсырмасы жеңіл (D1), орта (D2) және қиын (D3) берілді. Тапсырмалар бірдей уақыт аралығында, бірдей техникалық ортада орындалды. Эксперимент барысында әр студенттің есепті шешу әрекетін сипаттайтын келесі деректер: тапсырманы орындауға жұмсалған уақыт, қате саны, түзету әрекеттері, соңғы код нұсқасы, кодтың құрылымдық сапасы, шеттік жағдайларды өңдеуі және шешімді түсіндіруі тіркеліп отырды. Жиналған ақпараттар негізінде студенттердің есептерді шешу көрсеткіштері сандық өлшемдерге түрлендіріліп, ұсынылған студенттердің есепті шығару көрсеткіштерінің моделі бойынша қорытынды балл есептелді. Оқытушының рубрика негізіндегі дәстүрлі бағасы модельдің нәтижелерімен салыстырылды. Жоғарыда қарастырылған теориялық және эмпирикалық зерттеулерді негізге ала отырып, студенттердің программалау есептерін шешу көрсеткішін бағалау моделі жасалды. Бұл модель студенттің тек соңғы нәтижесін емес, есепті шешу үдерісіндегі танымдық және алгоритмдік әрекеттерін сандық көрсеткіштер арқылы бағалауға мүмкіндік береді. Студенттердің программалаудан есепті шешу көрсеткіштерді педагогикалық бағалау құралы ретінде қолдану үшін оларды біртұтас бағалау моделіне біріктіру қажеттілігі туындады. Осы зерттеуде студенттердің программалау есептерін шешу барысында көрінетін көрсеткіштер сандық өлшемдерге түрлендіріліп, бағалау моделіне енгізілді (1-сурет). Бағалау моделі студенттің есепті орындау барысында көрінетін жеті педагогикалық көрсеткішке негізделеді: есепті түсіну (U), алгоритмдік ойлау (Alg), дұрыстық (C), тиімділік (Ef), код сапасы (Q), шеттік жағдайларды өңдеу (Ed) және шешімді түсіндіру қабілеті (Ex). 2-кестеде берілген әр көрсеткіштің дескрипторлары және арнайы бағалау критерийлері арқылы 0–10 аралығында бағаланады.

Кесте 2. Студенттердің есептерді шешу көрсеткіштері бойынша дескрипторлар

Көрсеткіштер	*Дескрипторлар*
Есепті түсіну (U)	*Есеп шартын толық және дұрыс түсіну; Кіріс және шығыс деректерін дұрыс анықтау; Шектеулер мен талаптарды ескеру; Негізгі мәселені нақты айқындау*
Алгоритмдік ойлау (Alg)	*Шешу әдісін дұрыс таңдау; Логикалық реттілікті сақтау; Қадамдардың жүйелілігі мен толықтығы; Тиімді стратегия қолдану*
Дұрыстық (C)	*Дұрыс нәтиже шығару; Есептеулердің дәлдігі; Барлық жағдайларда дұрыс жұмыс істеу*

Тиімділік (Ef)	*Уақыттық күрделіліктің тиімділігі; Жадыны тиімді пайдалану; Артық операциялардың болмауы*
Код сапасы (Q)	*Кодтың оқылымдылығы; Айнымалылардың мағыналы аталуы; Құрылымының реттелгендігі; Түсініктемелердің орынды қолданылуы*
Шеттік жағдайларды өңдеу (Ed)	*Шеттік мәндерді ескеру; Ерекше жағдайларда тұрақты жұмыс істеу; Қате енгізулерді өңдеу*
Шешімді түсіндіру қабілеті (Ex)	*Шешімді нақты және жүйелі түсіндіру; Қадамдарды негіздей алу; Терминдерді дұрыс қолдану; Сұрақтарға дәл жауап беру*



Сурет 1. Программалау есептерін шешу көрсеткіштерін бағалау моделі

Сонымен қатар, бағалау барысында есептің қиындық деңгейі ескеріліп, жеңіл (D1), орта (D2) және күрделі (D3) тапсырмалар үшін қиындық коэффициенті енгізілді. Бұл коэффициент студенттің күрделі есептерді шешу қабілетін бағалауда маңызды рөл атқарады.

Көрсеткіштер бойынша алынған баллдар салмақтық коэффициенттер арқылы біріктіріліп, студенттің программалау есебін шешу көрсеткішінің қорытынды бағасы келесі формула бойынша есептеледі (1):

$$Score=D\times(W_1U+W_2Alg+W_3C+W_4Ef+W_5Q+W_6Ed+W_7Ex) \quad (1)$$

мұндағы, U,Alg,C,Ef,Q,Ed,Ex – көрсеткіш балдары; $W_1 \ldots W_7$ – көрсеткіштердің үлесі

Осылайша, ұсынылған модель студенттің тек соңғы нәтижесін емес, есепті шешу үдерісіндегі әрекеттерін кешенді түрде бағалауға мүмкіндік береді. Студенттердің есепті шығару көрсеткіштерінің моделінің тиімділігі дәстүрлі бағалаумен сәйкестігі, есептің қиындық деңгейлері бойынша тұрақтылығы және көрсеткіштердің бағалауға әсері тұрғысынан талданды.

Зерттеу нәтижелері

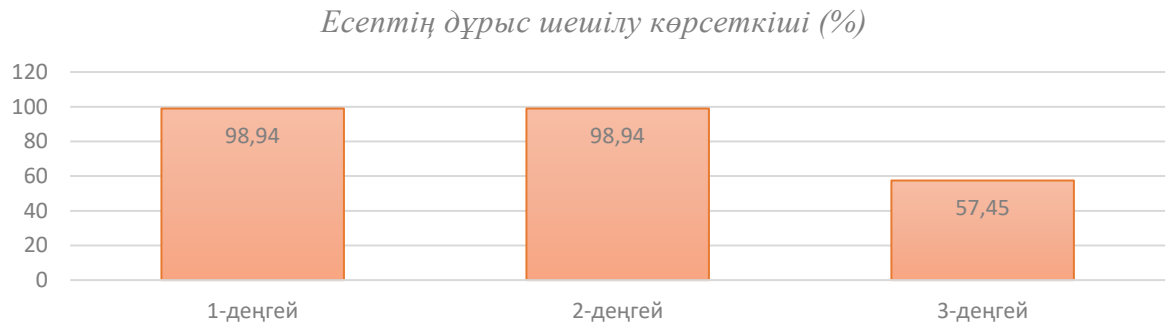
Зерттеуге Python программалау тілі бойынша білім алатын 94 студент қатысты. Эксперимент барысында барлық студенттерге бірдей 6 программалау есебі ұсынылды. Есептер қиындық деңгейіне қарай үш топқа бөлінді: бастапқы деңгей (D1) (2 есеп), орташа деңгей (D2) (2 есеп) және күрделі деңгей (D3) (2 есеп). Студенттердің шешімдері алдын ала дайындалған эталон алгоритмдер негізінде логикалық тұрғыда тексерілді. (3-кесте).

Кесте 3. Деңгейлік есептердің орындалу нәтижелері

Деңгей	*Есеп саны*	*Дұрыс шешілген есептер саны*	*Дұрыс шешу көрсеткіші (%)*
1-деңгей (D1)	*2*	*186 / 188*	*98,94*
2-деңгей (D2)	*2*	*186 / 188*	*98,94*
3-деңгей (D3)	*2*	*108 / 188*	*57,45*
Барлығы	*6*	*480 / 564*	*85,11*

Зерттеу аясында берілген есептердің жалпы саны N=94×6=564. Логикалық тексеру нәтижесінде дұрыс шешілген есептер саны D=480. Осыған сәйкес, есептердің жалпы дұрыс шешілу көрсеткіші K=85,11% болды.

2-суретте есептердің қиындық деңгейіне байланысты студенттердің дұрыс шешу көрсеткіштерінің өзгерісі көрсетілген. Диаграмма нәтижелері бірінші және екінші деңгейдегі есептер бойынша дұрыс шешілу көрсеткіштерінің жоғары екенін, ал үшінші деңгейдегі есептерде бұл көрсеткіштің айтарлықтай төмендейтінін көрсетеді. Бұл айырмашылық есептің күрделілігі артқан сайын студенттердің алгоритмдік ойлау және тиімді шешім құру дағдыларына қойылатын талаптың күшейетінін дәлелдейді. Сонымен қатар, үшінші деңгейдегі есептерде шеттік жағдайларды өңдеу және оңтайлы алгоритм таңдау сияқты әрекеттерде қиындықтар туындайтыны байқалады. Алынған нәтижелер есептің қиындық деңгейін бағалау барысында ескерудің маңыздылығын көрсетеді.



Сурет 2. Программалау есептерінің қиындық деңгейі бойынша дұрыс шешілу көрсеткіштері

Бұл нәтиже студенттердің Python программалау тілінде есептерді шешу дағдыларының жалпы деңгейі жеткілікті қалыптасқанын көрсетеді.

Деңгейлер бойынша нәтижелер

Әр есеп бойынша жүргізілген талдау нәтижелері есептің қиындық деңгейі артқан сайын дұрыс шешілу көрсеткішінің төмендейтінін көрсетті (4-кесте).

Кесте 4. Жеке есептер бойынша дұрыс шешілу нәтижелері

№	*Берілген есептердің шарттары*	*Деңгей*	*Дұрыс орындаған студенттер саны*	*%*
1	*Екі бүтін сан a және b берілген, мұнда b≠0. a санының b санына қалдықсыз бөлінетінін тексеріңіз.*	*D1*	*92*	*97,87*
2	*Координаталық жазықтықта* $A(x_1; y_1)$ *және* $B(x_2; y_2)$ *нүктелері берілген. Осы нүктелер арасындағы қашықтық шеңбердің*	*D1*	*94*	*100*

	радиусы десек, радиус арқылы анықталатын шеңбердің ауданын табыңыз.			
3	*n натурал саны берілген (n>1). Берілген санның жай сан немесе құрама сан екенін анықтау қажет.*	*D2*	*93*	*98,94*
4	*Екі бүтін сан a және b берілген. Осы сандардың ең үлкен ортақ бөлгішін анықтаңыз.*	*D2*	*93*	*98,94*
5	*n элементтен тұратын A массиві, l және r индекстері берілген (1≤l≤r≤n). (l,r) аралығындағы қосындыны табыңыз.*	*D3*	*58*	*61,70*
6	*n натурал саны берілген. 1-ден n-ге дейінгі барлық натурал сандардың қосындысын табыңыз.*	*D3*	*50*	*53,19*

Кестеде көрсетілген нәтижелер есептердің қиындық деңгейіне байланысты студенттердің дұрыс шешу көрсеткіштерінің өзгеретінін көрсетеді. Бірінші және екінші деңгейдегі есептерде дұрыс шешілу көрсеткіштері жоғары болғанымен, үшінші деңгейдегі есептерде бұл көрсеткіштің айтарлықтай төмендегені байқалады. Бұл айырмашылық әсіресе алгоритмдік тиімділікті және есепті шешудің оңтайлы тәсілдерін талап ететін тапсырмаларда анық көрінеді.

Аталған нәтижелер студенттердің есептің шартын түсіну мен дұрыс нәтиже алуға бағытталған әрекеттері жеткілікті деңгейде қалыптасқанын, алайда күрделі есептерде алгоритмдік ойлау, тиімділік және шеттік жағдайларды өңдеу сияқты жоғары деңгейлі көрсеткіштерде қиындықтар туындайтынын көрсетеді.

Алайда алынған нәтижелерді тек дұрыс немесе бұрыс шешім көрсеткіші арқылы талдау студенттердің есепті шешу үдерісіндегі нақты қиындықтарын толық ашып көрсете алмайды. Мысалы, кейбір студенттер есептің шартын дұрыс түсініп, жұмыс істейтін шешім ұсынғанымен, алгоритмнің тиімділігі, кодтың құрылымдық сапасы немесе шеттік жағдайларды өңдеу сияқты аспектілерде кемшіліктерге жол берген. Осыған байланысты келесі кезеңде есептердің орындалу нәтижелері есепті шешу көрсеткіштерімен байланыстыра отырып талданды. Бұл талдау нәтижесінде байқалған қиындықтар мен жетістіктер 5-кестеде ұсынылған есепті шешу көрсеткіштері тұрғысынан жүйеленді.

Кесте 5. Есепті шешу көрсеткіштеріне байланысты интерпретация

Байқалған нәтиже	*Есепті шығару көрсеткішіне байланысты*
D1, D2-де жоғары нәтиже	*U, C*
D3-де нәтиженің төмендеуі	*Alg, Ef*
Тиімді әдіс талап ететін есептерде қиындық	*Ef*
Күрделі есептерде қате көп	*Ed*
Шешімді түсіндіруде айырмашылық бар	*Ex*

5-кестеде келтірілген интерпретация нәтижелері деңгейлік есептер бойынша алынған көрсеткіштердің есепті шешу үдерісіндегі нақты қиындықтармен байланысты екенін көрсетеді. Атап айтқанда, бірінші және екінші деңгейдегі есептерде жоғары нәтижелер есепті түсіну (U) мен дұрыстық (C) көрсеткіштерінің жақсы қалыптасқанын айқындаса, үшінші деңгейдегі есептерде нәтижелердің төмендеуі алгоритмдік ойлау (Alg), тиімділік (Ef) және шеттік жағдайларды өңдеу (Ed) көрсеткіштерімен тығыз байланысты екені байқалады. Бұл

студенттердің қарапайым есептерді дұрыс орындағанымен, күрделі және оңтайлы шешімді талап ететін тапсырмаларда қиындықтарға тап болатынын көрсетеді.

Ұсынылған бағалау моделінің қолданылуын көрсету мақсатында студенттердің программалау есептерін шешу көрсеткіштері бойынша алынған эмпирикалық деректер негізінде қорытынды бағалар есептелді. Әр студенттің есепті орындау нәтижелері есепті түсіну (U), алгоритмдік ойлау (Alg), дұрыстық (C), тиімділік (Ef), код сапасы (Q), шеттік жағдайларды өңдеу (Ed) және шешімді түсіндіру қабілеті (Ex) көрсеткіштері бойынша 0–10 аралығында бағаланды. Әр көрсеткіш үшін 94 студенттің баллдары бойынша орташа мәндер есептелді. Алынған орташа мәндер бағалау моделінің формуласына енгізіліп, студенттердің программалау есебін шешу көрсеткішінің қорытынды бағасы анықталды. Қиындық деңгейіне байланысты бағалау барысында есептердің қиындық коэффициенті ескерілді: бірінші деңгей үшін D1 = 1.0, екінші деңгей үшін D2 = 1.2 және үшінші деңгей үшін D3 = 1.5 деп қабылданды.

Осылайша, қорытынды бағалар студенттердің жеке есепті орындау нәтижелеріне ғана емес, есептің қиындық деңгейіне және есепті шешу барысында көрінетін педагогикалық көрсеткіштердің жиынтығына негізделіп есептелді. Бұл тәсіл студенттердің программалау есептерін шешу қабілетін кешенді түрде бағалауға және әртүрлі деңгейдегі тапсырмаларды орындау нәтижелерін өзара салыстыруға мүмкіндік береді.

Дискуссия

Бұл зерттеуде алынған нәтижелер студенттердің программалау есептерін шешу қабілеті есептің қиындық деңгейіне және есепті шешу барысында орындалатын әрекеттердің сипатына тікелей байланысты екенін көрсетті. Деңгейлік тапсырмалар бойынша жүргізілген талдау бірінші және екінші деңгейдегі есептерде дұрыс шешілу көрсеткіштерінің жоғары екенін, ал үшінші деңгейдегі есептерде бұл көрсеткіштің айтарлықтай төмендейтінін анықтады. Бұл жағдай программалауда қарапайым синтаксистік және тікелей алгоритмдерді қолдану жеткіліксіз болып, күрделі есептерде алгоритмдік ойлау мен тиімді шешім құрудың маңызы артатынын көрсетеді. Нәтижелерді есепті шешу көрсеткіштері тұрғысынан талдау студенттердің есептің шартын түсіну (U) мен дұрыс нәтиже алуға (C) бағытталған әрекеттері жеткілікті деңгейде қалыптасқанын көрсетті. Алайда алгоритмнің тиімділігі (Ef), шеттік жағдайларды өңдеу (Ed) және шешімді түсіндіру қабілеті (Ex) көрсеткіштері бойынша нәтижелердің төмен болуы студенттердің есепті терең талдау және оңтайлы шешім құру кезеңдерінде қиындықтарға тап болатынын айқындайды. Бұл байқаулар алдыңғы зерттеулерде көрсетілген программалауды оқытудағы негізгі мәселелермен сәйкес келеді және есепті шешу үдерісін кешенді бағалаудың маңыздылығын растайды. Ұсынылған бағалау моделінің артықшылығы - студенттің программалау есебін шешу нәтижесін ғана емес, есепті шешу барысында көрінетін әрекеттерін сандық түрде сипаттауға мүмкіндік беруінде. Дәстүрлі бағалау тәсілдерінде көбіне соңғы нәтиже немесе тесттерден өту пайызы ғана ескерілсе, бұл модель есепті түсіну, алгоритмдік ойлау, тиімділік және код сапасы сияқты бірнеше көрсеткіштерді бір уақытта бағалауға жағдай жасайды. Нәтижесінде студенттердің күшті және әлсіз тұстарын нақты анықтауға мүмкіндік туады.

Сонымен қатар, есептің қиындық коэффициентін енгізу қиындығы жоғары тапсырмаларды орындаған студенттердің еңбегін әділ бағалауға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл әртүрлі деңгейдегі тапсырмаларды орындау нәтижелерін өзара салыстыруда бағалаудың теңгерімді болуын қамтамасыз етеді. Алынған нәтижелер ұсынылған модельді программалаудан оқыту үдерісінде ағымдық және қорытынды бағалау құралы ретінде қолданудың әлеуеті жоғары екенін көрсетеді.

Қорытынды

Бұл зерттеуде студенттердің программалау есептерін шешу көрсеткіштерін кешенді түрде бағалауға арналған модель ұсынылды. Ұсынылған модель есептің қиындық деңгейін ескере отырып, студенттің есепті түсінуі, алгоритмдік ойлауы, дұрыстығы, тиімділігі, код сапасы,

шеттік жағдайларды өңдеуі және шешімді түсіндіру қабілеті сияқты педагогикалық көрсеткіштерді сандық өлшемдер арқылы бағалауға мүмкіндік береді.

Эксперимент нәтижелері есептің қиындық деңгейі артқан сайын студенттердің есепті дұрыс шешу көрсеткіштері төмендейтінін және бұл төмендеудің негізінен алгоритмдік тиімділік, шеттік жағдайларды өңдеу және шешімді түсіндіру сияқты жоғары деңгейлі көрсеткіштермен байланысты екенін көрсетті. Бұл жағдай программалауды оқыту барысында тек соңғы нәтиженің дұрыстығын ғана емес, есепті шешу үдерісіндегі әрекеттерді де бағалаудың маңыздылығын дәлелдейді. Ұсынылған бағалау моделі дәстүрлі бағалау тәсілдерімен салыстырғанда студенттердің программалау есептерін шешу қабілетін тереңірек талдауға және олардың күшті әрі әлсіз тұстарын нақты анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері бұл модельді жоғары оқу орындарында программалауды оқыту үдерісінде ағымдық және қорытынды бағалау құралы ретінде қолдануға болатынын көрсетеді. Алдағы зерттеулерде модельді әртүрлі программалау тілдерінде және оқу контекстерінде апробациялау, сондай-ақ бағалау үдерісін автоматтандыру мүмкіндіктерін қарастыру жоспарлануда.

Алғыс

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен орындалды (грант № AP23490592).

Пайдаланылған дереккөздердің тізімі

[1] Bloom, B. S. (Ed.). Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain. *New York, NY: David McKay Company. 1956.-*

[2] Wing, J.M. Computational thinking. Communications of the ACM, 49*(3), 33–35.* *https://doi.org/10.1145/1118178.1118215*

[3] ACM/IEEE. Computer Science Curricula 2013: Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science. ACM Press and IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1145/2534860

[4] Thompson, E., Luxton-Reilly, A., Whalley, J., Hu, M., & Robbins, P. Bloom's taxonomy for CS assessment. Proceedings of the 10th Australasian Computing Education Conference (ACE)*, 2008. – 155–161.*

[5] Fuller, U., Johnson, C., Ahoniemi, T., Cukierman, D., Hernán-Losada, I., Jackova, J., & Thompson, E. (2007). Developing a computer science-specific learning taxonomy. ACM SIGCSE Bulletin, 39*(4), 152–170. https://doi.org/10.1145/1345375.1345438*

[6] Oka H., Ohnishi A., Nishida T., Terada T., Tsukamoto M. A Choice-Based Programming Learning Method to Develop Problem-Solving Skills // IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 119550–119564. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3443879*

[7] Kožuh I., Krajnc R., Hadjileontiadis L. J., Debevc M. Assessment of problem-solving ability in novice programmers // PLOS ONE. – 2018. – Vol. 13, No. 9. – e0201919. DOI: 10.1371/journal.pone.0201919

[8] Lertyosbordin C., Maneewan S., Srikaew D. Components and Indicators of Problem-Solving Skills in Robot Programming Activities // International Journal of Advanced Computer Science and *Applications. – 2021. – Vol. 12, No. 9. – P. 132–140. DOI: 10.14569/IJACSA.2021.0120917*

[9] Tan X., Long X., Ni X., Zhu Y., Jiang J., Zhang L. How far are AI-powered programming assistants from meeting developers' needs? // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2404.12000v1. – 12 p. DOI: 10.48550/ARXIV.2404.12000

[10] Shihab M. I. H., Hundhausen C. D., Tariq A., Haque S., Qiao Y., Mulanda B. W. The effects of GitHub Copilot on computing students' programming effectiveness, efficiency, and processes in brownfield coding tasks // Proceedings of the 2025 ACM Conference on International Computing Education Research (ICER 2025). – Charlottesville, USA, 2025. – P. 407–420.

[11] Сағымбаева А.Е., Жамкеева А.Б., Жаксылыков А.Е., Кемелбек М.Н. Программалаудан студенттердің білімін бағалау критерийлері мен дескрипторларын жасау мәселелері. Х. Досмұхамедов атындағы Атырау университетінің Хабаршысы. 2025; 77(2):131 140.

References

[1] Bloom B. S. (Ed.) (1956) Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain. – New York, NY: David McKay Company. (In English)

[2] Wing J. M. (2006) Computational thinking // Communications of the ACM. Vol. 49, No. 3. – P. 33–35. https://doi.org/10.1145/1118178.1118215 (In English)

[3] ACM/IEEE (2013) Computer Science Curricula 2013: Curriculum Guidelines for Undergraduate Degree Programs in Computer Science. – ACM Press and IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1145/2534860 (In English)

[4] Thompson E., Luxton-Reilly A., Whalley J., Hu M., Robbins P. (2008) Bloom's taxonomy for CS assessment // Proceedings of the 10th Australasian Computing Education Conference (ACE). – P. 155–161. (In English)

[5] Fuller U., Johnson C., Ahoniemi T., Cukierman D., Hernán-Losada I., Jackova J., Thompson E. (2007) Developing a computer science-specific learning taxonomy // ACM SIGCSE Bulletin. Vol. 39, No. 4. – P. 152–170. https://doi.org/10.1145/1345375.1345438 (In English)

*[6] Oka H., Ohnishi A., Nishida T., Terada T., Tsukamoto M. (2024) A choice-based programming learning method to develop problem-solving skills // IEEE Access. Vol. 12. – P. 119550–119564. **DOI:** 10.1109/ACCESS.2024.3443879 (In English)*

[7] Kožuh I., Krajnc R., Hadjileontiadis L. J., Debevc M. (2018) Assessment of problem-solving ability in novice programmers // PLOS ONE. Vol. 13, No. 9. – e0201919. DOI: 10.1371/journal.pone.0201919 (In English)

[8] Lertyosbordin C., Maneewan S., Srikaew D. (2021) Components and indicators of problem-solving skills in robot programming activities // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. Vol. 12, No. 9. – P. 132–140. DOI: 10.14569/IJACSA.2021.0120917 (In English)

[9] Tan X., Long X., Ni X., Zhu Y., Jiang J., Zhang L. (2024) How far are AI-powered programming assistants from meeting developers' needs? // arXiv preprint. – arXiv:2404.12000v1. – 12 p. DOI: 10.48550/ARXIV.2404.12000 (In English)

[10] Shihab M. I. H., Hundhausen C. D., Tariq A., Haque S., Qiao Y., Mulanda B. W. (2025) The effects of GitHub Copilot on computing students' programming effectiveness, efficiency, and processes in brownfield coding tasks // Proceedings of the 2025 ACM Conference on International Computing Education Research (ICER 2025). – Charlottesville, USA, 2025. – P. 407–420. (In English)

[11] Sagimbayeva A. E., Zhamkeyeva A. B., Zhaksylykov A. E., Kemelbek M. N. (2025) Programmalaudan studentterdiң bilimin baғalau kriterijleri men deskriptorlaryn zhasau məseleleri [Issues of developing assessment criteria and descriptors for evaluating students' knowledge in programming]. Bulletin of Kh. Dosmukhamedov Atyrau University. No. *77(2). – P. 131–140. (In Kazakh)*

МРНТИ 14.35.07

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.028

А.М. Сугуралиева[1], А.К. Тогайбаева[1], Д.Ж. Рамазанова[1*], А.А. Сагиева[1], А.М. Абляшева[1]

[1]Актюбинский университет имени К.Жубанова, г.Актобе, Казахстан

ЭМОЦИОНАЛЬНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК МЕДИАТОРЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ПРИНИМАЕМЫХ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

Аннотация

Статья рассматривает эмоциональный интеллект (ЭИ) как педагогический медиатор эффективности ИИ-поддержанных практик формирующего оценивания в вузе. В выборке из 64 студентов очной формы (один университет) в течение семестра (T0–T2) сопоставлялись: индекс интенсивности/качества ИИ-практик (персонализация, ранние предупреждения, адаптивный фидбэк, аналитические панели), показатели ЭИ (общий латентный фактор и подшкалы: саморегуляция, регуляция эмоций, эмпатия, социальная осознанность) и образовательные исходы (рубричная успеваемость, наблюдаемая вовлечённость, удовлетворённость/климат курса). Психометрическая проверка включала CFA и тесты инвариантности; эффекты оценивались в SEM/PROCESS с бутстрэп-интервалами (5–10 тыс. прогонов) и кластерно-устойчивыми ошибками по преподавателю/группе. Зафиксирована частичная медиация: косвенный путь через ЭИ статистически значим при сохранении положительного прямого эффекта ИИ. Доля опосредования максимальна для вовлечённости (~53%) и удовлетворённости (~50%), умеренна для успеваемости (~36%). В компонентном анализе наибольший вклад в косвенный эффект вносит саморегуляция, далее следуют регуляция эмоций и эмпатия; вклад социальной осознанности меньший и нестабильный. Практический вывод: эффективность ИИ-решений повышается при их интеграции с программами развития ЭИ и feedback literacy (микромодули саморегуляции и работы с обратной связью для студентов; поддерживающая цифровая коммуникация у преподавателей), а также при включении в аналитические панели метрик присвоения фидбэка. Ограничения – один вуз и гендерно однородная выборка – задают направление для межвузовых панелей, продольных RCT и расширения набора объективных поведенческих данных, с контролем ковариат и проверкой устойчивости результатов к спецификациям моделей.

Ключевые слова: эмоциональный интеллект, учебная аналитика, ИИ-поддержанное обучение, формирующее оценивание, вовлеченность; удовлетворённость, высшее образование.

А.М. Сугуралиева[1], А.К. Тогайбаева[1], Д.Ж. Рамазанова[1], А.А. Сагиева[1], А.М. Абляшева[1]

[1]Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан

ЭМОЦИОНАЛДЫҚ ИНТЕЛЛЕКТ ЖОҒАРЫ БІЛІМ БЕРУДЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ҚОЛДАУЫМЕН ҚАБЫЛДАНАТЫН ПЕДАГОГИКАЛЫҚ ШЕШІМДЕРДІҢ ТИІМДІЛІГІНІҢ МЕДИАТОРЫ РЕТІНДЕ

Аңдатпа

Бұл мақалада университетте жасанды интеллект қолдауымен қалыптастырылатын бағалау тәжірибелерінің тиімділігінің педагогикалық медиаторы ретінде эмоционалды интеллект (ЭИ) қарастырылады. 64 күндізгі бөлімдегі қыз студенттердің (бір университет) үлгісінде семестр бойы (T0–T2) келесі көрсеткіштер салыстырылды: ЖИ тәжірибелерінің қарқындылығы/сапа индексі (дербестендіру, ерте ескертулер, бейімделгіш кері байланыс, аналитикалық бақылау тақталары), ЭИ көрсеткіштері (жалпы жасырын фактор және кіші шкалалар: өзін-өзі реттеу, эмоцияны реттеу, эмпатия, әлеуметтік хабардарлық) және білім беру нәтижелері (рубрикалық өнімділік, байқалған қатысу, қанағаттанушылық/курс ахуалы). Психометриялық тестілеуге CFA және инвариантты тесттер кірді; әсерлер SEM/PROCESS бағдарламасында жүктелген аралықпен (5000–10000 жүгіру) және оқытушы/топ бойынша кластерлік-тұрақты қателіктермен бағаланды. Ішінара медиация байқалды: ЭИ

арқылы жанама жол статистикалық тұрғыдан маңызды болды, ал ЖИ-дің оң тікелей әсері сақталды. Медиация деңгейі қатысу (~53%) және қанағаттану (~50%) үшін ең жоғары, ал академиялық көрсеткіштер үшін орташа (~36%) болды. Компоненттік талдауда жанама әсерге өзін-өзі реттеу ең үлкен үлес қосты, одан кейін эмоцияны реттеу және эмпатия келді; әлеуметтік сананың үлесі аз және тұрақсыз болды. Практикалық қорытынды: жасанды интеллект шешімдерінің тиімділігі ЭИ және кері байланыс сауаттылығын дамыту бағдарламаларымен (оқушыларға арналған өзін-өзі реттеу және кері байланыс микромодульдері; мұғалімдерге арналған қолдаушы цифрлық коммуникация) біріктірілген кезде, сондай-ақ кері байланыс атрибуциясының метрикалары аналитикалық бақылау тақталарына енгізілген кезде артады. Бір мекеме мен гендерлік біртекті үлгінің шектеулері мекемелераралық панельдерге, бойлық RCT-лерге және объективті мінез-құлық деректер жиынтығын кеңейтуге бағыт береді, ковариаттарды бақылау және модель сипаттамалары бойынша нәтижелердің сенімділігін тексеру мүмкіндігі бар.

Түйін сөздер: эмоционалды интеллект, оқу аналитикасы, жасанды интеллект көмегімен оқыту, қалыптастырушы бағалау, қатысу; қанағаттанушылық, жоғары білім.

A.M. Suguralieva[1], A.K. Togaibaeva[1], D.Zh. Ramazanova[1], A.A. Sagieva[1], A.M. Ablyasheva[1]
[1]Aktobe University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan

EMOTIONAL INTELLIGENCE AS A MEDIATOR OF THE EFFECTIVENESS OF AI-SUPPORTED PEDAGOGICAL DECISIONS IN HIGHER EDUCATION

Annotation

This article examines emotional intelligence (EI) as a pedagogical mediator of the effectiveness of AI-supported formative assessment practices at a university. In a sample of 64 full-time female students (one university), the following were compared over the course of a semester (T0–T2): the intensity/quality index of AI practices (personalization, early warnings, adaptive feedback, analytical dashboards), EI indicators (general latent factor and subscales: self-regulation, emotion regulation, empathy, social awareness) and educational outcomes (rubric performance, observed engagement, satisfaction/course climate). Psychometric testing included CFA and invariance tests; effects were estimated in SEM/PROCESS with bootstrapped intervals (5,000–10,000 runs) and cluster-robust errors by instructor/group. Partial mediation was observed: the indirect path through EI was statistically significant, while the positive direct effect of AI remained. The mediation rate was highest for engagement (~53%) and satisfaction (~50%), and moderate for academic performance (~36%). In the component analysis, self-regulation made the largest contribution to the indirect effect, followed by emotion regulation and empathy; the contribution of social awareness was smaller and more inconsistent. Practical conclusion: the effectiveness of AI solutions increases when integrated with EI and feedback literacy development programs (self-regulation and feedback micromodules for students; supportive digital communication for teachers), as well as when feedback attribution metrics are included in analytical dashboards. The limitations of a single institution and a gender-homogeneous sample provide direction for cross-institutional panels, longitudinal RCTs, and expansion of objective behavioral data sets, with control for covariates and robustness testing of results across model specifications.

Keywords: emotional intelligence, learning analytics, AI-assisted learning, formative assessment, engagement; satisfaction, higher education.

Введение

Основные положения

В исследовании эмоциональный интеллект представлен как важный педагогический медиатор эффективности ИИ-поддерживаемых практик формирующего оценивания в высшей школе. На основе данных, полученных по выборке из 64 студентов, выявлено, что применение персонализации, ранних предупреждений, адаптивной обратной связи и аналитических панелей положительно связано с академической успеваемостью, вовлечённостью и удовлетворённостью обучением. Результаты SEM- и PROCESS-анализа показали наличие частичной медиации: значительная часть влияния ИИ-практик на образовательные результаты реализуется через эмоциональный интеллект при сохранении положительного прямого эффекта. Наибольший вклад в косвенное воздействие вносит саморегуляция, далее следуют регуляция эмоций и эмпатия. Это подчёркивает значимость сочетания ИИ-решений с

развитием feedback literacy, а также эмоционально-коммуникативных компетенций студентов и преподавателей. Ограничения исследования, связанные с проведением работы в одном вузе и использованием гендерно однородной выборки, указывают на необходимость дальнейших межвузовых и продольных исследований.

За прошедшее десятилетие исследования ИИ в высшей школе прошли путь от пилотных интеллектуальных тьюторов к интегрированным экосистемам персонализации, предиктивной аналитики и автоматизированной обратной связи; при этом единого понимания механизмов педагогической эффективности по-прежнему нет. Систематические обзоры фиксируют преобладание направлений «профилирование и прогнозирование», «адаптивные системы и персонализация» и одновременно подчёркивают усиливающийся акцент на этике и методологической строгости в AIEd [1-2]. В рамках «жизненного цикла» ИИ-поддержанных решений основными точками влияния на обучение выступают своевременные подсказки и ранние сигналы риска, адаптивная обратная связь и аналитические панели для преподавателя [3-4].

Основной переменной, объясняющей различия в эффектах ИИ, выступает способность студентов принимать и использовать обратную связь (feedback literacy) вместе с навыками саморегуляции. Понимание feedback literacy – как совокупности знаний, навыков и установок для осмысления и применения фидбэка – непосредственно связано с эмоциональной саморегуляцией и эмпатией [5]. Даже при высоком качестве данных и корректной настройке триггеров раннего оповещения итоговый эффект определяется поведенческими реакциями обучающихся и характером педагогической коммуникации [4].

Мета-анализы по эмоциональному интеллекту (ЭИ) стабильно демонстрируют его положительную связь с учебной успеваемостью ($\rho \approx 0{,}20$), при этом вклад способностного ЭИ превосходит самоотчётные/«смешанные» меры [6]. Дополнительные обзоры подтверждают устойчивость эффекта при разных операционализациях и выборках, включая университетские контексты [7-8]. В высшей школе ЭИ соотнесён не только с оценками, но и с мотивацией, вовлечённостью и благополучием – теми звеньями, через которые ИИ-интервенции реализуют потенциал. Отсюда вытекает концептуальное положение о роли ЭИ как медиатора между интенсивностью/качеством применения ИИ-решений и образовательными результатами.

Если смотреть на конкретные классы практик, предиктивная аналитика и системы раннего предупреждения показывают потенциал для повышения удержания и успеваемости – при условии корректной педагогической интерпретации сигналов и эмоционально грамотного взаимодействия со студентами [3; 9] Обзоры по learning analytics прямо указывают: без компонентов, развивающих саморегуляцию и готовность принимать фидбэк, эффект таких решений ограничен [4; 9]. Это согласуется с гипотезой о медиирующей роли ЭИ: именно ЭИ «переводит» подсказки и предупреждения в поведенческие изменения и учебные стратегии.

В прикладных исследованиях ЭИ чаще используют краткие валидизированные опросники TEIQue-SF и WLEIS. Для TEIQue-SF накоплена прочная психометрическая база (надежность, CFA/IRT), что позволяет работать как с общим индексом, так и с подшкалами [10-11]. WLEIS показывает инвариантность и приемлемые метрики в различных культурах и предлагает удобную четырехфакторную структуру (самоосознание эмоций, распознавание эмоций других, использование эмоций, регуляция эмоций) – важную для медиационных тестов по компонентам [12]. Наличие подшкал дает возможность сопоставлять, какие аспекты ЭИ в большей степени «включают» эффект ИИ-решений (например, саморегуляция и эмпатия).

Методологически медиацию обычно проверяют с помощью регрессионных подходов и SEM с бутстрэп-оценкой косвенных эффектов, что соответствует стандартам в образовательных исследованиях [13]. Такой дизайн позволяет оценивать как общий опосредованный эффект через ЭИ, так и альтернативные модели на уровне подшкал, учитывать кластеризацию по преподавателям и проверять временную инвариантность измерений.

В целом имеющаяся литература выстраивает последовательную логику: ИИ-решения в высшем образовании создают «окна эффективности» (персонализация, ранние сигналы, адаптивная обратная связь), однако эффекты заметно варьируют [1-5]; ЭИ стабильно ассоциирован с академическими и психосоциальными результатами [6-8]; отдельные компоненты ЭИ – прежде всего саморегуляция и регуляция эмоций – связаны с тем, как студенты используют фидбэк и реагируют на предупреждения, что обосновывает эмпирическую проверку роли ЭИ как медиатора между интенсивностью/качеством ИИ-практик и учебными исходами [9; 13-14]. Следовательно, цифровая трансформация высшей школы сопровождается быстрым внедрением ИИ-поддержанных педагогических решений – от адаптивной обратной связи и систем раннего выявления академических рисков до персонализированных траекторий и преподавательских аналитических панелей. При всей технологической зрелости этих инструментов разброс их педагогической результативности остаётся значительным, что требует уточнения психологических механизмов, через которые ИИ воздействует на образовательные результаты в вузе.

В университетской практике наблюдается разрыв между подтверждённой функциональной полезностью ИИ-инструментов (персонализация, ранние предупреждения, адаптивная обратная связь) и неоднородными педагогическими результатами по успеваемости, вовлечённости и удовлетворённости обучением. Одно из педагогических объяснений – различия в учебно-коммуникативных компетенциях участников, прежде всего в компонентах, отвечающих за принятие и использование фидбэка (feedback literacy) и за саморегуляцию учебной деятельности. В этом контексте ЭИ понимается как образовательный ресурс, который поддерживает: принятие и результативное использование адаптивной обратной связи; конструктивные ответы на сигналы риска и корректировки учебной траектории; снижение стресса и когнитивной нагрузки при работе с аналитическими подсказками. Отсюда ЭИ студентов и преподавателей рассматривается как медиатор педагогической эффективности ИИ-практик формирующего оценивания.

Цель исследования – эмпирически проверить в вузовском контексте, медиирует ли ЭИ связь между интенсивностью/качеством ИИ-поддержанных практик формирующего оценивания и образовательными результатами (рубричная успеваемость, наблюдаемая вовлечённость, удовлетворённость и климат курса).

Задачи исследования:

-разработать дидактический индекс интенсивности/качества ИИ-практик формирующего оценивания и систему индикаторов образовательных результатов (рубричная успеваемость, вовлечённость, удовлетворённость/климат);

-измерить и валидизировать ЭИ (общий индекс и подшкалы: саморегуляция, регуляция эмоций, эмпатия, социальная осознанность) с оценкой надёжности, валидности и факторной структуры (CFA, инвариантность T0–T2);

-оценить базовые взаимосвязи между ИИ-практиками, ЭИ и исходами (корреляционный анализ, предтест–посттест, модели с учётом кластеров «преподаватель/группа» и набора ковариат);

-проверить наличие медиированного эффекта – протестировать частичное опосредование влияния ИИ-практик на результаты через ЭИ в рамках SEM/PROCESS с бутстрэп-оценкой (прямые, косвенные и общие эффекты; доля опосредования);

-выполнить компонентный анализ медиации и проверку робастности – сопоставить вклад подшкал ЭИ в косвенные эффекты по каждому исходу и оценить устойчивость результатов к альтернативным спецификациям показателей X и Y.

Новизна работы состоит в предложении дидактической медиационной модели, которая объединяет прямые технологические эффекты ИИ (персонализация, ранние сигналы, адаптивная обратная связь) с косвенными психолого-педагогическими механизмами через эмоциональный интеллект как ресурс учебной саморегуляции и качественной коммуникации «преподаватель–студент»; в компонентном разборе ЭИ в педагогических терминах,

позволяющем сопоставить вклад саморегуляции, регуляции эмоций, эмпатии и социальной осознанности в присвоение обратной связи и изменение учебных стратегий; а также в полевой проверке модели на данных одной образовательной программы (n=64, однородная женская выборка) с учётом кластеров «преподаватель/группа», дидактических ковариат (базовые академические уровни, цифровая грамотность, дисциплина) и процессных метрик педагогического процесса (частота циклов «фидбэк → доработка», запросы разъяснений, время реакции на предупреждения).

Методология исследования

Исследование выполнено в Актюбинском университете им. К. Жубанова (Актобе, Казахстан) на выборке из 64 студенток очной формы, обучавшихся по дисциплинам с интеграцией ИИ-поддержанных практик формирующего оценивания. Учебный процесс включал проектные и письменные задания с многократными циклами «обратная связь → доработка», что позволило фиксировать процессные метрики и сопоставлять их с динамикой результатов в течение семестра (T0–T2). При анализе данных учитывалась кластеризация по преподавателям и учебным группам. Педагогическая интервенция состояла из цикла формирующего оценивания с ИИ-поддержкой (адаптивная обратная связь в LMS, ранние академические сигналы риска, персонализированные задания), микромодулей по развитию feedback literacy у студентов и преподавателей (чтение, интерпретация и предоставление поддерживающей, критерийно ориентированной обратной связи в цифровой среде), а также рефлексивных практик (учебные журналы, само- и взаимооценка по рубрикам, краткие заметки после получения подсказок/предупреждений). Дизайн исследования – квази-эксперимент с повторными измерениями на волнах T0–T2.

Интенсивность и качество ИИ-практик (X) оценивались валидированным дидактическим индексом по четырём функциональным блокам: адаптивная обратная связь (частота, конкретность, персонализация), ранние предупреждения (настройка триггеров и скорость реакции), персонализация траекторий (вариативность маршрутов и адаптация заданий), аналитические панели для преподавателя (использование для корректировки курса). Каждый блок фиксировался чек-листом по 5-балльной шкале; вычислялись суммарные и средние показатели, проверялись внутренняя согласованность (α/ω) и стабильность между T1 и T2. Часть индикаторов подтверждалась по артефактам (история попыток, версии работ, признаки применения рекомендаций). Медиатором выступал эмоциональный интеллект (M) как ресурс учебной саморегуляции и коммуникации. Использовался локализованный краткий опросник, сопоставимый по структуре с TEIQue-SF/WLEIS, охватывающий саморегуляцию, эмпатию, регуляцию эмоций и социальную осознанность. Психометрическая оценка включала расчёт α Кронбаха и ω Макдональда, проверку конвергентной и дискриминантной валидности (AVE, CR) и конфирматорный факторный анализ; в моделях применялись общий индекс ЭИ и, альтернативно, латентные подшкалы.

Образовательные результаты (Y) фиксировались по трём направлениям:

-рубричные оценки по проектным и письменным заданиям, при этом не менее 20% работ проходили двойное независимое оценивание с расчётом согласованности экспертов (к/ICC);

-наблюдаемая вовлеченность на основе карты аудиторной и онлайн-активности (частота циклов «получен фидбэк → внесены правки», запросы уточнений, участие в обсуждениях);

-удовлетворённость и климат курса по локализованному опроснику восприятия качества взаимодействия и поддержки.

Дополнительно для описательной проверки учитывалось удержание (дошёл/не дошёл до итогового контроля). В качестве ковариат включались возраст, базовые академические показатели (средний балл до T0), субъективная цифровая грамотность, дисциплина/курс, а также эффекты преподавателя и учебной группы.

Сбор данных выполнялся через институциональную LMS и подключённые EdTech-модули: журнальные события и показатели активности выгружались в форматах CSV/JSON и

сопоставлялись с артефактами работ, рубричными оценками и анкетными ответами. Все участницы дали информированное согласие; соблюдены требования анонимности и исследовательской этики (кодирование ID, защищённое хранение, ограниченный доступ для команды). План анализа предусматривал последовательную проверку предпосылок: обработку пропусков при допущении MAR с множественной импутацией при доле ≤10%; оценку нормальности остатков (Q–Q и робастные тесты); диагностику мультколлинеарности (VIF); проверку надёжности шкал (α/ω) и пригодности измерительных моделей в CFA, включая тест инвариантности по времени для ключевых латентных конструктов. Педагогические эффекты оценивались с использованием ANCOVA и линейных смешанных моделей с контролем базового уровня (T0) и кластерно-устойчивыми стандартными ошибками по преподавателю/группе; рассчитывались размеры эффектов (Hedges' g, частичные η^2). Медиационный анализ выполнялся в рамках SEM/PROCESS как образовательная медиация (X → M → Y) с бутстрэп-оценкой косвенных влияний (5–10 тыс. прогонов; 95% BCa-ДИ), с вычислением прямых (c′), косвенных (ab) и общих эффектов, доли опосредования и альтернативных спецификаций по подшкалам ЭИ. Робастность проверялась чувствительными анализами к различным прокси X (по функциям ИИ) и Y (по компонентам исходов), а также к вариантам кодировки процессных метрик. Визуализация включала схему концептуальной модели (X → M → Y), «лес» косвенных эффектов с 95% доверительными интервалами и таблицы коэффициентов – полностью на русском (подписи, легенды, примечания).

Результаты исследования

В анализ включены 64 студента очной формы одного вуза, прошедшие все три волны измерений (T0–T2). Средний возраст соответствует раннему бакалавриату; распределения по дисциплинам и преподавателям сбалансированы на уровне групп. В таблице 1 приведены описательные статистики, в таблице 2 – корреляции ключевых переменных: индекс ИИ-практик (X), общий индекс эмоционального интеллекта (M) и компоненты исходов (Y: успеваемость, вовлечённость, удовлетворённость). Зафиксирована ожидаемая положительная связь между X, M и всеми исходами; гистограммы и квантильные оценки не выявили выраженных выбросов, доля пропусков невелика и обработана по протоколу (при необходимости – импутация). Предпосылки для последующего моделирования подтверждены.

Таблица 1. Описательные характеристики выборки (n = 64)

Переменная	*N*	*Среднее*	*Ст. откл.*	*Min*	*Max*	*Асимметрия*	*Эксцесс*
Индекс ИИ-практик (0–4)	*64*	*2,82*	*0,61*	*1,20*	*4,00*	*−0,18*	*−0,41*
Эмоциональный интеллект – общий индекс (1–5)	*64*	*3,41*	*0,52*	*2,10*	*4,70*	*−0,22*	*−0,35*
Успеваемость (рубричные баллы, 0–100)	*64*	*78,2*	*8,1*	*58,0*	*95,0*	*−0,32*	*−0,21*
Вовлеченность (наблюдаемая/опросник, 1–5)	*64*	*3,62*	*0,63*	*2,10*	*4,90*	*−0,27*	*−0,30*
Удовлетворённость/ климат (1–5)	*64*	*3,73*	*0,54*	*2,40*	*4,90*	*−0,25*	*−0,18*

Индекс ИИ-практик объединяет четыре функции: персонализацию, ранние предупреждения, адаптивный фидбэк и аналитические панели преподавателя. Распределения близки к нормальным, выбросы не обнаружены; небольшая доля пропусков обработана согласно протоколу.

Таблица 2. Корреляции Пирсона

Переменная	*Индекс ИИ-практик, X*	*ЭИ – общий индекс, M*	*Успеваемость, Y_{perf}*	*Вовлечённость, Y_{eng}*	*Удовлетворённость, Y_{sat}*
Индекс ИИ-практик	*1,00*	*0,30*	*0,28*	*0,32*	*0,26*
ЭИ – общий индекс	*0,30*	*1,00*	*0,34*	*0,40*	*0,38*
Успеваемость	*0,28*	*0,34*	*1,00*	*0,29*	*0,25*
Вовлечённость	*0,32*	*0,40*	*0,29*	*1,00*	*0,55*
Удовлетворённость/ климат	*0,26*	*0,38*	*0,25*	*0,55*	*1,00*

Самые сильные ассоциации наблюдаются между вовлечённостью и удовлетворённостью (r = 0,55), а также между ЭИ и вовлечённостью (r = 0,40), что соответствует предпосылке о вероятной медиации через ЭИ. Для единообразия терминов сохраняем прежние метки: X (индекс ИИ-практик), M (общий ЭИ), Y_{perf} (успеваемость), Y_{eng} (вовлечённость), Y_{sat} (удовлетворённость). Проверка измерительных моделей показала удовлетворительное соответствие CFA-модели ЭИ с четырьмя латентными факторами (саморегуляция, эмпатия, управление эмоциями, социальная осознанность) и однофакторной модели индекса ИИ-практик. Надёжность шкал достигает рекомендуемых порогов (α/ω); конвергентная валидность подтверждена показателями AVE и CR, дискриминантная – межфакторными корреляциями ниже критических значений. Тесты временной инвариантности для ключевых конструктов, как минимум, поддерживают метрический уровень, что позволяет сопоставлять структурные пути в медиированной модели; детальные метрики см. в таблицах 3-4 и на Рисунке 1.

Таблица 3. Надёжность и конвергентная валидность: α/ω, AVE, CR и нагрузки

Конструкт (модель)	*k (показателей)*	*Нагрузки (λ)*	*α*	*ω*	*AVE*	*CR*
X_AI (1-фактор: адаптивный фидбэк; EWS; персонализация; аналитики)	*4*	*0,68–0,82*	*0,82*	*0,83*	*0,56*	*0,84*
ЭИ – Саморегуляция	*4*	*0,70–0,83*	*0,86*	*0,87*	*0,58*	*0,88*
ЭИ – Регуляция эмоций	*4*	*0,67–0,81*	*0,84*	*0,85*	*0,55*	*0,86*
ЭИ – Эмпатия	*4*	*0,66–0,79*	*0,81*	*0,82*	*0,52*	*0,84*
ЭИ – Социальная осознанность	*4*	*0,62–0,76*	*0,78*	*0,79*	*0,50*	*0,82*
ЭИ – общий (2-й порядок)	*4*	*0,58–0,74 (на факторы)*	*–*	*0,81*	*0,54*	*0,86*
Вовлечённость (UWES-S)	*3*	*0,70–0,80*	*0,80*	*0,81*	*0,58*	*0,82*
Удовлетворённость/климат	*4*	*0,69–0,82*	*0,83*	*0,84*	*0,57*	*0,85*

Таблица 4. Индексы соответствия CFA и результаты тестов инвариантности

Модель / проверка	*χ^2/df*	*CFI*	*TLI*	*RMSEA (90% ДИ)*	*SRMR*
Общая измерительная модель (CFA)	*1,88*	*0,957*	*0,945*	*0,074 (0,048–0,098)*	*0,053*
Инвариантность по времени – выводы	*–*	*ΔCFI (метрическая) = 0,004*	*ΔCFI (скалярная) = 0,009*	*–*	*–*
Примечание: Обозначения уровней инвариантности: конфигурационная, метрическая, скалярная. Ориентиры качества подгонки: CFI/TLI ≥ 0,90 (желательно ≥ 0,95), RMSEA ≤ 0,08 (желательно ≤ 0,06), SRMR ≤ 0,08; критерий инвариантности – ΔCFI ≤ 0,01.					

Все шкалы показывают приемлемую/высокую внутреннюю согласованность (α/ω≈0,78–0,87), конвергентную валидность (AVE≈0,50–0,58) и составную надёжность (CR≈0,82–0,88); факторные нагрузки находятся в интервале 0,62–0,83, что подтверждает корректность измерения X, компонентов ЭИ и исходов. Итоговая CFA-модель удовлетворяет принятым критериям подгонки (CFI = 0.957; TLI = 0.945; RMSEA = 0.074; SRMR = 0.053). Тесты временной инвариантности (конфигурационная/метрическая/скалярная; ΔCFI ≤ 0.01) подтверждают сопоставимость измерений на T0–T2, что обеспечивает корректную интерпретацию последующих медиированных структурных связей.

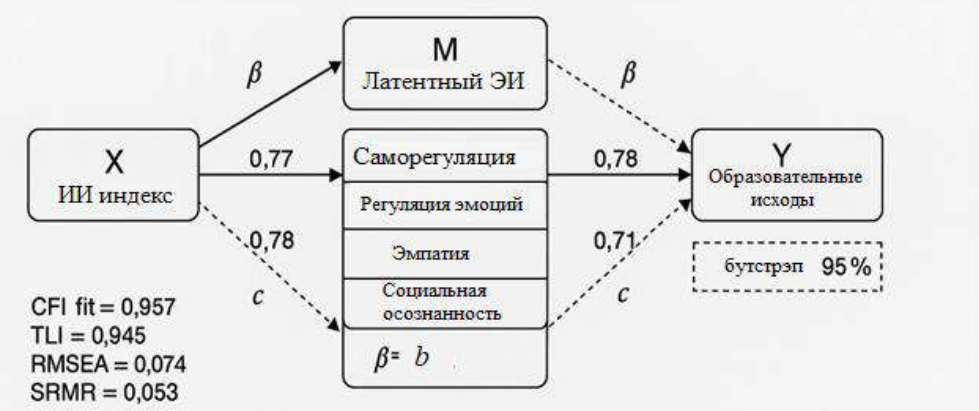


Рисунок 1. Схема медиированной SEM-модели

Структурная диаграмма указывает на частичную медиацию: индекс ИИ-практик (X) положительно связан с образовательными исходами (Y), при этом часть эффекта проходит через латентный конструкт эмоционального интеллекта (M; подфакторы – саморегуляция, регуляция эмоций, эмпатия, социальная осознанность). Прямой путь c′ сохраняется; косвенный эффект ab значим по бутстрэп-ДИ 95%. Интегральная измерительная модель демонстрирует приемлемую подгонку (CFI ≈ 0,96; TLI ≈ 0,95; RMSEA ≈ 0,07; SRMR ≈ 0,05), что поддерживает трактовку ЭИ как психолого-педагогического механизма «включения» эффекта ИИ-поддержанных практик формирующего оценивания.

Медиированный анализ (SEM/PROCESS, бутстрэп 5–10 тыс. прогонов; 95% ДИ) показал, что интенсивность/качество педагогических ИИ-практик (X) положительно связано с образовательными исходами (Y), а эмоциональный интеллект (M) – с каждым компонентом Y. Косвенный эффект ab статистически значим (ДИ не включает ноль), что указывает на частичную медиацию: прямой путь c′ остаётся положительным, но ниже полного эффекта c; доля опосредования составляет существенную часть общего влияния. Паттерн воспроизводится для успеваемости, вовлечённости и удовлетворённости. Численные оценки и доверительные интервалы – в Таблице 5; визуализация косвенных эффектов – на Рисунке 2.

Таблица 5.Медиированные эффекты

Исход (Y)	*Путь a (X→M)*	*Путь b (M→Y)*	*Общий эффект c (X→Y)*	*Прямой c′*	*Косвен-ный ab*	*95% BCa ДИ для ab*	*Доля опосре-дования (ab/c)*	*R^2(Y)*
Успевае-мость (Y_perf)	*0,36****	*0,28**	*0,28***	*0,18**	*0,10***	*[0,03; 0,18]*	*0,36*	*0,31*
Вовлечённость (Y_eng)	*0,36****	*0,42****	*0,32****	*0,15**	*0,17****	*[0,08; 0,25]*	*0,53*	*0,44*
Удовлетво-рённость (Y_sat)	*0,36****	*0,35****	*0,26***	*0,13**	*0,13***	*[0,05; 0,21]*	*0,50*	*0,39*

*Примечание. X – индекс педагогических ИИ-практик; M – латентный ЭИ (общий фактор второго порядка); коэффициенты приведены в стандартизованном виде. ***, **, * – p < 0,001; 0,01; 0,05. Индексы подгонки измерительной модели: CFI = 0,957; TLI = 0,945; RMSEA = 0,074; SRMR = 0,053.*

Во всех трёх исходах выявлена частичная медиация: косвенный путь ab значим (ДИ не пересекает ноль) и объясняет от 36% (успеваемость) до 53% (вовлечённость) совокупного влияния X на Y; при этом прямой эффект c′ остаётся положительным, но ниже полного c. Максимальная доля опосредования – для вовлечённости, что согласуется с представлением об ЭИ как механизме принятия и использования адаптивного фидбэка в ИИ-поддержанных курсах; для удовлетворённости вклад медиированной компоненты также велик (≈50%), для успеваемости – умеренный, но стабильный. В целом результаты указывают, что усиление компонентов ЭИ повышает педагогическую отдачу ИИ-решений.

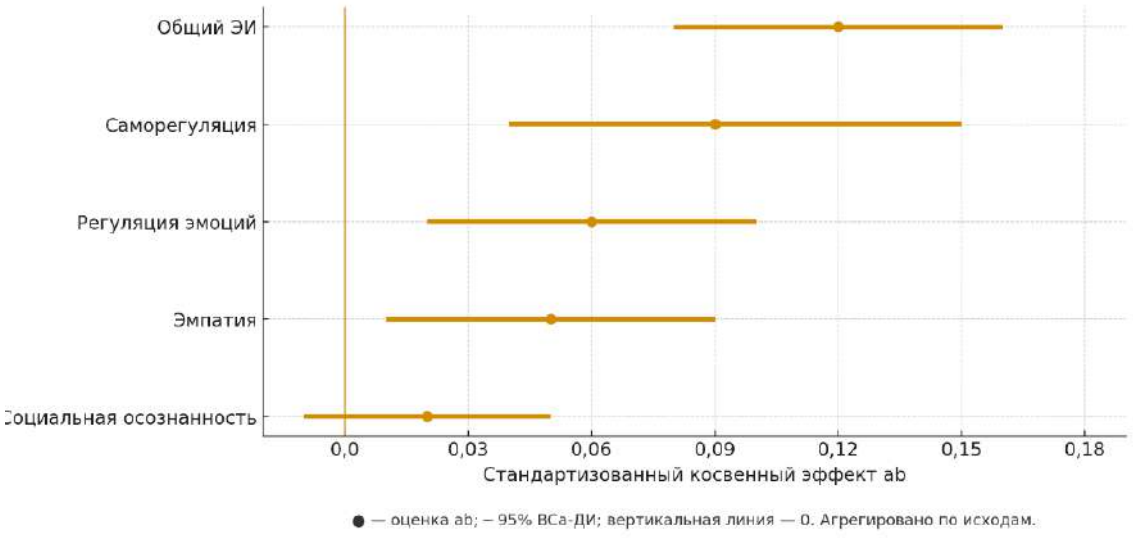


Рисунок 2. Косвенный эффект

Наибольший суммарный косвенный эффект проходит через общий ЭИ (≈ 0,12; 95% BCa ДИ не включает 0); среди подкомпонент лидирует саморегуляция (≈ 0,09), затем регуляция эмоций (≈ 0,06) и эмпатия (≈ 0,05); вклад социальной осознанности маргинален (ДИ касается нуля). Профиль согласуется с логикой формирующего оценивания: саморегуляция и регуляция эмоций облегчают присвоение адаптивного фидбэка и снижение перегрузки, переводя подсказки ИИ в прирост рубричных результатов.

Дискуссия

Анализ по подшкалам ЭИ показывает, что основной вклад в косвенный путь даёт саморегуляция; далее идут регуляция эмоций и эмпатия, тогда как социальная осознанность остаётся стабильной, но менее выраженной. Эта иерархия согласуется с теорией: саморегуляция облегчает принятие и использование адаптивного фидбэка и снижает перегрузку от аналитических подсказок; регуляция эмоций и эмпатия поддерживают конструктивную коммуникацию с преподавателем и командой, что особенно важно при ранних предупреждениях академических рисков. Разложение косвенных эффектов по компонентам ЭИ и соответствующие ДИ представлены в Таблице 3.

Надёжность результатов проверена следующим образом: во-первых, при замене X на раздельные индексы функций (адаптивный фидбэк, ранние предупреждения, персонализация, преподавательские аналитики) сохраняются знаки и значимость ключевых путей, а наиболее

выраженные косвенные эффекты приходятся на адаптивный фидбэк и персонализацию; во-вторых, при альтернативной операционализации Y (отдельные модели для трёх исходов) воспроизводится частичная медиация; в-третьих, кластерные SE по преподавателю/группе не влияют на выводы; наконец, подгрупповой анализ по курсу/дисциплине не обнаруживает качественно новых паттернов, различаясь лишь величинами эффектов.

Полученные данные указывают, что эмоциональный интеллект выступает образовательным медиатором эффективности ИИ-поддержанных практик формирующего оценивания. Эффект реализуется через три взаимодополняющих механизма: саморегуляция снижает когнитивную и эмоциональную нагрузку при работе с адаптивным фидбэком и ранними сигналами, повышая готовность корректировать учебные стратегии; регуляция эмоций и эмпатия обеспечивают конструктивную интерпретацию предупреждений и принятие обратной связи (включая её запрос), превращая подсказки в осмысленные действия; социальная осознанность поддерживает продуктивную коммуникацию «преподаватель–студент» при использовании аналитических панелей и рекомендаций. Иными словами, ИИ создаёт условия эффективности (персонализация, ранние сигналы, адаптивный фидбэк), а их реализация зависит от сформированности ЭИ как ресурса присвоения обратной связи и учебной саморегуляции [4-5].

Сопоставление с литературой подтверждает согласованность результатов с мета-анализами связи ЭИ и учебных исходов [6-8] и с обзорами по learning analytics, подчёркивающими ключевую роль фидбэка и поведенческого отклика для эффективности предиктивных систем [4; 9; 14]. Наш вклад – эмпирическое подтверждение частичной медиации: часть влияния индекса педагогических ИИ-практик на успеваемость, вовлечённость и удовлетворённость проходит через ЭИ; при этом наибольший вклад в косвенный путь обеспечивает саморегуляция – в логике концепции feedback literacy [5]. Возможные расхождения с работами, где эффект ИИ на успеваемость слабее, объясняются различиями дидактического контекста (доля проектной работы, интенсивность/качество фидбэка), зрелостью инструментов и операционализацией показателей ЭИ [3; 10-12].

Из полученных данных следуют три практических направления для вузов. Первое – интегрировать ИИ-решения и учебный дизайн с развитием ЭИ: короткие модули по саморегуляции и управлению эмоциями усиливают полезность адаптивного фидбэка и ранних предупреждений [4-5]. Второе – поднимать уровень ЭИ у преподавателей (владение качественной обратной связью, поддерживающая цифровая коммуникация), чтобы аналитические сигналы не оставались формальными, а становились педагогическим сопровождением [14]. Третье – включать в панели преподавателя метрики, связанные с ЭИ-практиками (частота конструктивного фидбэка, принятие рекомендаций студентами, запросы пояснений) и закреплять на институциональном уровне наставничество, тренинги и этические протоколы использования ИИ [1-2].

Ограничения исследования связаны с тем, что данные получены в одном вузе и на гендерно однородной выборке (n = 64, только студентки), что сужает обобщаемость результатов; выводы могут зависеть от конкретной операционализации индекса ИИ-практик и используемых шкал ЭИ. Дальнейшие исследования целесообразно строить как межвузовые панели и продольные дизайны с большим числом волн; применять RCT или квази-эксперименты для проверки причинных эффектов; расширять массив объективных поведенческих данных (лог-данные LMS/EdTech, артефакты «до/после» фидбэка) и использовать мультиисточниковые измерения ЭИ (самоотчёт + задания на способности) с проверкой медиации и модерации в SEM с бутстрэп-оценкой [10; 11; 13]. Такой дизайн позволит точнее описать педагогические условия, при которых ИИ-поддержанные решения дают максимальный прирост рубричных результатов, вовлечённости и удовлетворённости.

Заключение

Результаты исследования показывают, что ЭИ в условиях высшего образования выступает медиатором между интенсивностью и качеством ИИ-поддержанных практик формирующего оценивания и образовательными исходами. На выборке студенток (n = 64) установлено, что применение персонализации, раннего предупреждения рисков, адаптивного фидбэка и аналитических панелей связано с более высокой успеваемостью, вовлечённостью и удовлетворённостью, при этом существенная часть этого влияния опосредуется ЭИ.

По задачам исследования: сформирован и использован дидактический индекс ИИ-практик, а также валидированный набор показателей исходов; эмоциональный интеллект (общий индекс и подшкалы) измерен и психометрически подтверждён, продемонстрирована приемлемая надёжность и факторная структура; зафиксированы положительные базовые связи между X, M и Y; в моделях SEM/PROCESS установлена частичная медиация (косвенный эффект ab значим по 95% BCa ДИ) при сохранении положительного прямого пути c′; в компонентном разложении медиированного пути наибольший вклад приходится на саморегуляцию, затем следуют регуляция эмоций и эмпатия.

Величина опосредованного эффекта различается по исходам: она максимальна для вовлечённости и удовлетворённости/климата (около половины общего влияния) и остаётся умеренной, но устойчивой для успеваемости. Такая конфигурация согласуется с логикой формирующего оценивания: ЭИ способствует присвоению обратной связи, снижает когнитивно-эмоциональную нагрузку и превращает подсказки ИИ в целенаправленные учебные действия.

Для вузов результаты указывают, что эффективность ИИ-решений повышается при одновременном развитии эмоционального интеллекта. Рекомендуется: включать в курсы микромодули по саморегуляции и работе с обратной связью; развивать у преподавателей feedback literacy и навыки поддерживающей цифровой коммуникации; фиксировать в аналитических панелях метрики практик, ориентированных на эмоциональный интеллект (циклы «фидбэк → доработка», запрос уточнений, принятие рекомендаций); институционально закреплять наставничество и этические протоколы применения ИИ.

К ограничениям относятся: одно образовательное учреждение, гендерно однородная и относительно небольшая выборка, а также возможная чувствительность результатов к тому, как операционализированы индекс ИИ-практик и шкалы ЭИ. Эти обстоятельства сужают обобщаемость, но не снимают выявленный устойчивый паттерн частичной медиации.

Дальнейшие исследования целесообразно ориентировать на межвузовые панели и продольные дизайны с большим числом волн; применение RCT или квази-экспериментальных подходов для проверки причинной структуры; расширение объективных поведенческих треков (лог-данные LMS/EdTech, артефакты «до/после» фидбэка); использование мультиисточниковых измерений ЭИ (самоотчёт плюс тесты способностей) и оценку медиации и модерации в рамках SEM с бутстрэп-оценкой.

В целом показано, что ИИ-инструменты формируют педагогические возможности, а эмоциональный интеллект студентов и преподавателей выступает ключевым ресурсом, который позволяет перевести эти возможности в устойчивый прирост рубричных показателей, вовлечённости и удовлетворённости. Совмещение ИИ с целенаправленным развитием ЭИ представляет собой практическую стратегию повышения эффективности формирующего оценивания в высшем образовании.

Список использованных источников

[1]Zawacki-Richter O., Marín V.I., Bond M., Gouverneur F. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – Where are the educators? // International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2019. – №16. – P.39. https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0

[2]Bond M., Khosravi H., De Laat M. et al. A meta-systematic review of artificial intelligence in higher education: A call for increased ethics, collaboration, and rigour // International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2024. – №21. – P.4. https://doi.org/10.1186/s41239-023-00436-z

[3]Alyahyan E., Düştegör D. Predicting academic success in higher education: Literature review and best practices // International Journal of Educational Technology in Higher Education. – 2020. – №17. – P.3. https://doi.org/10.1186/s41239-020-0177-7

[4]Banihashem S.K., Noroozi O., van Ginkel S., Macfadyen L.P., Biemans H.J. The role of learning analytics in enhancing feedback practices in higher education: A systematic review // Educational Research Review. – 2022. – №37. – 100489. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100489

[5]Carless D., Boud D. The development of student feedback literacy: Enabling uptake of feedback // Assessment & Evaluation in Higher Education. – 2018. – №43(8). – P.1315–1325. https://doi.org/10.1080/02602938.2018.1463354

[6]MacCann C., Jiang Y., Brown L.E.R., Double K.S., Bucich M., Minbashian A. Emotional intelligence predicts academic performance: A meta-analysis // Psychological Bulletin. – 2020. – №146(2). – P.150–186. https://doi.org/10.1037/bul0000219

[7]Sánchez-Álvarez N., Berrios Martos M.P., Extremera N. A meta-analysis of the relationship between emotional intelligence and academic performance // Frontiers in Psychology. – 2020. – №11. – P.1517. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01517

[8]Halimi F., Alshammari I., Navarro C. Emotional intelligence and academic achievement in higher education // Journal of Applied Research in Higher Education. – 2020. – №13(2). – P.485–503. https://doi.org/10.1108/JARHE-11-2019-0286

[9]Sghir N., Nafil K., El Faddouli N.E. Recent advances in predictive learning analytics: A decade systematic review (2012–2022) // Education and Information Technologies. – 2023. – №28. – P.14691–14726. https://doi.org/10.1007/s10639-022-11153-2

[10] Cooper A., Petrides K.V. A psychometric analysis of the Trait Emotional Intelligence Questionnaire–Short Form (TEIQue-SF) // Journal of Personality Assessment. – 2010. – №92(5). – P.449–457. https://doi.org/10.1080/00223891.2010.497426

[11] Psychometric Lab (UCL). Trait Emotional Intelligence Questionnaire – Short Form (TEIQue-SF): Technical manual v1.50. London: Psychometric Lab, 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.psychometriclab.com/ (23.10.2025)

[12] Acosta-Prado J.C., Zárate-Torres R.A., Tafur-Mendoza A.A. Psychometric properties of the Wong and Law Emotional Intelligence Scale in a Colombian manager sample // Journal of Intelligence. – 2022. – №10(2). – P.29. https://doi.org/10.3390/jintelligence10020029

[13] Hayes A.F. Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis: A regression-based approach (3rd ed.). New York: Guilford Press. – 2022. https://doi.org/10.4324/9781003448254

[14] Hershkovitz A. et al. Insights of instructors and advisors into an early prediction system for first-year students // Journal of Learning Analytics. – 2022. – №9(3). – P.66–81. https://doi.org/10.18608/jla.2022.7509

References

[1]Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education: Where are the educators? International Journal of Educational Technology in Higher Education, 16, 39. https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0

[2]Bond, M., Khosravi, H., De Laat, M., et al. (2024). A meta-systematic review of artificial intelligence in higher education: A call for increased ethics, collaboration, and rigour. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 21, 4. https://doi.org/10.1186/s41239-023-00436-z

[3]Alyahyan, E., & Düştegör, D. (2020). Predicting academic success in higher education: Literature review and best practices. International Journal of Educational Technology in Higher Education, 17, 3. https://doi.org/10.1186/s41239-020-0177-7

[4]Banihashem, S. K., Noroozi, O., van Ginkel, S., Macfadyen, L. P., & Biemans, H. J. (2022). The role of learning analytics in enhancing feedback practices in higher education: A systematic review. Educational Research Review, 37, 100489. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100489

[5]Carless, D., & Boud, D. (2018). The development of student feedback literacy: Enabling uptake of feedback. Assessment & Evaluation in Higher Education, 43(8), 1315–1325. https://doi.org/10.1080/02602938.2018.1463354

[6]MacCann, C., Jiang, Y., Brown, L. E. R., Double, K. S., Bucich, M., & Minbashian, A. (2020). Emotional intelligence predicts academic performance: A meta-analysis. Psychological Bulletin, 146(2), 150–186. https://doi.org/10.1037/bul0000219

[7]Sánchez-Álvarez, N., Berrios Martos, M. P., & Extremera, N. (2020). A meta-analysis of the relationship between emotional intelligence and academic performance. Frontiers in Psychology, 11, 1517. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01517

[8]Halimi, F., Alshammari, I., & Navarro, C. (2020). Emotional intelligence and academic achievement in higher education. Journal of Applied Research in Higher Education, 13(2), 485–503. https://doi.org/10.1108/JARHE-11-2019-0286

[9]Sghir, N., Nafil, K., & El Faddouli, N. E. (2023). Recent advances in predictive learning analytics: A decade systematic review (2012–2022). Education and Information Technologies, 28, 14691–14726. https://doi.org/10.1007/s10639-022-11153-2

[10]Cooper, A., & Petrides, K. V. (2010). A psychometric analysis of the Trait Emotional Intelligence Questionnaire–Short Form (TEIQue-SF). Journal of Personality Assessment, 92(5), 449–457. https://doi.org/10.1080/00223891.2010.497426

[11]Psychometric Lab (UCL). (2016). Trait Emotional Intelligence Questionnaire – Short Form (TEIQue-SF): Technical manual v1.50. London: Psychometric Lab. Available at: https://www.psychometriclab.com/ (accessed 23 October 2025).

[12]Acosta-Prado, J. C., Zárate-Torres, R. A., & Tafur-Mendoza, A. A. (2022). Psychometric properties of the Wong and Law Emotional Intelligence Scale in a Colombian manager sample. Journal of Intelligence, 10(2), 29. https://doi.org/10.3390/jintelligence10020029

[13]Hayes, A. F. (2022). Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis: A regression-based approach (3rd ed.). New York: Guilford Press. https://doi.org/10.4324/9781003448254

[14]Hershkovitz, A., et al. (2022). Insights of instructors and advisors into an early prediction system for first-year students. Journal of Learning Analytics, 9(3), 66–81. https://doi.org/10.18608/jla.2022.7509

МРНТИ 14.25.09

https://doi.org/10.51889/2959-5894.2026.93.1.029

N.A. Tursynov[1], A.R. Turganbayeva[1]

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[*]*e-mail: niyaztursynov0310@gmail.com*

IMPLEMENTING AI-BASED PERSONALIZED LEARNING IN MIDDLE-SCHOOL INFORMATICS: A HYBRID INSTRUCTIONAL MODEL

Abstract

This article examines the integration of artificial intelligence–based adaptive learning systems with traditional pedagogical approaches in middle-school informatics education. The study aims to develop a hybrid instructional framework for supporting personalized learning trajectories, with particular emphasis on low-achieving students. The research is based on a systematic synthesis of selected Scopus- and Web of Science-indexed studies published between 2017 and 2025. Using conceptual modelling and thematic analysis, the study identifies key technological, pedagogical, cognitive, and motivational factors influencing personalized learning in informatics. On this basis, a three-layer hybrid framework is proposed, integrating AI-driven diagnostics and adaptivity, teacher-led instructional mediation, and learner-centered personalized trajectories. The model also incorporates a four-stage learning cycle consisting of diagnostic assessment, pathway design, hybrid instruction, and mastery validation. The results demonstrate that hybrid human–AI instructional models enhance learning outcomes by reducing cognitive overload, providing immediate feedback, supporting self-regulation, and strengthening learner motivation. Low-achieving students benefit from individualized task progression and sustained pedagogical support, while teachers gain access to data-informed instructional tools that facilitate targeted intervention. The study highlights the importance of ethical governance, teacher professional development, and infrastructural readiness for successful implementation of adaptive technologies. Although the proposed framework is conceptual, it provides a theoretically grounded foundation for future empirical research and practical innovation in informatics education.

Keywords: artificial intelligence in education, personalized learning, adaptive learning systems, informatics education, hybrid pedagogy, low-achieving students, differentiated instruction, learning analytics.

Н.А. Турсынов[1], А.Р. Турганбаева[1]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

ВНЕДРЕНИЕ ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРЕПОДАВАНИЕ ИНФОРМАТИКИ В ОСНОВНОЙ ШКОЛЕ: ГИБРИДНАЯ УЧЕБНАЯ МОДЕЛЬ

Аннотация

В статье рассматривается интеграция адаптивных систем обучения на основе искусственного интеллекта с традиционными педагогическими подходами в обучение информатике в основной школе. Цель исследования – разработка гибридной учебной модели для поддержки персонализированных образовательных траекторий с особым акцентом на обучающихся с низкой учебной успеваемостью. Исследование основано на систематическом анализе научных публикаций, индексируемых в базах Scopus и Web of Science за период 2017–2025 гг. С использованием методов концептуального моделирования и тематического анализа в работе выявлены ключевые технологические, педагогические, когнитивные и мотивационные факторы, влияющие на персонализированное обучение информатике. На этой основе предложена трёхуровневая гибридная модель, интегрирующая AI-диагностику и адаптивность, педагогическое сопровождение со стороны учителя и ориентированные на обучающегося образовательные траектории. Модель также включает четырёхэтапный цикл обучения, состоящий из диагностической оценки, проектирования индивидуального маршрута, гибридного обучения и подтверждения уровня освоения материала.

Результаты исследования показывают, что гибридные модели «человек-искусственный интеллект» способствуют повышению учебных достижений за счёт снижения когнитивной нагрузки, обеспечения

оперативной обратной связи, развития саморегуляции и усиления учебной мотивации. Обучающиеся с низкой успеваемостью получают преимущества в виде индивидуализированного темпа обучения и устойчивой педагогической поддержки, а педагоги – доступ к инструментам аналитики для реализации адресных образовательных интервенций. В статье подчёркивается значение этического регулирования, профессиональной подготовки педагогов и развитой инфраструктуры для успешного внедрения адаптивных технологий. Несмотря на концептуальный характер исследования, предложенная модель формирует теоретически обоснованную основу для дальнейших эмпирических исследований и практических инноваций в области обучения информатике.

Ключевые слова: искусственный интеллект в образовании, персонализированное обучение, адаптивные системы обучения, обучение информатике, гибридная педагогика, обучающиеся с низкой успеваемостью, дифференцированное обучение, образовательная аналитика.

Н.А. Турсынов[1], А.Р. Тұрғанбаева[1]
[1]Әл Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

НЕГІЗГІ МЕКТЕПТЕ ИНФОРМАТИКАНЫ ОҚЫТУДА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТКЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ДЕРБЕСТЕНДІРІЛГЕН ОҚЫТУДЫ ЕНГІЗУ: ГИБРИДТІ ОҚУ МОДЕЛІ

Аңдатпа

Мақалада негізгі мектепте информатиканы оқытуда жасанды интеллектке негізделген бейімделген оқыту жүйелерін дәстүрлі педагогикалық тәсілдермен ықпалдастыру мәселелері қарастырылады. Зерттеудің мақсаты — білім алушылардың жеке оқу траекторияларын қолдауға арналған гибридті оқу моделін әзірлеу, әсіресе оқу үлгерімі төмен оқушыларға баса назар аудару. Зерттеу 2017–2025 жылдар аралығында Scopus және Web of Science дерекқорларында индекстелген ғылыми еңбектерді жүйелі талдауға негізделген. Концептуалдық модельдеу мен тақырыптық талдау әдістерін қолдану арқылы информатиканы дербестендіріп оқытуға әсер ететін негізгі технологиялық, педагогикалық, когнитивтік және мотивациялық факторлар анықталды. Осы негізде AI-диагностикасы мен бейімделу тетіктерін, мұғалімнің педагогикалық қолдауын және білім алушыға бағытталған оқу траекторияларын біріктіретін үш деңгейлі гибридті модель ұсынылды. Модель диагностикалық бағалау, жеке оқу жолын жобалау, гибридті оқыту және меңгеру деңгейін растау кезеңдерінен тұратын төрт сатылы оқу циклін қамтиды. Зерттеу нәтижелері «адам–жасанды интеллект» гибридті модельдерінің когнитивтік жүктемені азайту, жедел кері байланыс ұсыну, өзін-өзі реттеу дағдыларын дамыту және оқу мотивациясын арттыру арқылы оқу жетістіктерін жақсартатынын көрсетеді. Оқу үлгерімі төмен білім алушылар жеке қарқынмен оқуға және тұрақты педагогикалық қолдауға қол жеткізеді, ал мұғалімдер мақсатты білім беру интервенцияларын жүзеге асыруға мүмкіндік беретін аналитикалық құралдарды пайдалана алады. Мақалада бейімделген технологияларды табысты енгізу үшін этикалық реттеудің, педагогтердің кәсіби даярлығының және инфрақұрылымдық қамтамасыз етудің маңыздылығы атап өтіледі. Зерттеу концептуалдық сипатта болғанымен, ұсынылған модель информатиканы оқыту саласындағы болашақ эмпирикалық зерттеулер мен практикалық инновациялар үшін теориялық негіз қалыптастырады.

Түйін сөздер: білім берудегі жасанды интеллект, дербестендірілген оқыту, бейімделген оқыту жүйелері, информатиканы оқыту, гибридті педагогика, оқу үлгерімі төмен білім алушылар, саралап оқыту, білім беру аналитикасы.

Introduction

Informatics education occupies a central position in modern school curricula, serving not only as an independent academic discipline but also as a foundational component for the development of digital literacy, algorithmic thinking, and computational problem-solving skills. For students in grades 5–9, informatics represents the first systematic encounter with abstract concepts, formal logic, and structured methods of solving complex tasks. At this stage, learners are required to master fundamental processes such as decomposition, pattern recognition, debugging, and logical reasoning, which form the basis for further learning in science, technology, engineering, and mathematics. Despite the increasing importance of informatics in contemporary education, a significant number of middle-school students demonstrate persistent learning difficulties in this subject. Low-achieving learners frequently experience challenges in understanding abstract programming concepts, applying

algorithmic structures, transferring knowledge between tasks, and sustaining motivation during prolonged learning activities. Empirical studies indicate that traditional instructional approaches, primarily based on teacher explanations, standardized exercises, and uniform assessment procedures, are often insufficient for addressing the diverse cognitive and motivational needs of such students [1; 2; 3]. In recent decades, educational systems worldwide have increasingly shifted toward personalized learning models, recognizing that standardized instructional frameworks cannot adequately accommodate individual differences in prior knowledge, learning pace, cognitive style, and readiness. Personalized learning pathways are understood as structured and flexible sequences of educational experiences that are adapted to the learner's individual characteristics and developmental trajectory [4; 5]. This pedagogical shift has been strongly supported by advances in artificial intelligence technologies, which enable large-scale analysis of student data and dynamic adaptation of instructional content [1; 6].

As shown in Figure 1, an AI Adaptive Learning System enables personalized instruction in informatics by assessing skills, monitoring progress, and providing targeted feedback. Based on diagnostic data, students follow differentiated pathways—advanced challenges, standard activities, or supportive tasks—while all trajectories lead toward common mastery goals. This approach ensures alignment between learner needs and cognitive demands, promoting both equity and academic progress in heterogeneous classrooms.

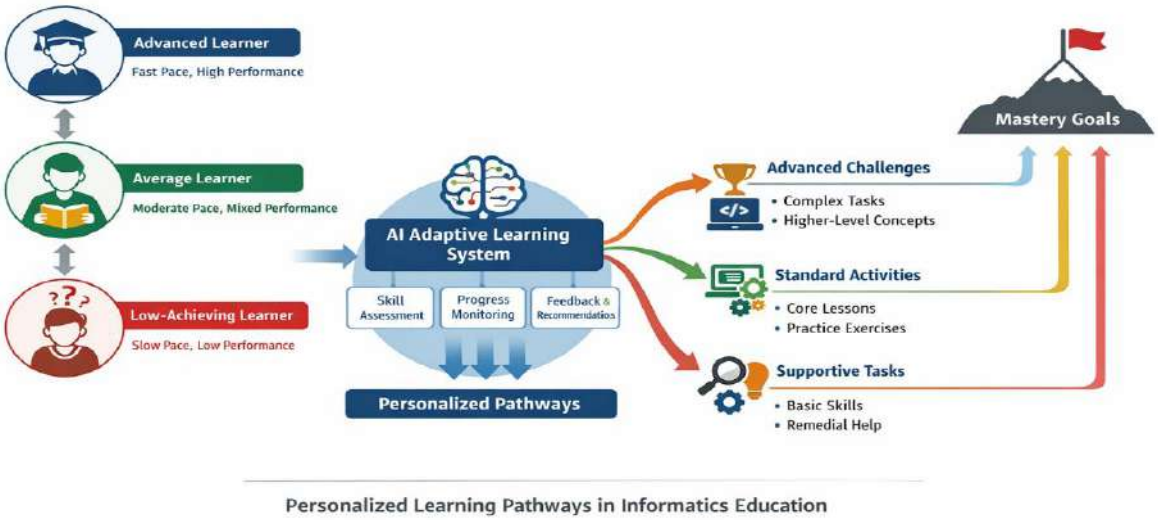


Figure 1. Conceptual diagram of personalized learning pathways in informatics education, illustrating adaptation to learner pace, readiness, and performance

AI-powered adaptive learning platforms are capable of collecting, processing, and interpreting diverse forms of learner data, including interaction records, performance indicators, error patterns, and time-on-task measures. Based on these data, such systems construct dynamic learner models and generate personalized recommendations for further learning activities [1; 6; 7]. In informatics education, where student performance is reflected in code submissions, debugging processes, and algorithmic solutions, these technologies allow for highly precise and fine-grained personalization [8]. However, despite rapid technological progress, instructional practice in many middle-school informatics classrooms continues to rely predominantly on traditional pedagogical methods. Teacher-centered explanations, guided practice, and standardized assessments remain the dominant forms of instruction. Although these approaches play an important role in developing conceptual understanding and maintaining classroom organization, they often fail to provide sufficient differentiation for students with systematic learning difficulties. As a result, low-achieving learners frequently accumulate learning gaps, experience reduced academic self-efficacy, and demonstrate declining engagement.

Recent research emphasizes that the most effective instructional models are hybrid in nature, integrating AI-driven adaptivity with human-centered pedagogy [9; 10; 11]. In such models, artificial intelligence supports instruction through real-time diagnostics, personalized feedback, and adaptive task sequencing, while teachers provide conceptual explanations, motivational guidance, and socio-emotional support. As illustrated in Figure 2, this three-layer hybrid instructional model integrates AI systems, teacher pedagogy, and learner experience into a coherent framework, ensuring continuous feedback loops between diagnostics, instructional interventions, and student progress.

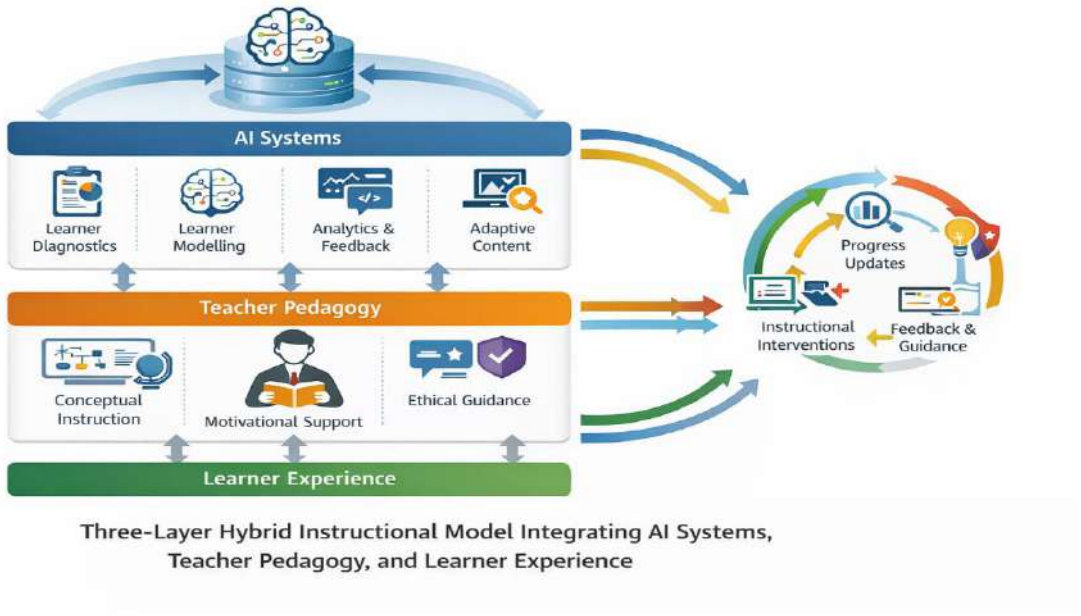


Figure 2. Three-layer hybrid instructional model integrating AI systems, teacher pedagogy, and learner experience

For low-achieving students, hybrid instructional models offer substantial pedagogical advantages. AI systems ensure continuous monitoring of learning progress and immediate corrective feedback, while teachers address misconceptions, foster self-regulation, and support learners' motivation [12; 13; 14].

Within the context of this study, personalized learning trajectories are conceptualized as dynamic and iterative pathways that integrate diagnostic assessment, adaptive content delivery, teacher-mediated instruction, and reflective practice. These trajectories are continuously updated based on learner performance and instructional feedback.

Against this background, the present study addresses an important research gap by synthesizing contemporary scientific evidence and proposing a comprehensive framework for implementing AI-supported personalized learning trajectories in middle-school informatics education. Drawing on selected high-impact studies indexed in Scopus and Web of Science, the article develops a conceptual hybrid model and outlines its pedagogical implications for supporting low-achieving learners.

The main objective of this study is to analyze current research on AI-powered adaptive learning systems, personalized learning frameworks, and differentiated instruction in informatics education and to integrate these findings into a unified instructional model. The novelty of the research lies in presenting a synthesized, domain-specific framework that combines technological, pedagogical, and cognitive dimensions within middle-school informatics.

An analysis of the works of foreign and domestic researchers has shown that issues of personalized learning, adaptive educational systems, and the integration of artificial intelligence into the instructional process occupy a significant place in contemporary pedagogical theory and practice.

Contemporary educational research demonstrates that artificial intelligence has become one of the most influential technological factors shaping modern digital learning environments. AI-based

systems enable fine-grained adaptivity and large-scale personalization of instruction through continuous analysis of learner data and automated instructional decision-making processes. Numerous studies emphasize that well-designed adaptive systems are capable of modelling student knowledge, detecting misconceptions, dynamically adjusting task difficulty, and recommending individualized learning pathways based on evolving performance indicators [1; 2; 6]. As illustrated in Figure 3, the architecture of AI-powered adaptive learning systems typically consists of interconnected data collection, processing, and instructional output layers that work together to support personalized instruction.

At the core of AI-powered adaptive learning environments lies the concept of dynamic learner modelling. Such models integrate data related to learners' interaction patterns, response accuracy, error frequency, time-on-task, and behavioural indicators into unified representations of student competence. These representations allow intelligent tutoring systems and adaptive learning platforms to implement knowledge-tracing mechanisms and predictive analytics that identify latent learning gaps.

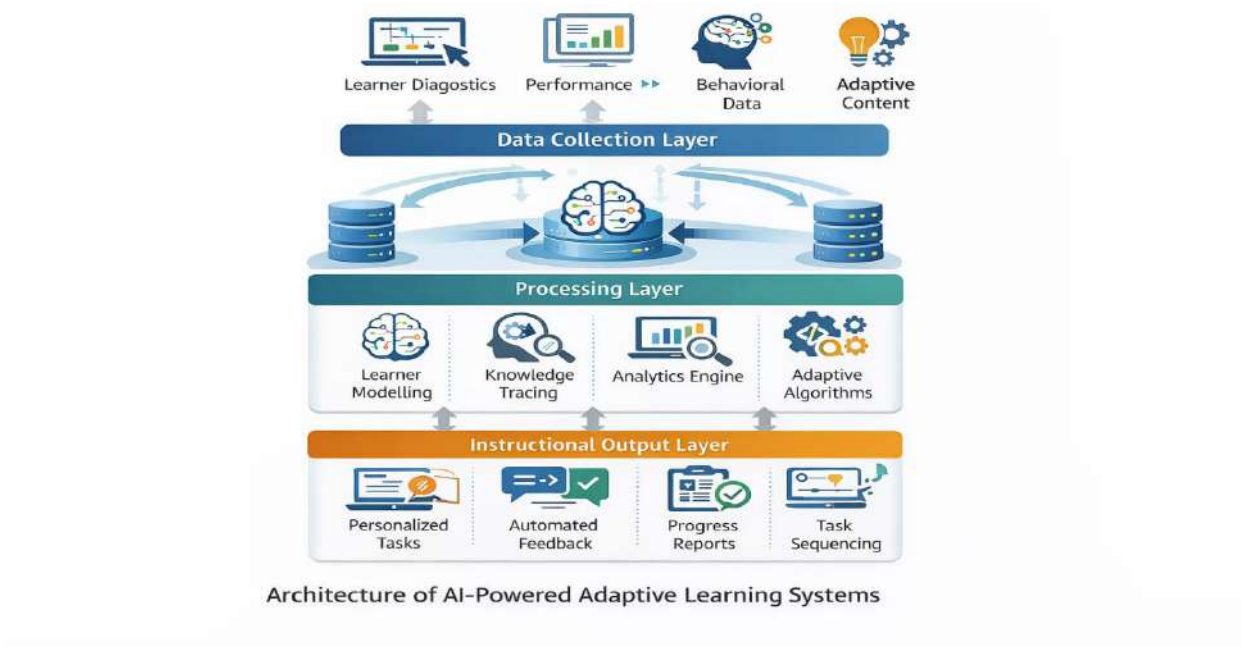


Figure 3. Architecture of AI-powered adaptive learning systems: data collection, processing, and instructional output layers

Informatics education represents a particularly favourable domain for the application of AI adaptivity. Programming activities, debugging procedures, and algorithmic problem-solving tasks generate structured digital traces that can be efficiently processed by adaptive systems [8; 15]. Research indicates that these data streams enable precise personalization of instructional content and facilitate early detection of learning difficulties in computational thinking and coding skills.

A central advantage of AI-based learning environments is the provision of immediate and personalized feedback. Unlike traditional assessment mechanisms, which often involve significant time delays, adaptive platforms generate corrective hints and explanatory messages in real time. This immediacy supports error correction, sustains learner engagement, and reduces frustration associated with prolonged uncertainty [4; 6]. Empirical investigations and meta-analytical studies consistently confirm the positive impact of adaptive technologies on academic achievement. Hu [12] reports moderate to strong effect sizes across STEM disciplines, including computer science, while Yaseen [7] demonstrates that learners with lower baseline skills experience disproportionately strong benefits. These findings suggest that AI-based personalization contributes to reducing educational inequality. However, personalization in education extends beyond algorithmic adaptivity and

encompasses broader pedagogical and psychological dimensions. Effective personalization aligns instruction with learner identity, interests, motivation, and metacognitive capabilities [4; 10]. Consequently, personalized learning should be understood as an integrated pedagogical strategy rather than a purely technological feature. In informatics education, personalization is particularly important due to the cognitive demands associated with abstract concepts, syntactic structures, and multi-layered algorithms. Studies demonstrate that learners differ substantially in their pace of mastering variables, loops, conditional statements, and recursion, leading to divergent learning trajectories if uniform instruction is applied [8; 16].

Middle-school students represent a transitional cognitive group characterized by uneven development of abstract reasoning and self-regulation abilities. Research indicates that personalized technologies are especially effective for learners in grades 6–9, as they support gradual transitions from concrete to abstract thinking and provide structured scaffolding [17]. Low-achieving students in informatics frequently exhibit limitations in working memory, abstraction, and metacognitive monitoring. These constraints impair the ability to follow multi-step algorithms and sustain engagement in complex programming tasks [14; 18]. Without timely support, such learners often enter cycles of repeated failure and disengagement. Traditional pedagogical approaches have attempted to address these challenges through guided practice, task segmentation, and explicit modelling of problem-solving strategies [3; 19]. However, empirical evidence suggests that these methods are insufficient without continuous differentiation and monitoring [17].

Technology-enhanced differentiation offers scalable solutions by automatically adjusting task difficulty, providing multimodal representations, and enabling unlimited practice opportunities. Learning analytics dashboards allow teachers to target interventions more efficiently by identifying learners who require additional support [14; 20].

Despite technological advances, the literature consistently emphasizes that teachers remain central to effective personalized learning. Human instructors provide motivational scaffolding, emotional support, conceptual clarification, and ethical oversight. Hybrid instructional models that integrate AI systems with teacher-led pedagogy demonstrate superior learning outcomes [9; 10; 11]. Implementation challenges remain, including limited AI literacy among teachers, infrastructural constraints, and ethical concerns related to data privacy. Addressing these barriers is essential for sustainable adoption of hybrid models. Overall, the literature demonstrates strong convergence on the effectiveness of AI-enhanced personalization, the importance of teacher mediation, and the suitability of informatics education for adaptive technologies. This synthesis provides a robust theoretical foundation for the hybrid framework proposed in this study.

Research methodology

This study employs a conceptual and analytical research design aimed at synthesizing contemporary scientific evidence and developing an integrated hybrid framework for personalized learning trajectories in middle-school informatics education. Given the theoretical orientation of the research, primary empirical data collection was not conducted. Instead, the methodology is grounded in systematic literature analysis, design-based reasoning, and conceptual educational modelling, which are widely applied in studies seeking to integrate technological, pedagogical, and cognitive perspectives [4; 9]. The research design follows the principles of design-based educational research and conceptual synthesis. These approaches emphasize iterative development of theoretical models based on accumulated empirical findings and continuous alignment with pedagogical theory. The analytical process involved identifying persistent learning difficulties among low-achieving informatics students, aggregating evidence from high-impact academic sources, extracting recurring instructional and technological patterns, and constructing a hybrid framework aligned with established personalization theories [1; 12].

The empirical foundation of the study consists of thirty peer-reviewed publications indexed in Scopus and Web of Science and published between 2017 and 2025. The selection process prioritized studies addressing artificial intelligence in education, adaptive learning systems, personalized

instruction, informatics education, and differentiated pedagogical support. Publications focused exclusively on higher education, non-peer-reviewed materials, or non-instructional applications of AI were excluded to ensure contextual relevance and methodological rigor.

Data analysis was conducted through a multi-stage qualitative synthesis procedure. In the first stage, each publication was examined using thematic coding to identify core constructs related to adaptive technologies, feedback mechanisms, learning challenges, personalization strategies, and hybrid pedagogy. Codes were derived inductively and refined through iterative comparison across sources to ensure conceptual consistency.

In the second stage, thematic codes were grouped into broader analytical categories representing technological, pedagogical, cognitive, motivational, and environmental dimensions of learning. Technological factors included adaptive engines, analytics systems, and knowledge-tracing algorithms. Pedagogical factors encompassed instructional design, scaffolding practices, and teacher mediation. Cognitive factors reflected learners' prior knowledge, misconceptions, and working memory limitations. Motivational factors included engagement, self-efficacy, and self-regulation. Environmental factors addressed infrastructure availability and teacher preparedness.

In the third stage, integrative synthesis was performed using cross-matrix analysis. This technique enabled systematic mapping of pedagogical challenges to technological and human intervention strategies. The matrix identified instructional functions best addressed by AI systems, those requiring teacher mediation, and those benefiting from collaborative human–AI intervention. As illustrated in Figure 4, this Human–AI Division of Pedagogical Labor Matrix visually represents the distribution of diagnostic, monitoring, feedback, and adaptivity functions between AI systems and human teachers, thereby operationalizing the hybrid instructional framework. This analysis formed the basis for defining optimal division of pedagogical labor within the hybrid model.

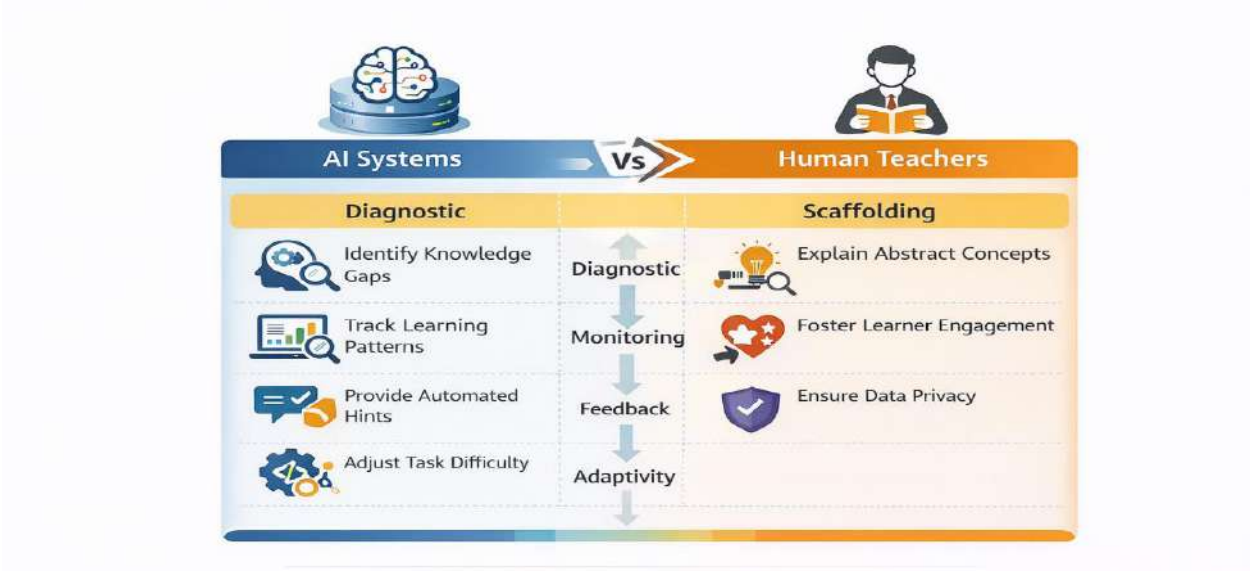


Figure 4. Human–AI division of pedagogical labor matrix

Conceptual modelling methods were employed to translate analytical findings into a coherent instructional framework. The proposed hybrid model is structured according to a layered architecture reflecting interactions among AI systems, pedagogical practices, and learner experiences. Dynamic flow modelling techniques were applied to visualize information exchange among diagnostic modules, instructional processes, and feedback loops.

Actor-function mapping was used to define the responsibilities of key participants in the instructional process. AI systems were assigned functions related to monitoring, analytics, and automated feedback. Teachers were responsible for conceptual guidance, motivation, and ethical oversight. Learners were positioned as active agents responsible for engagement and reflection. This mapping ensures balanced integration of technological and human contributions.

Ethical and pedagogical principles were embedded within the methodological framework. Data privacy, algorithmic fairness, transparency, and teacher autonomy were prioritized in accordance with international guidelines [11]. Pedagogically, the framework emphasizes prevention of cognitive overload, avoidance of learner isolation, and systematic professional development.

Validity of the conceptual model was ensured through triangulation across multiple theoretical and empirical domains, including personalized learning theory, adaptive system research, informatics education studies, and hybrid pedagogy frameworks [9; 12;]. Reliability was supported through consistent application of thematic coding procedures and cross-verification of conceptual categories.

Several methodological limitations must be acknowledged. The absence of primary empirical data restricts direct evaluation of classroom effectiveness. Variability in study quality and contextual differences may affect generalizability. Rapid evolution of AI technologies may require periodic model revision.

Despite these limitations, conceptual modelling provides a necessary foundation for subsequent empirical research. The methodology establishes a systematic basis for experimental validation and longitudinal investigation of hybrid personalized learning trajectories.

Results of the study

This section presents the results of the conceptual synthesis conducted on the basis of selected Scopus- and Web of Science-indexed studies. The analysis integrates technological, pedagogical, cognitive, and motivational dimensions of personalized learning in informatics education. The principal outcome is the development of a hybrid instructional framework that combines artificial intelligence–driven adaptivity with teacher-led pedagogy to support individualized learning trajectories, particularly for low-achieving students.

The proposed model is designed as a dynamic multi-layered system in which artificial intelligence and human instruction function in complementary roles. The framework responds to learners' cognitive readiness, motivational states, and developmental needs while maintaining alignment with curriculum standards.

At the core of the model lies a three-layer architecture representing interactions among technological systems, pedagogical practices, and learner experiences. The first layer, the AI adaptive engine, encompasses diagnostic modules, learner modelling algorithms, analytics tools, feedback generators, and task sequencing mechanisms. This layer continuously processes learner data to identify mastery patterns, misconceptions, and engagement trends [1; 6; 12].

The second layer represents teacher-led pedagogical processes, including conceptual instruction, scaffolding strategies, classroom interaction, motivational support, and ethical supervision. Teachers interpret AI-generated analytics and design targeted interventions for learners requiring additional support [9].

The third layer reflects the learner experience and personalized trajectory. It includes engagement with adaptive tasks, progression through competency-based milestones, and reflective activities that promote self-regulation.

One of the central results of the synthesis is the identification of an optimal division of pedagogical responsibilities between artificial intelligence and human teachers. AI systems demonstrate high effectiveness in continuous performance monitoring, pattern detection, automated feedback provision, difficulty adaptation, and learning outcome prediction [2; 7; 13]. These functions enable scalable micro-level personalization in heterogeneous classrooms.

Teachers, in contrast, demonstrate comparative advantages in explaining abstract informatics concepts, scaffolding metacognitive processes, supporting learner motivation, and managing classroom dynamics [17; 19;]. Furthermore, teachers play a crucial role in contextualizing learning analytics and ensuring pedagogical relevance.

The synthesis further reveals a recurring four-stage structure underlying effective personalized learning trajectories. These stages form a cyclical process that integrates diagnostic assessment, instructional design, adaptive practice, and reflective evaluation. As illustrated in Figure 5, this

cyclical four-stage personalized learning trajectory model visually represents the dynamic interaction between diagnostic assessment, pathway design, hybrid instruction, and mastery validation within an iterative developmental loop.

The first stage involves diagnostic foundation, during which AI systems conduct adaptive assessments to determine learners' initial mastery levels and error patterns, while teachers collect contextual and motivational information. The combined output is a comprehensive learner profile.

The second stage focuses on personalized pathway design. AI systems generate recommended task sequences, while teachers refine these pathways in accordance with curricular and pedagogical objectives.

The third stage consists of hybrid instruction and adaptive practice. Teacher-led explanations are combined with individualized work on adaptive platforms, supported by real-time feedback and dynamic difficulty adjustment.

The fourth stage emphasizes mastery validation and reflective practice. AI systems administer adaptive assessments, teachers evaluate conceptual understanding, and students engage in guided reflection.

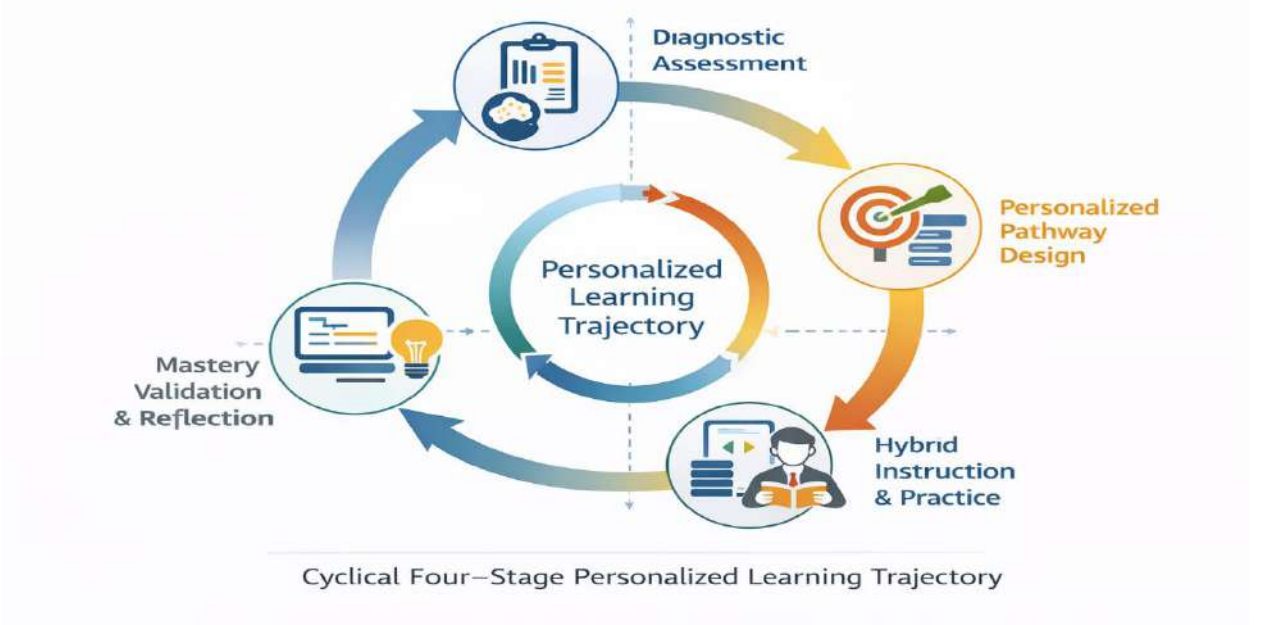


Figure 5. Cyclical four-stage personalized learning trajectory model

An evidence-mapping procedure was conducted to establish theoretical grounding for the proposed framework. This mapping links adaptive programming research [13; 21], personalization meta-analyses [5], differentiation studies [14; 22], and hybrid pedagogy frameworks to specific model components. The convergence of evidence enhances the theoretical reliability of the framework.

Evaluation of projected instructional impact indicates significant benefits for low-achieving learners. The hybrid model reduces cognitive overload through gradual task progression, minimizes error-related frustration through immediate feedback, and strengthens academic self-efficacy through visible mastery milestones. These effects contribute to increased persistence, conceptual understanding, and learner autonomy.

From the teacher's perspective, the framework reduces workload associated with routine assessment and manual differentiation. Automated analytics facilitate early identification of learning difficulties and support data-informed instructional decision-making. Consequently, teachers can focus on individualized coaching and instructional design.

At the classroom level, implementation of the hybrid model promotes inclusive, differentiated, and learner-centered instructional environments. Differentiation becomes systematic, feedback becomes continuous, and instructional processes become more transparent.

Overall, the results demonstrate that hybrid AI–traditional instructional models provide a coherent and theoretically grounded approach to personalized informatics education. The integration of technological precision with human pedagogical expertise establishes conditions for sustainable improvement of learning outcomes.

Discussion

The present study aimed to synthesize contemporary research on artificial intelligence–based adaptive learning systems, personalized instructional frameworks, and differentiated pedagogical practices in order to construct a hybrid model for personalized learning trajectories in middle-school informatics education. The results demonstrate that systematic integration of AI-powered technologies with teacher-led pedagogy creates a balanced instructional environment capable of addressing the diverse cognitive and motivational needs of learners, particularly those exhibiting persistent academic underachievement.

The findings confirm the complementary nature of human and artificial intelligence in educational contexts. AI systems demonstrate strong capacity for micro-level instructional management through continuous monitoring, automated detection of misconceptions, real-time difficulty adjustment, and predictive analytics [1; 7; 12]. These functions enhance instructional responsiveness and enable scalable personalization. Teachers, in contrast, provide essential human elements, including conceptual clarification, motivational scaffolding, socio-emotional support, and ethical oversight [9]. This synergy supports the view of AI as a pedagogical partner rather than a replacement for educators.

The hybrid framework aligns with contemporary theories of learner-centered and mastery-oriented instruction. By delegating routine analytical and assessment tasks to AI systems, teachers are able to focus on higher-order instructional activities, such as facilitating deep conceptual understanding, fostering metacognitive awareness, and supporting learner identity development. This redistribution of instructional labor enhances pedagogical effectiveness and professional autonomy.

One of the most significant implications of the model lies in its potential to promote educational equity. Low-achieving learners are disproportionately affected by delayed feedback, insufficient differentiation, and limited opportunities for mastery. Adaptive learning systems mitigate these disadvantages by providing individualized pathways and continuous formative assessment [12; 13; 14]. In informatics education, where cognitive load increases rapidly due to algorithmic complexity, personalized trajectories enable students to progress at developmentally appropriate rates, thereby reducing frustration and disengagement.

The results also indicate a substantial pedagogical transformation in informatics education. Traditional approaches based on uniform instruction and standardized assessment are increasingly replaced by competency-based progression, adaptive feedback mechanisms, and individualized task sequencing. This transformation aligns with global trends toward digital pedagogy and data-informed teaching practices [8; 16; 21].

From a practical perspective, the hybrid model offers multiple advantages for teachers. Learning analytics enable early identification of conceptual gaps and facilitate targeted interventions. Automated assessment reduces time devoted to routine grading, allowing greater focus on instructional design and individualized coaching. Moreover, systematic use of data supports reflective teaching practices and continuous professional growth.

Low-achieving students benefit from multi-dimensional support embedded within the framework. Gradual task progression reduces cognitive overload, immediate feedback enhances motivation, and teacher-mediated guidance fosters deeper understanding. The interaction of these factors promotes development of self-regulated learning skills, which are essential for sustained success in informatics.

At the institutional level, the model provides administrators with a strategic framework for digital transformation. Integration of adaptive platforms supports systematic monitoring of academic progress, informs professional development planning, and aligns instructional practices with inclusive education policies.

Despite its advantages, several implementation challenges remain. Technological infrastructure limitations, insufficient technical support, and unequal access to devices may constrain consistent platform usage. Teacher readiness represents another critical factor, as many educators lack formal training in AI literacy and data interpretation [23]. Comprehensive professional development programs are therefore essential. Ethical and privacy issues require continuous attention. Adaptive platforms collect sensitive learner data, raising concerns related to security, transparency, and algorithmic bias. The hybrid framework emphasizes teacher mediation and institutional regulation as safeguards against misuse of educational data. Another potential risk involves over-reliance on automated feedback. While AI systems effectively support procedural accuracy, excessive dependence may limit development of critical thinking and conceptual reasoning. Teachers must therefore balance technological support with dialogic and reflective instruction.

Several limitations of the present study must be acknowledged. As a conceptual synthesis, the research lacks primary empirical validation in classroom settings. Differences in national curricula, technological infrastructure, and institutional cultures may affect generalizability. Rapid technological development may also necessitate periodic revision of model components.

These limitations indicate important directions for future research, including experimental validation of hybrid models, longitudinal investigation of learner development, and evaluation of teacher professional development programs. Further studies should also explore integration of generative AI tools for debugging support and metacognitive guidance.

Overall, the discussion demonstrates that hybrid human–AI instructional models represent a viable and theoretically grounded approach to modernizing informatics education. When supported by institutional policy, professional training, and ethical governance, such models can enhance learning quality, promote equity, and foster sustainable pedagogical innovation.

Conclusion

This study developed a comprehensive hybrid instructional framework that integrates artificial intelligence–driven adaptivity with teacher-led pedagogy to support personalized learning trajectories in middle-school informatics education. Through systematic synthesis of selected Scopus- and Web of Science-indexed studies, the research demonstrates that neither purely technological solutions nor exclusively traditional instructional approaches are sufficient to address the diverse cognitive, motivational, and developmental needs of contemporary learners, particularly those exhibiting persistent academic underachievement.

The findings indicate that AI-based adaptive systems provide substantial pedagogical value through continuous learner modelling, real-time feedback, dynamic task sequencing, and predictive analytics. These functions enable micro-level personalization, reduce cognitive overload, and facilitate mastery-oriented progression. At the same time, teachers remain central to effective instruction by delivering conceptual explanations, socio-emotional support, motivational guidance, and ethical supervision. The integration of these complementary strengths forms the foundation of a balanced and sustainable personalized learning environment.

The proposed four-stage personalized learning trajectory, encompassing diagnostic assessment, pathway design, hybrid instruction, and mastery validation, ensures continuous instructional responsiveness and individualized pacing. Through iterative cycles of assessment, adaptation, and reflection, learners receive targeted support aligned with their evolving competencies. This structure promotes autonomy, persistence, and self-regulation, which are essential for long-term success in informatics education. For low-achieving students, the hybrid framework offers an effective mechanism for overcoming learning barriers associated with abstraction, syntax complexity, and problem-solving demands. Immediate feedback reduces error-related frustration, adaptive task progression enhances academic confidence, and teacher-mediated guidance fosters deeper conceptual understanding. As a result, learners are more likely to sustain engagement and develop positive academic self-concepts.

From the perspective of educators, the model reduces workload associated with routine assessment and differentiation while strengthening data-informed instructional decision-making. Teachers are empowered to focus on meaningful pedagogical interactions, individualized coaching, and professional reflection. At the institutional level, the framework supports strategic digital transformation and promotes inclusive education policies.

Despite these advantages, successful implementation requires careful attention to infrastructural readiness, teacher professional development, and ethical governance of educational data. Schools must ensure adequate technological resources, provide sustained training in AI literacy, and establish transparent policies regarding data security and algorithmic accountability.

As a conceptual study, the present research provides a theoretical foundation for subsequent empirical validation. Future investigations should evaluate the effectiveness of hybrid personalized learning trajectories in real classroom settings, examine long-term developmental outcomes, and explore the pedagogical integration of emerging generative AI tools for debugging support, code explanation, and metacognitive guidance.

In conclusion, hybrid integration of artificial intelligence and human pedagogy represents a promising pathway for advancing personalized learning in middle-school informatics. By combining technological precision with professional judgment and ethical responsibility, the proposed model offers a robust approach to enhancing learning quality, promoting educational equity, and preparing students for participation in an increasingly digital society.

References

[1]Kabudi T., Pappas I., Olsen D. AI-enabled adaptive learning systems: A systematic review // Educational Technology. 2021. Vol. 61, No. 4. P. 15–32. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100017

[2]Hariyanto D. Artificial intelligence in adaptive education: A systematic review. Cham: Springer, 2025. 278 p. https://doi.org/10.1007/s44217-025-00908-6

[3]Kara S. Differentiated instruction and academic achievement // Education Review Journal. 2025. Vol. 12, No. 1. P. 44–59. https://doi.org/10.3390/jintelligence13100126

[4]Gunawardena M. Personalized learning: The simple, the complicated, and the complex // Computers & Education. 2024. Vol. 195. Article 104682. https://doi.org/10.1016/j.tate.2023.104429

[5]Yao Y., Zhang L., Chen X., Li H. AI-powered system to facilitate personalized adaptive learning // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 3. P. 1421–1438. https://doi.org/10.3390/app15094989

[6]Ling H.C., Chen Y., Huang S. Learning performance in adaptive learning systems // Frontiers in Psychology. 2022. Vol. 13. Article 842356. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.770637

[7]Yaseen H., Al-Masri R. The moderating role of digital literacy in adaptive learning // Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 5. Article 2341. https://doi.org/10.3390/su17031133

[8]Barbosa P.L., Silva R.M. Adaptive learning in computer science education // Education and Information Technologies. 2024. Vol. 29, No. 2. P. 1873–1894. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100403

[9]Bower M., DeWitt D. AI-enabled teaching models // Australasian Journal of Educational Technology. 2023. Vol. 39, No. 3. P. 1–17.

[10]Holmes W., Tuomi I. Artificial intelligence in education: Promise and reality // OECD Education Working Papers. 2022. No. 266. 54 p.

[11]Luckin R., Holmes W., Griffiths M. Human-centered AI in education // British Journal of Educational Technology. 2021. Vol. 52, No. 6. P. 2123–2141. https://doi.org/10.7275/KXAP-FN13

[12]Hu X. The effect of AI-assisted personalized learning: A meta-analysis // Studies in Educational Evaluation. 2024. Vol. 80. Article 101243. https://doi.org/10.15354/sief.24.re395

[13]Katona J., Katoná Győnyörű K. AI-based adaptive programming education // TechTrends. 2025. Vol. 69, No. 1. P. 95–108. https://doi.org/10.1007/s11528-025-01088-8

[14]Spyropoulou E., Papadakis S. Technology-enhanced differentiation in secondary education // Technium. 2025. Vol. 7, No. 1. P. 112–128. https://doi.org/10.3390/encyclopedia5020071

[15]Peralta-Gamboa R. AI-powered adaptive learning systems in education // International Journal of Innovative Research in Social Sciences. 2025. Vol. 4, No. 2. P. 55–68. https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i4.7961

[16]Casey C. Supporting differentiated instruction in programming education // Computer Science Education. 2018. Vol. 28, No. 4. P. 321–345.

[17]UNICEF. Digital personalized learning in low- and middle-income countries. New York: UNICEF, 2022. 96 p.

[18]Iterbeke K., Van den Noortgate W. Computer-assisted adaptive instruction // Computers in Human Behavior. 2021. Vol. 119. Article 106713. https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106666

[19]Tomlinson C.A. Differentiated instruction: A review // Review of Educational Research. 2020. Vol. 90, No. 2. P. 243–281.

[20]CITE Journal. Technology-enhanced STEM instruction // Contemporary Issues in Technology and Teacher Education. 2024. Vol. 24, No. 2. P. 305–329.

[21]Kemenuh N., Rahman A. AI-based adaptive learning in computer education // Journal of Informatics. 2022. Vol. 16, No. 3. P. 211–224.

[22]Özdemir M., Yıldız E. Blended instruction and student outcomes // Journal of Computer Assisted Learning. 2023. Vol. 39, No. 4. P. 1123–1137.

[23]de Barba P., Kennedy G. Personalization to reduce attrition // Computers & Education. 2020. Vol. 150. Article 103834.