

Торайғыров университетінің
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Торайғыров университета

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ

Физика, математика және компьютерлік
ғылымдар сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Физика, математика
и компьютерные науки
Издается с 1997 года

ISSN 2959-068X

№ 1 (2026)
Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Физика, математика и компьютерные науки
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ91VPY00046988

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области физики, математики,
механики и информатики

Подписной индекс – 76208

<https://doi.org/10.48081/BGQF1881>

Бас редакторы – главный редактор

Глеукинов С. К., *д.ф.-м.н., профессор*

Заместитель главного редактора Испулов Н. А., *к.ф.-м.н., профессор*
Ответственный секретарь Жумабеков А. Ж., *PhD доктор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

<i>Esref Adali</i>	<i>доктор PhD, профессор (Турция);</i>
<i>Qadir Abdul Rahimoon</i>	<i>доктор PhD, профессор (Пакистан);</i>
<i>Акылбеков Э. Т.</i>	<i>д.ф.-м.н., профессор;</i>
<i>Демкин В. П.</i>	<i>д.ф.-м.н., профессор (Российская Федерация);</i>
<i>Дүйшеналиев Т. Б.</i>	<i>д.ф.-м.н., профессор (Российская Федерация);</i>
<i>Жумадилаева А. К.</i>	<i>к.т.н., ассоц. профессор;</i>
<i>Ибраев Н. Х.</i>	<i>д.ф.-м.н., профессор;</i>
<i>Кеңесбеков А. Б.</i>	<i>доктор PhD;</i>
<i>Косов В. Н.</i>	<i>д.ф.-м.н., профессор;</i>
<i>Сеитова С. М.</i>	<i>д.пед.н., профессор;</i>
<i>Сулюбаева Л. Г.</i>	<i>доктор PhD;</i>
<i>Искакова З. С.</i>	<i>(технический редактор)</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на

«Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МАЗМҰНЫ

«КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР» СЕКЦИЯСЫ
СЕКЦИЯ «КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ»
SECTION «COMPUTER SCIENCE»

Yestebek R. N., Adamova A. D.

Housing price dynamics using online listings and macroeconomic indicators in Kazakhstan.....6

Kaibassova D., Akhmetov K.

Interpreting clinical research for disease diagnosis:
a machine learning perspective.....19

Kalinin A. A., Oleynikova A. V., Bashirov A. V., Khanov T.A.

Development of a smart contract solution
for Kazakhstan's energy sector32

Karaca Celal

Prospects for the integration of large language models
into the scientific environment46

Oшибаева А. Е., Мансурова М. Е., Шәкір А. М., Сарсембаева Т. С.

Инсульттан кейінгі реабилитация процесін кинематикалық
және стохастикалық модельдеу арқылы оңтайландыру59

Хабсихова Д. Ж., Айтимова Ұ. Ж., Есиркепова А. У.,

Өтеген Г. Ж., Каракеев Т. Т.
Туристік нысандарды тануда жасанды интеллектті қолдану68

«ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ФИЗИКА» СЕКЦИЯСЫ
СЕКЦИЯ «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА»
SECTION «THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS»

Abbati Zainul Abideen, Abdullahi Ibrahim, Waziri Sagir Lawan,
Sule Nazif Yusuf, Umar Hindatu Idris

Investigation into the potential of using sand for glass making81

Абдуллаева Ж. Б., Заурбекова Н. Д.

Іле Алатауының шығыс бөлігіндегі топырақтың
физикалық-механикалық қасиеттерін эксперименттік зерттеу98

Асембаева М. К., Ақжолова Ә. Ә., Молдабекова М. С., Нургасымова Б.

Үшкомпоненттік газдар жүйесіндегі массатасымалдауға
диффузиялық каналдың сипатты өлшемінің әсері 119

Көшкінбаев С. Ж., Сейтханова А. К., Смайлов Н. К., Ысырайыл Қ. М., Куттыбаева А. Е. Ғарыштық ортада FBG сенсорларының ұзақмерзімді тұрақтылығын зерттеу.....	132
Кубенова М. М., Балапанов М. Х., Кутербекөв К. А., Муханова Ж. А., Мукашева А. Ж. Ионный перенос и концентрационная поляризация в термо-электрических материалах $Li_xCu_{2-y}S$	147
Кули Ж., Бакранов Н. Б., Бакранова Д. И., Мукаш Ж. О. Квантовые точки $BiVO_4$ на поверхности ZnO-нанотрубок: синтез и характеристика $BiVO_4$	166
Курманов А. А., Испулов Н. А., Жумабеков А. Ж., Жанатов А. К. Қозғалмайтын анизотропты ортада электромагниттік толқындардың дисперсиялық теңдеулері мен индикатрисалары туралы.....	178
Қоштыбаев Т. Б., Жантлеуов К. Қ., Камал Б. Ә., Алиева М. Е., Құрбанғалиев Ұ. Б. Спиндік толқындардың макроскоптық және кванттық қасиеттерін зерттеу.....	197
Nurkenov S. A., Zakiyeva Zh. Ye., Kauanova D. A. Modeling Maxwell–Boltzmann gas distributions using Python: temperature and pressure effects.....	219

**«МАТЕМАТИКА ЖӘНЕ СТАТИСТИКА» СЕКЦИЯСЫ
СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИКА И СТАТИСТИКА»
SECTION «MATHEMATICS AND STATISTICS»**

Әбдіжәлел М., Тажиев С., Ермек М., Ережел Д. Жерасты сулары сапасын бағалауда өлшеу белгісіздігінің есебі: Шу трансшекаралық су қойнауы мысалында.....	239
---	-----

**«ОҚУ ПӘНДЕРІН ОҚИТУ ӘДІСТЕМЕСІ» СЕКЦИЯСЫ
СЕКЦИЯ «МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН»
SECTION «METHODS OF TEACHING OF EDUCATIONAL DISCIPLINES»**

Ақылбекова А. Д., Маратова И. М. Физика сабағында геймификацияны қолданудың әдістемелік негіздері мен практикалық жолдары.....	260
--	-----

Искакова А. Б., Әділбек Н. Ж., Зейтова Ш. С. 11-сыныпта толқындық оптика бойынша транспөндік мини-жобаларды ұйымдастырудың әдістемелік ерекшеліктері.....	272
Kudyalina L. M., Sarkytov A. N. Neural networks for automating pedagogical tasks in the educational process.....	287
Трищенко А. А. Оценка развития компетенций учащихся профильных классов в преподавании физики на основе применения методики Л. А. Ясюковой.....	296
Авторлар туралы ақпарат Информация об авторах Information about the authors.....	310
Авторларға арналған ережелер Правила для авторов Rules for authors.....	332
Жарияланым этикасы Публикационная этика Publication ethics.....	344

«КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР» СЕКЦИЯСЫ

SRSTI 28.23.37

<https://doi.org/10.48081/BGQF1884>

***R. N. Yestebek¹, A. D. Adamova²**

^{1,2}Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8073-5263>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7773-9522>

*e-mail: 242954@astanait.edu.kz

HOUSING PRICE DYNAMICS USING ONLINE LISTINGS AND MACROECONOMIC INDICATORS IN KAZAKHSTAN

Understanding the dynamics of housing prices is important for analyzing real estate markets, especially in emerging economies, where official statistics are often limited or published with significant delays. This study provides an empirical basis for modeling housing price dynamics by combining online real estate quotation data with macroeconomic indicators based on the example of the housing market in Kazakhstan. The housing price index is calculated based on the average price per square meter obtained from online ads and normalized to the general base period to ensure time comparability. Key macroeconomic variables, including consumer price inflation and the exchange rate of the US dollar against the tenge, are taken into account along with their lagging values to account for the delayed market reaction. Several time-validated machine learning models are used to analyze the relationship between macroeconomic conditions and housing price dynamics. The results show that nonlinear ensemble methods provide higher efficiency in assessing the short-term dynamics of the housing market. The results demonstrate the practical value of online listing data for building housing price indices and support their use for monitoring and short-term analysis of real estate markets.

Keywords: housing price index, real estate market, online listings, macroeconomic indicators, machine learning, Kazakhstan.

Introduction

The housing market plays an important role in the economic development of the country, affecting household welfare, investment activity and financial stability. Changes in housing prices affect both individual decision-making and macroeconomic dynamics, which makes the analysis of price behavior an important task for researchers and policy makers [1]. In emerging market economies, housing markets often exhibit higher volatility, which increases the need for reliable tools to monitor price movements.

One of the main problems in analyzing the housing market is the limited availability of timely and detailed official statistics. In many countries, including Kazakhstan, official housing price figures are published with significant delays and are often highly aggregated, which limits their use for short-term analysis and applied research [2]. As a result, researchers are increasingly looking for alternative data sources that allow for more flexible and frequent tracking of trends in the real estate market.

In recent years, online real estate listings have become an important source of information about housing markets at the micro level. Advertising data contains detailed characteristics of objects, including location, area, type of housing and asking prices, which makes them suitable for building price indicators and studying market behavior [3]. Previous research has shown that listing-based indexes can provide valuable information about housing price dynamics. However, their application requires careful pre-processing and validation due to problems such as price dispersion and market heterogeneity [4].

The purpose of this study is to analyze the dynamics of housing prices in Kazakhstan using online real estate data combined with key macroeconomic indicators. To ensure comparability over time, a housing price index based on the price per square meter has been calculated. In addition, macroeconomic variables, including inflation and exchange rate dynamics, are taken into account to study their relationship with housing price dynamics. The proposed approach demonstrates the potential of alternative data sources for short-term analysis of the housing market and contributes to the development of empirical tools for real estate research in emerging markets.

Previous research on housing price modeling has used a wide range of methodological approaches, including hedonic pricing models, listing-based indexes, and machine learning methods. Table 1 summarizes the main contributions in this field and highlights the methodological focus of this study in comparison with existing research.

Table 1 – Overview of related studies on housing price modeling

Source	Year	Authors	Proposed approach	Contribution
[1]	2020	Hill R.J., Steurer J., Zucchini W.	Hedonic housing price indices	Modern overview of hedonic index construction
[2]	2013	Eurostat et al.	RPPI methodology	International standards for housing price indices
[3]	2019	Lyons R.C.	Listing vs transaction prices	Empirical validation of listing-based prices
[4]	2021	de Haan J.	Comparison of HPI methods	Review of multilateral index approaches
[5]	2020	Wang X., Chen J., Zhang X.	Listing-based housing price index	Construction of HPI from online advertisements
[6]	2016	Biau G., Scornet E.	Random Forest overview	Ensemble learning for nonlinear prediction
[7]	2013	Natekin A., Knoll A.	Gradient boosting tutorial	Boosting-based prediction framework
[8]	2016	Chen T., Guestrin C.	XGBoost	Scalable gradient boosting implementation
[9]	2018	Prokhorenkova L. et al.	CatBoost	Boosting with categorical features
[10]	2018	Bergmeir C., Hyndman R.J., Koo B.	Time-series cross-validation	Proper validation for temporal prediction

In general, the literature review demonstrates the increasing use of online real estate data and machine learning techniques in housing market analysis, while highlighting the limitations of empirical evidence for emerging market economies. This gap motivates the proposed approach and determines the contribution of this study.

Materials and Methods

Figure 1 illustrates the overall methodological framework of the study. The process starts with the collection of online real estate listings, followed by data preprocessing and construction of a housing price index. Macroeconomic indicators and their lagged values are then incorporated into the modeling stage, where several machine learning methods are applied for analysis and evaluation.

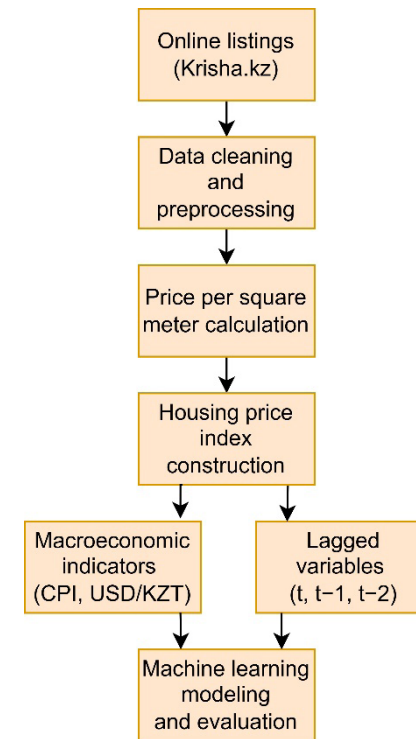


Figure 1 – Methodological framework of the study

The empirical analysis in this study is based on data obtained from an online real estate platform Krisha.kz, which represents the largest residential real estate market in Kazakhstan. Online quotation data is increasingly used in housing market research as an alternative source of information, especially in countries where transaction statistics are limited or published with significant delays. Previous studies have shown that properly processed quotation data can provide significant signals about the dynamics of housing prices and contribute to the construction of price indices [5].

The primary data set consists of 89,968 apartment listings published between May 2020 and January 2026. Since exact publication dates are not available, the time of appearance of each ad was restored using information about the validity period of the ad, which allowed monthly aggregation of observations. Each entry contains the price indicated in the ad, the area of the apartment, the city and a set of structural characteristics of housing, such as the number of rooms, type of building, number of floors, year of construction and condition of the apartment.

In addition, an additional static dataset containing 126,558 apartment sales announcements was used for the preliminary analysis. Although this dataset does not provide reliable time information and therefore cannot be used for dynamic modeling, it provides valuable information about the relationship between housing characteristics and prices indicated in advertisements. A preliminary analysis based on this dataset confirms the choice of price per square meter as the key variable for building the index.

Macroeconomic indicators were obtained from official statistical sources, including the Consumer Price Index published by the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan and the average monthly exchange rate of the US dollar to tenge provided by the National Bank of Kazakhstan. These variables were chosen because of their importance for household purchasing power, inflation dynamics, and housing demand conditions [2].

Before the analysis, the placement data was subjected to standard preprocessing procedures commonly used in housing market research. Duplicate ads were removed, and observations with incorrect prices or improbably small apartment areas were excluded. To ensure comparability of all offers, prices were expressed in a single currency and converted to the price per square meter.

Given the significant heterogeneity of the housing supply, reliable aggregation methods were applied. The monthly housing price figures were calculated using median values, which are less sensitive to extreme observations and data entry errors compared to figures based on averages. The use of the median price per square meter is consistent with international methodological recommendations and the widespread practice of constructing a residential real estate price index [1; 2].

The housing price index was calculated by aggregating the average price per square meter for each month. To ensure consistent comparison over time, the index was adjusted to a base period of 100. This normalization makes it possible to analyze the relative price dynamics over time, rather than absolute price levels.

To prevent the excessive impact of months with an unusually large number of ads, a conservative limit on monthly observations was applied during aggregation. This approach increases the stability of the index while maintaining the main market trend, which is especially important when working with online advertising data [5].

Housing markets tend to adjust to macroeconomic shocks with a delay in time due to institutional constraints and behavioral factors. To reflect this delayed reaction, the analysis included macroeconomic indicators along with their lagging values.

In addition to the current observations, one-month and two-month lagged inflation and exchange rate indicators were constructed. The inclusion of delayed variables makes it possible to identify the effects of delayed transmission between

macroeconomic dynamics and changes in housing prices, which was emphasized in previous empirical studies of housing markets [4].

To analyze the dynamics of housing prices and assess predictive relationships, several machine learning models representing various methodological paradigms were used. Linear regression and elastic mesh have been used as basic specifications due to their interpretability and frequent application in economic research.

In order to account for potential nonlinear relationships and interaction effects, tree-based ensemble methods were additionally implemented. The random forest algorithm, known for its reliability and stability in data sets with interference, was used as a distribution-based algorithm [6]. Gradient boosting has been applied as a sequential learning system capable of capturing complex functional relationships [7]. In addition, XGBoost was used as an efficient and scalable implementation of gradient boosting, which demonstrated high performance in applied forecasting tasks [8]. CatBoost was also considered because of its ability to process heterogeneous characteristics and reduce forecasting error, which is especially important for structured economic data [9].

Given the temporal structure of the dataset, it was possible to avoid accidental splitting into a series of tests. The model was evaluated using validation procedures adapted to time series, including time lapse and cross-validation in an expanding window. This strategy preserves the chronological order and prevents information leakage from future observations into the learning process, which is important for a reliable assessment of the forecast [10].

The effectiveness of the model was assessed using several error measures, including the mean absolute error and the root-mean-square error, to provide a reliable comparison of different modeling approaches.

The proposed methodology combines a listing-based housing price index with macroeconomic indicators and modern machine learning methods. This integrated system allows for flexible short-term analysis in the context of limited official statistics and provides empirical support for monitoring housing market dynamics in emerging economies.

Results and Discussion

Figure 2 shows the normalized dynamics of the housing price index, consumer price inflation (CPI), and the exchange rate of the US dollar against the tenge over the analyzed period. Bringing it to a single database allows you to directly compare the growth rate of indicators measured at different scales.

The results indicate a steady upward trend in housing prices throughout the observed period. On the contrary, the consumer price index shows relatively moderate and smooth growth, while the exchange rate shows noticeable short-term fluctuations without a stable long-term growth trajectory. The discrepancy between housing price dynamics and macroeconomic indicators indicates that

the growth of the housing market cannot be fully explained solely by inflationary pressures or the depreciation of the national currency.

The observed pattern highlights the structural nature of housing price growth, which is apparently influenced not only by macroeconomic conditions, but also by specific market factors such as supply constraints and demand dynamics. The normalized comparison provides clear visual evidence that residential property prices grew at a faster rate than general consumer prices during the analyzed period.

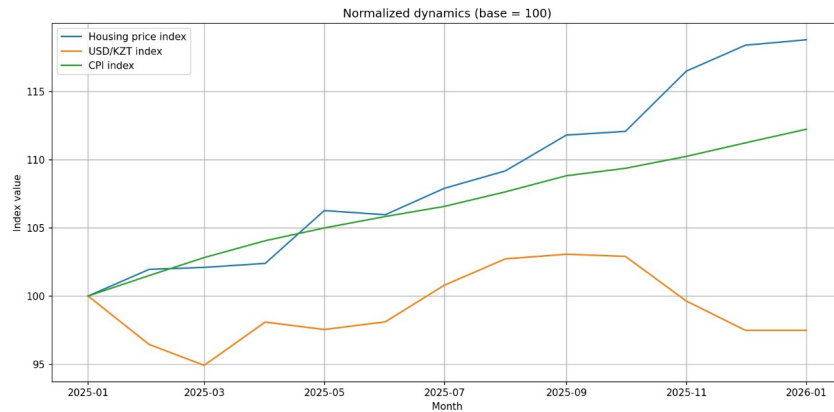


Figure 2 – Normalized dynamics of housing price index, CPI, and USD/KZT

To further explore the relationship between housing prices and macroeconomic conditions, a correlation analysis was performed using both current and delayed macroeconomic variables.

The results show that the closest relationship between housing prices and the exchange rate occurs with a time delay, rather than simultaneously. In particular, the lagging values of the US dollar-tenge exchange rate demonstrate a higher correlation with the housing price index compared to the values for the current period. This conclusion indicates that currency fluctuations are gradually affecting the housing market, reflecting difficulties with adjustment and delayed decision-making by market participants.

On the contrary, consumer price inflation shows a weaker and mostly negative correlation with housing prices. This relationship may reflect the housing affordability effect, in which rising consumer prices limit household purchasing power and partially reduce demand for housing. In general, correlation analysis confirms the importance of taking into account lagging macroeconomic variables when modeling housing market dynamics.

The predictive performance of all evaluated models was assessed using a temporal holdout sample. The comparison of forecasting accuracy is summarized in Table 2.

The results show clear differences across modeling approaches. Linear Regression and Elastic Net demonstrate higher prediction errors, indicating limited ability to capture nonlinear relationships between macroeconomic indicators and housing price dynamics. In contrast, ensemble-based machine learning models consistently achieve lower forecasting errors.

Among all tested methods, Gradient Boosting Decision Trees (GBDT) produce the best overall performance, exhibiting the lowest mean absolute error and root mean squared error. Random Forest, XGBoost, and CatBoost also perform competitively, but their accuracy remains slightly inferior to that of the GBDT model.

Table 2 – Holdout forecasting results

Model	MAE	RMSE	MAPE (%)	sMAPE (%)
GBDT_sklearn	9.38	9.50	7.94	8.28
CatBoost	9.64	9.81	8.17	8.53
RandomForest	9.69	9.82	8.21	8.57
XGBoost	10.35	10.36	8.78	9.18
LinearRegression	10.62	10.96	8.99	9.44
ElasticNet	10.74	11.26	9.09	9.57

Figure 3 shows a comparison of the actual values of the housing price index with the forecasted models during the waiting period. The visual results confirm the quantitative assessment presented in Table 2.

All models tend to underestimate the actual index level, reflecting a strong upward trend in the housing market towards the end of the sample period. However, there are noticeable differences in the predicted behavior. Linear models show the greatest deviations from actual values, while approaches based on aggregate analysis more accurately track market dynamics.

The GBDT model demonstrates the most stable and accurate behavior, providing smoother forecasts and smaller deviations from the observed values. This confirms its excellent ability to capture non-linear interactions between macroeconomic variables and housing prices in a limited sample.

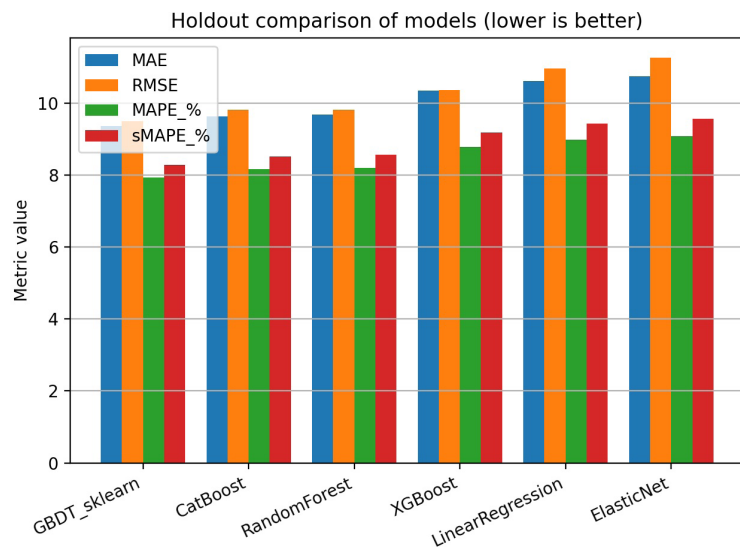


Figure 3 – Holdout comparison of model predictions

Empirical data indicate that the dynamics of housing prices in Kazakhstan during the analyzed period was characterized by steady growth exceeding both inflation and currency fluctuations. The presence of delayed macroeconomic effects highlights the delayed nature of adjustments in the housing market and confirms the need to take into account time dependencies in predictive modeling.

The excellent performance of gradient-enhanced models suggests that non-linear relationships and interaction effects play an important role in explaining housing price dynamics. At the same time, the constant underestimation observed in all models highlights the difficulties of short-term forecasting during periods of accelerated market growth.

The results show that the combination of listing-based housing price indices with macroeconomic indicators and machine learning methods provides an effective basis for short-term analysis of the housing market in the context of limited official statistics.

Conclusion

This study examined the dynamics of housing prices in Kazakhstan using online real estate data combined with key macroeconomic indicators. Given the limited availability and delay in the publication of official housing statistics, the proposed approach demonstrates the practical value of alternative data sources for market analysis.

Based on the median price per square meter, a housing price index was calculated, allowing for consistent aggregation of disparate properties and reliable comparisons over time. Empirical results showed a steady upward trend in residential property prices during the analyzed period, with housing price increases exceeding both consumer inflation and exchange rate fluctuations.

The analysis also confirmed the presence of delayed macroeconomic effects on the housing market. It was found that exchange rate fluctuations have a time lag effect on housing prices, which underscores the importance of taking time dependencies into account when modeling the dynamics of the real estate market. These findings emphasize that current macroeconomic indicators alone are not sufficient to fully explain short-term housing price movements.

A comparison of modeling approaches has shown that nonlinear machine learning methods are superior to linear methods in predicting housing price dynamics. In particular, decision trees with gradient acceleration demonstrated the highest forecasting accuracy, which indicates their suitability for accounting for complex interactions between macroeconomic factors and housing prices in a limited sample.

The results confirm the applicability of listing-based housing price indices and machine learning methods for short-term monitoring of the housing market in emerging economies. The proposed framework can serve as a basis for future research involving longer time frames, additional macro-financial variables, and analysis of housing markets at the regional level.

REFERENCES

- 1 Hill, R. J., Steurer, J., Zucchini, W. Hedonic price indexes for residential housing: A survey, evaluation, and taxonomy // Journal of Economic Surveys. – 2020. – Vol. 34. – № 4. – P. 687–714.
- 2 Eurostat, European Commission, OECD, IMF, World Bank, UNECE. Handbook on Residential Property Price Indices (RPPI) // Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013. – 179 p.
- 3 Lyons, R. C. Can list prices accurately capture housing price trends? Insights from extreme market conditions // Finance Research Letters. – 2019. – Vol. 30. – P. 228–232.
- 4 de Haan, J., van de Laar, R. House Price Indexes: A Comparison of Repeat Sales and Other Multilateral Methods. – 2021. – 32 p.
- 5 Wang, X., Li, K., Wu, J. House price index based on online listing information: The case of China // Journal of Housing Economics. – 2020. – Vol. 50. – Article 101715.

6 **Biau, G., Scornet, E.** A random forest guided tour // TEST. 2016. – Vol. 25. – № 2. – P. 197–227.

7 **Natekin, A., Knoll, A.** Gradient boosting machines: A tutorial // Frontiers in Neurorobotics. – 2013. – Vol. 7. – Article 21.

8 **Chen, T., Guestrin, C.** XGBoost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785–794.

9 **Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., Gulin, A.** CatBoost: Unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2018. – Vol. 31. – P. 6638–6648.

10 **Bergmeir, C., Hyndman, R. J., Koo, B.** A note on the validity of cross-validation for evaluating autoregressive time series prediction // Computational Statistics & Data Analysis. – 2018. – Vol. 120. – P. 70–83.

Received 06.02.26.

Received in revised form 13.02.26.

Accepted for publication 19.03.26.

**Р. Н. Естебек¹, А. Д. Адамова²*

^{1,2}Astana IT University, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

06.02.26 ж. баспаға түсті.

13.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ТҰРҒЫН ҮЙ БАҒАЛАРЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫ ОНЛАЙН ХАБАРЛАНДЫРУЛАР ЖӘНЕ МАКРОЭКОНОМИКАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕР НЕГІЗІНДЕ

Тұрғын үй бағасының динамикасын түсіну жылжымайтын мүлік нарықтарын талдау үшін маңызды, әсіресе ресми статистика жәуі шектелетін немесе айтарлықтай кідірістермен жарияланатын дамушы экономикаларда. Бұл зерттеу Қазақстандағы тұрғын үй нарығы мысалында онлайн жылжымайтын мүлік хабарландырулары деректерін макроэкономикалық көрсеткіштермен ұштастыру арқылы тұрғын үй бағаларының динамикасын модельдеудің эмпирикалық негізін ұсынады. Тұрғын үй бағаларының индексі онлайн хабарландырулардан алынған бір шаршы метрдің орташа бағасы негізінде есептеліп, уақыт бойынша салыстырмалылықты қамтамасыз ету үшін бірыңғай базалық кезеңге нормализацияланды. Нарықтың кешіктірілген реакциясын

ескеру мақсатында негізгі макроэкономикалық айнымалылар, оның ішінде тұтыну бағаларының индексі және АҚШ долларының теңгеге қатысты айырбас бағамы, сондай-ақ олардың лагтық мәндері талдауға енгізілді. Макроэкономикалық жағдайлар мен тұрғын үй бағалары динамикасының өзара байланысын талдау үшін уақыттық валидациядан өткен бірнеше машиналық оқыту модельдері қолданылды. Зерттеу нәтижелері сызықтық емес ансамбльдік әдістердің тұрғын үй нарығының қысқа мерзімді динамикасын бағалауда жоғары тиімділікке ие екенін көрсетті. Алынған нәтижелер тұрғын үй бағалары индекстерін құруда онлайн хабарландырулар деректерінің практикалық маңыздылығын дәлелдейді және оларды жылжымайтын мүлік нарығын мониторингтеу мен қысқа мерзімді талдау үшін қолданудың орындылығын негіздейді.

Кілтті сөздер: тұрғын үй бағаларының индексі, жылжымайтын мүлік нарығы, онлайн хабарландырулар, макроэкономикалық көрсеткіштер, машиналық оқыту, Қазақстан.

**Р. Н. Естебек¹, А. Д. Адамова²*

^{1,2}Astana IT University, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 06.02.26.

Поступило с исправлениями 13.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

ДИНАМИКА ЦЕН НА ЖИЛУЮ НЕДВИЖИМОСТЬ НА ОСНОВЕ ОНЛАЙН-ОБЪЯВЛЕНИЙ И МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В КАЗАХСТАНЕ

Понимание динамики цен на жильё имеет важное значение для анализа рынков недвижимости, особенно в условиях развивающихся экономик, где официальная статистика зачастую ограничена либо публикуется с существенными временными задержками. В данной работе предлагается эмпирический подход к моделированию динамики цен на жильё на основе объединения данных онлайн-объявлений о продаже недвижимости с ключевыми макроэкономическими показателями на примере рынка жилья Республики Казахстан. Индекс цен на жильё рассчитывается на основе средней цены одного квадратного метра, полученной из онлайн-объявлений, и нормализуется к базовому периоду для обеспечения сопоставимости во времени.

В анализ включены основные макроэкономические переменные, в том числе индекс потребительских цен и обменный курс доллара США к тенге, а также их лагированные значения, что позволяет учитывать отложенную реакцию рынка недвижимости на макроэкономические изменения. Для анализа взаимосвязи между макроэкономическими условиями и динамикой цен на жильё используются несколько моделей машинного обучения с временной валидацией. Полученные результаты показывают, что нелинейные ансамблевые методы обладают более высокой эффективностью при оценке краткосрочной динамики рынка жилья. Результаты исследования подтверждают практическую ценность данных онлайн-объявлений для построения индексов цен на жильё и обосновывают их использование для мониторинга и краткосрочного анализа рынков недвижимости.

Ключевые слова: индекс цен на жильё, рынок недвижимости, онлайн-объявления, макроэкономические показатели, машинное обучение, Казахстан.

SRSTI 20.53.19

<https://doi.org/10.48081/BGQF1886>

D. Kaibassova¹, *K. Akhmetov²

^{1,2}Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8410-7758>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5488-0329>

*e-mail: 242853@astanait.edu.kz

INTERPRETING CLINICAL RESEARCH FOR DISEASE DIAGNOSIS: A MACHINE LEARNING PERSPECTIVE

This review article examines the intersection of clinical research interpretation and machine learning in disease diagnosis. By synthesizing current literature, the paper outlines how diverse clinical data, including electronic health records, medical imaging, and laboratory results, are harnessed through various machine learning approaches. Emphasis is placed on deep learning architectures, such as recurrent and convolutional neural networks, which have demonstrated promising results in early detection and predictive modeling of diseases.

The review presents key case studies, including applications in diabetic retinopathy detection, pneumonia diagnosis, and heart failure prediction, while discussing the benefits and challenges associated with data heterogeneity, model interpretability, and computational scalability.

Finally, the article highlights future research directions that focus on data integration, transfer learning, and the development of explainable AI frameworks, aiming to bridge the gap between innovative computational methods and their practical deployment in clinical settings.

Keywords: Machine Learning; Artificial Intelligence; Clinical Research; Diagnosis; Disease Diagnosis; Deep Learning; Electronic Health Records; Medical Imaging; Predictive Modeling; Explainable AI; Scalability; Neural Networks.

Introduction

The rapid growth of clinical data and advancements in computational methods have opened new avenues for enhancing disease diagnosis. Traditional diagnostic practices are increasingly complemented by machine learning techniques, which are capable of uncovering complex patterns within diverse clinical datasets. For example, Obermeyer and Emanuel's article [1] highlights how big data and predictive analytics are transforming clinical medicine, while Rajkomar, Dean,

and Kohane's work [2] demonstrates the practical integration of machine learning into clinical workflows to improve patient outcomes.

This review aims to provide a concise yet comprehensive overview of the current landscape at the intersection of clinical research and machine learning. By synthesizing insights from established studies, including early investigations into feature learning [3] and advanced predictive modeling [4], the article sets the stage for further exploration in this field as part of a broader dissertation effort.

Materials and methods

The field of machine learning in healthcare has experienced significant growth over the past decade, driven by the increasing availability of large-scale clinical datasets and advances in computational methods. Early work in this area demonstrated that machine learning techniques could effectively process and interpret diverse clinical data, thereby enhancing disease diagnosis and patient care.

A landmark study by Choi et al. [5] introduced the Doctor AI framework, which utilizes recurrent neural networks (RNNs) to predict clinical events based on sequential patient data. A notable contribution of this work is the demonstration of the benefits of pre-training. Specifically, as illustrated in Figure 1 from the Doctor AI article, pre-training on a large dataset substantially improves performance on smaller datasets yielding more than a 10 % enhancement compared to training solely on limited data. This finding highlights the potential of transfer learning techniques in clinical applications, where data availability can vary significantly.

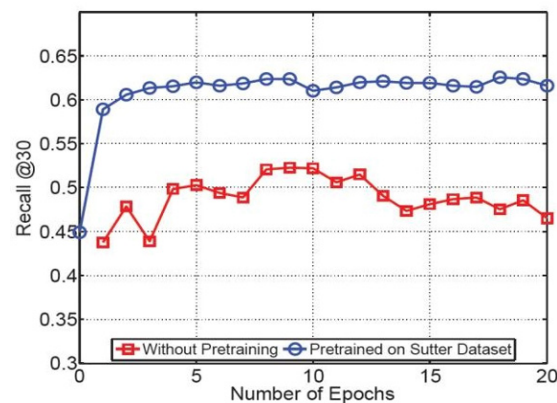


Figure 1

Figure 1: The impact of pre-training on improving the performance on smaller datasets. In the first experiment, firstly the model was trained on a small dataset (red curve). In the second experiment, the model pre-training on large dataset

and it was used for initializing the training of the smaller dataset. This procedure results in more than 10% improvement in the performance.

Building on these insights, Miotto et al. [3] provided a comprehensive review of deep learning applications in healthcare. Their work not only outlined the various opportunities that these advanced algorithms offer such as enhanced diagnostic accuracy and automated feature extraction – but also discussed the challenges that remain, including data heterogeneity, the need for interpretable models, and issues related to model generalizability. This balanced perspective is crucial for understanding the practical implications of deploying machine learning in clinical settings.

Additionally, Ching et al. [6] elaborated on both the opportunities and obstacles for deep learning in biology and medicine, emphasizing the critical role of model interpretability and robust data integration in facilitating clinical implementation.

Complementing these reviews, Obermeyer and Emanuel [1] explored the transformative potential of big data and predictive analytics in clinical medicine. They argued that the integration of massive datasets with sophisticated machine learning algorithms could fundamentally alter diagnostic processes and improve patient outcomes. This notion is further supported by Rajkomar et al. [2], who reviewed the integration of machine learning into routine clinical practice. Their analysis emphasized the importance of developing robust and scalable models that not only perform well on benchmark datasets but also maintain reliability when deployed in real-world healthcare environments.

The domain of medical imaging has also benefited from deep learning advances. Litjens et al. [5] surveyed the use of convolutional neural networks (CNNs) in medical image analysis, illustrating how these methods have led to breakthroughs in tasks such as tumor detection and organ segmentation. Similarly, Gulshan et al. [7] demonstrated the clinical viability of deep learning by developing an algorithm for diabetic retinopathy detection that achieved performance levels comparable to those of human experts.

Finally, Shickel et al. [8] expanded the scope of machine learning applications by focusing on electronic health record (EHR) analysis. Their survey of deep learning techniques in EHR data emphasized the promise of these methods for patient risk stratification and outcome prediction, further reinforcing the growing influence of machine learning in modern clinical research.

Together, these studies illustrate a dynamic and evolving landscape where machine learning is progressively transforming the interpretation of clinical research. The integration of various algorithmic approaches from RNNs to CNNs and beyond underscores the field's potential to significantly enhance diagnostic accuracy and improve patient outcomes.

Clinical research and data in disease diagnosis

Clinical research is the cornerstone of evidence-based medicine, generating diverse datasets that inform disease diagnosis and treatment. Clinical studies – ranging from randomized controlled trials to observational and cohort studies produce structured and unstructured data. These data include electronic health records (EHRs), laboratory results, clinical notes, and imaging studies, all of which are critical for developing predictive models and diagnostic tools.

A major component of clinical research data is the information captured in EHRs. EHRs provide longitudinal patient data that include demographic information, diagnoses, medications, laboratory test results, and clinical narratives. For instance, the «Deep Patient» study by Miotto et al. [4] demonstrated the potential of unsupervised representation learning on EHR data, highlighting how complex patterns in patient histories can be leveraged for early disease prediction. Similarly, Shickel et al. [8] reviewed deep learning techniques applied to EHR analysis, underscoring both the promise and the challenges in extracting actionable insights from inherently heterogeneous data.

Medical Imaging and Laboratory Data in Disease Diagnosis

Medical imaging represents another vital data source in clinical research. Techniques such as computed tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI), and digital fundus photography generate high-resolution images that are used in the detection and diagnosis of various diseases. Litjens et al. [5] provided a comprehensive survey of deep learning applications in medical image analysis, illustrating how convolutional neural networks (CNNs) have been instrumental in tasks like tumor detection and organ segmentation. In a related study, Gulshan et al. [7] developed a deep learning algorithm for diabetic retinopathy detection, achieving performance levels on par with human experts, thereby affirming the clinical utility of advanced imaging analytics.

Recent advances in optical imaging techniques have further enriched the diagnostic toolkit. As discussed in [9], modern computer optics methods improve image contrast and resolution while reducing noise, which enhances the ability to detect subtle tissue anomalies. These improvements not only complement conventional imaging modalities such as CT and MRI but also facilitate more accurate segmentation and feature extraction, thereby bolstering the performance of machine learning algorithms in early disease detection.

Beyond EHRs and imaging, clinical research also encompasses data from laboratory tests and genomic studies, which contribute to a more nuanced understanding of disease mechanisms. The integration of these varied data types poses significant challenges. Data heterogeneity stemming from differences in collection protocols, measurement standards, and data formats requires rigorous

preprocessing and normalization. Effective data integration is essential to build robust machine learning models that can generalize across diverse patient populations.

Challenges and Importance of Data Quality in Clinical Research

The importance of data quality cannot be overstated. Inaccuracies or missing values in clinical datasets can significantly affect the performance of predictive models. Researchers have emphasized the need for meticulous data curation processes, including feature extraction, imputation techniques, and validation strategies, to ensure that the models built on these datasets are reliable. As highlighted in various studies, the successful application of machine learning in disease diagnosis relies not only on algorithmic advances but also on the integrity and representativeness of the underlying data.

The data derived from clinical research forms the backbone of modern diagnostic approaches. By combining EHR data, medical imaging, laboratory results, and genomic information, researchers can develop sophisticated machine learning models that enhance diagnostic accuracy and patient outcomes. However, challenges such as data heterogeneity, quality assurance, and integration remain critical hurdles. Addressing these issues through advanced data preprocessing and integration techniques will be essential for the continued success of machine learning applications in clinical diagnostics.

Machine learning approaches in healthcare

Machine learning (ML) has become a driving force in healthcare, offering new ways to interpret complex clinical data and improve disease diagnosis. At its core, ML in healthcare encompasses a spectrum of algorithms, ranging from traditional methods such as Random Forests [10] and Support Vector Machines [11] to advanced deep learning architectures, including Convolutional Neural Networks (CNNs) and Recurrent Neural Networks (RNNs) [12], [5]. The choice of algorithm often depends on the nature of the clinical data – be it structured health records, time-series information, or high-dimensional medical images.

A key advantage of deep learning lies in its ability to automatically extract features from raw data without extensive manual preprocessing. CNNs, for instance, excel at analyzing spatial patterns in medical imaging, which has led to breakthroughs in tumor detection and segmentation [5]. On the other hand, RNNs and their variants (e.g., LSTM, GRU) are well-suited for modeling temporal patterns in sequential data, making them highly relevant for tasks such as early disease detection and clinical event prediction [5], [13]. These architectures can handle the chronological progression of patient histories, identifying subtle signals that might indicate an impending health issue.

Recurrent Neural Networks in Disease Prediction

One illustrative example of an RNN application is found in the study by Choi et al. [13], which investigated the early detection of heart failure onset using Gated

Recurrent Units (GRUs). In their experiments, baseline models (e.g., Logistic Regression, SVM, MLP, KNN) were compared against GRU-based approaches under different observation and prediction windows.

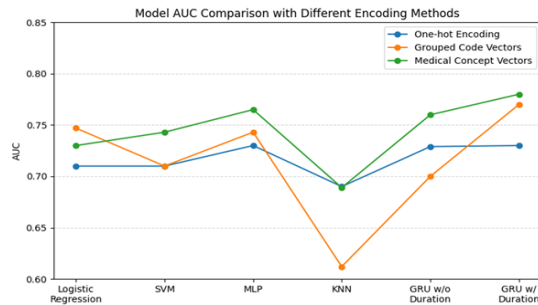


Figure 2

Figure 2: Heart failure prediction performance of the GRU and baseline models using a 12-month observation window and a 6-month prediction window. The GRU model achieved the highest AUC of 0.883, outperforming traditional methods and demonstrating the efficacy of medical concept vectors.

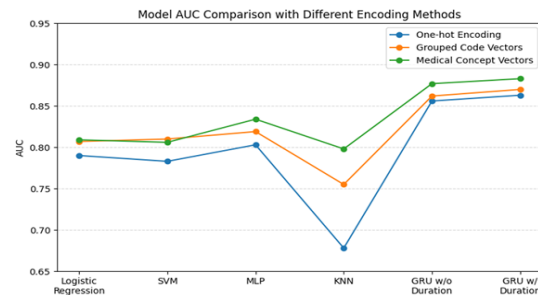


Figure 3

Figure 3: When the observation window was extended to 18 months with a zero-prediction window, the GRU model continued to surpass other approaches, again reaching 0.883 AUC. Models trained with medical concept vectors also outperformed those trained with grouped code vectors.

The study further examined computational efficiency and scalability. The Table 1 shows the time required to make a prediction for a single patient for each model [13].

Table 1

Performance metric	Prediction time (seconds)
Logistic regression	0.000002
SVM	0.000034
MLP	0.000259
KNN	36.66
GRU	0.020408

Prediction Time (Table I): Logistic Regression, SVM, MLP, and KNN required only fractions of a second for inference, while GRU models took slightly longer due to their recurrent structure. However, the increase in prediction time was offset by the substantial gain in accuracy.

Challenges and Future Directions in Machine Learning for Healthcare

Those findings underscore a broader trend in healthcare ML: deeper architectures, though more computationally intensive, can yield significantly improved predictive performance, especially when trained on rich clinical data. Yet, challenges remain. Interpretability is essential in medical contexts, where clinicians need to trust and understand model outputs. Efforts to develop explainable models – such as feature attribution methods, rule-based approximations, or integrated attention mechanisms – are increasingly important [14]; [15]; [16]. Additionally, researchers must address issues of data heterogeneity, privacy, and bias to ensure that these algorithms benefit diverse patient populations.

Machine learning approaches – ranging from classical ensemble methods to deep learning – have demonstrated strong potential for improving diagnostic accuracy and patient outcomes. RNN-based methods, in particular, excel at modeling the temporal dynamics inherent in clinical data, making them powerful tools for early disease detection. As the field progresses, combining technical innovations with interpretability and robust data practices will be crucial for fully realizing the promise of ML in healthcare.

Results and discussion

One of the earliest success stories in applying machine learning to medical imaging is the detection of diabetic retinopathy from retinal fundus photographs. Gulshan et al. [7] demonstrated that a deep learning algorithm could match or exceed human expert performance, paving the way for broader applications of computer vision in clinical settings. Another prominent example is pneumonia detection from chest X-rays, where Rajpurkar et al. [17] used convolutional neural networks to achieve radiologist-level performance. Furthermore, a systematic review and meta-analysis by Liu et al. [18] compared deep learning performance against healthcare professionals in detecting diseases from medical imaging, reinforcing the potential of AI-driven approaches in clinical diagnostics.

Beyond imaging, machine learning has also shown promise in predictive modeling with electronic health records (EHRs). For instance, Choi et al. [13] employed recurrent neural networks for early detection of heart failure onset, outperforming traditional methods in accuracy and timeliness. Similarly, Miotto et al. [4] explored unsupervised representation learning on large EHR datasets, revealing hidden patient phenotypes that could forecast disease trajectories. These diverse case studies underscore the versatility of machine learning in tackling different clinical tasks, from diagnosing acute conditions to predicting long-term patient outcomes. They also highlight ongoing challenges – such as ensuring model interpretability, managing heterogeneous data sources, and integrating predictive algorithms into clinical workflows, which remain active areas of research and development.

Challenges, limitations, and future directions

While machine learning has demonstrated impressive potential in enhancing disease diagnosis, several challenges must be addressed for its effective clinical integration. One major hurdle is data heterogeneity. Clinical datasets are often collected from diverse sources with varying standards, formats, and quality, which can lead to inconsistencies and bias in model training. The lack of standardized protocols complicates the aggregation and preprocessing of data, making it challenging to build robust and generalizable models.

Another critical limitation is the interpretability of advanced machine learning models. Deep learning architectures, despite their high accuracy, are frequently considered “black boxes” due to their complex internal representations. This lack of transparency raises concerns in clinical settings, where understanding the rationale behind a diagnosis is essential for clinicians’ trust and informed decision-making. Consequently, there is a growing need for explainable AI techniques that can provide clear, actionable insights from model predictions.

Privacy and data security further constrain the adoption of machine learning in healthcare. The sensitive nature of patient data necessitates rigorous anonymization and data protection measures, which can restrict data sharing and limit the scale of available datasets. Additionally, the computational demands of training sophisticated models can pose practical challenges, particularly in resource-limited clinical environments.

Future Directions and Solutions

Looking forward, future research should focus on developing methodologies to mitigate these challenges. Enhancing data integration through transfer learning and domain adaptation may help bridge the gap between heterogeneous datasets. Moreover, investing in explainable AI frameworks, such as attention mechanisms and feature attribution methods, will be vital for fostering clinical trust. Interdisciplinary collaboration among data scientists, clinicians, and policymakers

is essential to establish guidelines and best practices for model development, validation, and deployment.

By addressing these challenges and exploring these future directions, the full potential of machine learning in clinical diagnostics can be more effectively realized, ultimately leading to improved patient care and outcomes.

Conclusion

The integration of machine learning with clinical research marks a pivotal advancement in the field of disease diagnosis. As demonstrated by case studies such as those by Gulshan et al. [7] and Rajpurkar et al. [17], as well as comprehensive reviews by Miotto et al. [3] and Shen et al. [19], leveraging diverse data sources from electronic health records and medical imaging to laboratory results coupled with advanced algorithms like recurrent and convolutional neural networks can significantly enhance diagnostic accuracy and patient outcomes.

Key case studies have underscored the practical benefits of these techniques. Deep learning models have not only matched human expert performance in imaging tasks but have also shown promise in early detection scenarios, such as predicting heart failure onset [13]. Moreover, Shen et al. [19] provide compelling evidence that robust deep learning frameworks can revolutionize medical image analysis by improving both the accuracy and reliability of diagnostic systems.

However, the review also identifies critical challenges that need addressing. Data heterogeneity, issues of model interpretability, and computational demands remain significant barriers to widespread clinical adoption. To overcome these obstacles, future research should focus on enhancing data integration through methods like transfer learning, developing explainable AI frameworks, and fostering interdisciplinary collaboration among clinicians, data scientists, and policymakers.

In summary, while current advancements provide a strong foundation, ongoing efforts are essential to refine these approaches and fully realize the benefits of machine learning in healthcare. This review serves as a starting point for further research aimed at bridging the gap between advanced computational methods and practical, trustworthy clinical applications.

REFERENCES

- 1 **Obermeyer, Z., Emanuel, E. J.** Predicting the future – Big data, machine learning, and clinical medicine // The New England Journal of Medicine, 2016, 375(13). – P. 1216–1219. – <https://doi.org/10.1056/NEJMp1606181>
- 2 **Rajkomar, A., Dean, J., & Kohane, I.** Machine learning in medicine // The New England Journal of Medicine, 2019. – 380. – P. 1347–1358. – <https://doi.org/10.1056/NEJMra1814259>

3 Miotto, R., Wang, F., Wang, S., Jiang, X., & Dudley, J. T. Deep learning for healthcare: Review, opportunities and challenges // Briefings in Bioinformatics, 2017, 18(5), P. 742–755. – <https://doi.org/10.1093/bib/bbx044>

4 Miotto, R., Li, L., Kidd, B. A., & Dudley, J. T. Deep Patient: An Unsupervised Representation to Predict the Future of Patients from the Electronic Health Records // Scientific Reports, 2016. – 6. – 26094. – <https://doi.org/10.1038/srep26094>

5 Ching, T., Himmelstein, D. S., Beaulieu-Jones, B. K., et al. Opportunities and obstacles for deep learning in biology and medicine // Journal of The Royal Society Interface. – 2018. – 15(141). – 20170387. – <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0387>

6 Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., van der Laak, J. A. W. M., van Ginneken, B., Sánchez, C. I. A survey on deep learning in medical image analysis // Medical Image Analysis, 2017. – 42. – P. 60–88. – <https://doi.org/10.1016/j.media.2017.07.005>

7 Gulshan, V., et al. Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs // JAMA, 2016, 316(22). – P. 2402–2410. – <https://doi.org/10.1001/jama.2016.17216>

8 Shickel, B., Tighe, P. J., Bihorac, A., & Rashidi, P. Deep EHR: A survey of recent advances in deep learning techniques for electronic health record analysis // IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2018. – 22(5). – P. 1589–1604. – <https://doi.org/10.1109/JBHI.2017.2767063>

9 Kaibassova, D., Nurtay, M., Tau, A., Kissina, M. Fine-tuning the hyperparameters of pretrained models for solving multiclass classification problems // Computer Optics. – 2022. – 46(6). – P. 971–979. – <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1078>

10 Breiman, L. Random forests // Machine Learning. – 2001. – 45(1). – P. 5–32. – <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

11 Cortes, C., & Vapnik, V. Support-vector networks // Machine Learning. – 1995. – 20(3). – P. 273–297. – <https://doi.org/10.1007/BF00994018>

12 Gönen, M., & Alpaydm, E. Multiple kernel learning algorithms // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – 12. – P. 2211–2268. [Electronic resource]. – <http://www.jmlr.org/papers/volume12/gonen11a/gonen11a.pdf>

13 Choi, E., Schuetz, A., Stewart, W. F., & Sun, J. Using recurrent neural networks for early detection of heart failure onset // Journal of the American Medical Informatics Association. – 2017. – 24(2). – P. 361–370. – <https://doi.org/10.1093/jamia/ocw112>

14 Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. A unified approach to interpreting model predictions // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – 30. – P. 4765–4774. [Electronic resource]. – <https://papers.nips.cc/paper/7062-a-unified-approach-to-interpreting-model-predictions.pdf>

15 Nazir, S., Dickson, D. M., & Akram, M. U. Survey of explainable artificial intelligence techniques for biomedical imaging with deep neural networks // Computers in biology and medicine. – 2023. – 156. – P. 106668. – <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.106668>

16 Tjoa, E., & Guan, C. A Survey on explainable Artificial Intelligence (XAI): Toward medical XAI // IEEE transactions on neural networks and learning systems. – 2021. – 32(11). – P. 4793–4813. – <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.3027314>

17 Rajpurkar, P., Irvin, J., Zhu, K., Yang, B., Mehta, H., Duan, T., Ding, D., Bagul, A., Langlotz, C., Shpanskaya, K., Lungren, M. P., Ng, A. Y. CheXNet: Radiologist-level pneumonia detection on chest x-rays with deep learning // arXiv preprint, 2017. – arXiv:1711.05225. – <https://arxiv.org/abs/1711.05225>

18 Liu, X., Faes, L., Kale, A. U., et al. A comparison of deep learning performance against health-care professionals in detecting diseases from medical imaging: A systematic review and meta-analysis // The Lancet Digital Health, 2019. – 1(6). – P. e271–e297. – [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(19\)30123-2](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(19)30123-2)

19 Shen, D., Wu, G., & Suk, H.-I. Deep learning in medical image analysis // Annual Review of Biomedical Engineering. – 2017. – 19. – P. 221–248. – <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071516-044442>.

Received 13.01.26.

Received in revised form 0.02.26.

Accepted for publication 19.03.26.

Д. Кайбасова¹, *К. Ахметов²

^{1,2}Astana IT University, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

13.01.26 ж. баспаға түсті.

03.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АУРУЛАРДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУ ҮШІН КЛИНИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРДІ ТҮСІНДІРУ: МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ КӨЗҚАРАСЫ

Бұл шолу мақаласы клиникалық зерттеулерді түсіндіру мен машиналық оқытудың ауруларды диагностикалаудағы тоғысатын тұстарын зерттейді. Қазіргі әдебиеттерді талдау арқылы электрондық денсаулық жазбалары, медициналық бейнелеу және зертханалық нәтижелер сияқты әртүрлі клиникалық деректер машиналық оқыту жүйелерінде қалай қолданылатыны жан-жақты

қарастырылады. Шолудың жаңалығы – бар зерттеулерді жүйелі түрде біріктіріп, сыни тұрғыдан бағалауында, әсіресе рекуррентті және конволюциялық нейрондық желілерді қоса алғанда, терең оқыту архитектураларының ерте анықтау мен ауруларды болжау үлгілеріндегі әлеуетін көрсетуінде.

Қарастырылған негізгі мысалдар қатарына диабеттік ретинопатияны анықтау, өкпе қабынуын диагностикалау және жүрек жеткіліксіздігін болжау кіреді. Мақалада сонымен қатар деректердің әртүрлілігі, модельді түсіндіру мүмкіндігі және есептеу тиімділігі сияқты маңызды мәселелер де талқыланады, клиникалық қолдану тұрғысынан теңгерімді көзқарас ұсынады.

Соңында, болашақ зерттеулердің бағыттары ұсынылады, олар деректерді біріктіру стратегияларын жетілдіру, трансферлік оқыту әдістерін пайдалану және түсіндірілуі мүмкін жасанды интеллект құрылымдарын дамыту маңыздылығына баса назар аударады. Бұл бағыттар дамыған есептеу әдістері мен олардың клиникалық ортада сенімді қолданылуы арасындағы алиақтықты жоюға бағытталған.

Кілтті сөздер: *Машиналық оқыту; Жасанды интеллект; Клиникалық зерттеулер; Диагностика; Ауруларды диагностикалау; Терең оқыту; Электрондық денсаулық жазбалары; Медициналық бейнелеу; Болжау модельдері; Түсіндірілуі мүмкін жасанды интеллект; Масштабталу мүмкіндігі; Нейрондық желілер.*

Д. Кайбасова¹, *К. Ахметов²

^{1,2}Astana IT University, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 13.01.26.

Поступило с исправлениями 03.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КЛИНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ: ВЗГЛЯД С ПОЗИЦИИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Данный обзорный материал исследует пересечение интерпретации клинических исследований и машинного обучения в диагностике заболеваний. На основе анализа современной литературы представляется комплексный обзор того, как различные клинические данные – такие как электронные медицинские записи, медицинская визуализация и лабораторные

результаты – используются в рамках различных алгоритмов машинного обучения. Новизна обзора заключается в системной интеграции и критической оценке существующих исследований, с особым акцентом на архитектуры глубокого обучения, включая рекуррентные и сверточные нейронные сети, которые продемонстрировали значительный потенциал в раннем выявлении и прогностическом моделировании заболеваний. Ключевые рассматриваемые примеры включают применение технологий в выявлении диабетической ретинопатии, диагностике пневмонии и прогнозировании сердечной недостаточности. В статье также обсуждаются важные проблемы, такие как неоднородность данных, интерпретируемость моделей и масштабируемость вычислений, предлагая взвешенную оценку практической применимости в клинической практике. Наконец, предложены направления для будущих исследований, с акцентом на улучшенные стратегии интеграции данных, использование методов трансферного обучения и развитие интерпретируемого искусственного интеллекта. Эти направления направлены на сокращение разрыва между передовыми вычислительными методологиями и их надежным внедрением в клиническую практику.

Ключевые слова: *Машинное обучение; Искусственный интеллект; Клинические исследования; Диагностика; Диагностика заболеваний; Глубокое обучение; Электронные медицинские записи; Медицинская визуализация; Прогностическое моделирование; Интерпретируемый искусственный интеллект; Масштабируемость; Нейронные сети.*

**A. A. Kalinin¹, *A. V. Oleynikova²,
A. V. Bashirov³, T. A. Khanov⁴**

^{1,2}Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda;

^{3,4}Karaganda University of Kazpotreboyzuz,
Republic of Kazakhstan, Karaganda

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4699-7240>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6387-3568>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1275-8989>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4288-699X>

*e-mail: alla_ole@mail.ru

DEVELOPMENT OF A SMART CONTRACT SOLUTION FOR KAZAKHSTAN'S ENERGY SECTOR

This article presents the development of a blockchain-based smart contract aimed at addressing key issues in Kazakhstan's energy sector. The research demonstrates the effectiveness of blockchain technology in automating energy transactions and improving transparency, security, and efficiency in the industry. A smart contract prototype was designed on the Ethereum platform using the Solidity language to automate electricity supply agreements, including energy delivery recording, payment handling, and tariff management. The contract was developed with consideration of local regulatory and infrastructure specifics and incorporates features like role-based access control and automatic enforcement of penalties for overuse. The proposed solution was thoroughly tested for functionality and security. The results show that the smart contract operates reliably under various scenarios and can significantly streamline settlements between energy providers and consumers, reduce operational costs, and increase trust. The scientific novelty of the work lies in adapting smart contract technology to the conditions of Kazakhstan's energy market. The practical significance is that energy companies and regulators can implement this blockchain solution to enhance efficiency and transparency. The findings provide a foundation for further digitalization of the energy sector, including future integration of renewable energy sources and development of decentralized energy markets.

*Keywords: blockchain, smart contract, Ethereum, energy sector,
energy market.*

Introduction

The modern energy industry faces numerous challenges, including inefficient resource management, high transactional costs, insufficient transparency in settlements, and the need for process automation. In Kazakhstan, where the energy sector plays a key role in the economy, these issues are pronounced. The country's power system comprises over 120 power plants (dominated by coal-fired stations producing about 70 % of electricity), but aging infrastructure means actual available capacity is significantly lower than installed capacity. There are also regional imbalances in generation and constraints in transmission capacity, leading to losses and reliability concerns. Furthermore, the integration of renewable energy sources remains low (around 3–4 % of generation), and existing tariff regulations often fail to incentivize new investments. Similar conclusions were drawn by local researchers analyzing Kazakhstan's energy transition dynamics [1]. These factors contribute to inefficiencies and highlight the need for innovation in the energy sector. This problem has also been discussed in national reports on Kazakhstan's energy digitalization and blockchain readiness.

One of the promising solutions to address such issues is the use of blockchain technology and smart contracts, which can automate transactions between market participants while ensuring security, transparency, and trust. Globally, there is growing interest in decentralized technologies in the energy domain. Pilot projects (for example, Power Ledger in Australia and LO3 Energy's Brooklyn Microgrid in the USA) have demonstrated the potential of blockchain-based peer-to-peer energy trading, smart metering, and automated payments [2]. These projects show that by using smart contracts, consumers and producers can directly trade energy in a secure and transparent manner, reducing the need for intermediaries. In Kazakhstan, which is actively developing renewable energy and digital solutions, such approaches could optimize interactions between electricity producers, suppliers, and consumers.

The aim of this research is to develop a smart contract solution for Kazakhstan's energy sector that automates settlement processes and increases the transparency of transactions. To achieve this aim, several objectives were addressed: analyzing the Kazakh energy market to identify key problems that smart contracts can solve; studying existing blockchain solutions in the energy sector to determine the optimal platform for implementation; developing an architecture and logic for the smart contract tailored to local market specifics; building a prototype on the chosen blockchain platform; and conducting testing to evaluate the effectiveness of the proposed solution. The object of the study is

the interaction processes among participants in Kazakhstan's electricity market that could be optimized via smart contracts, and the subject of the study is the methods and technologies for developing such smart contracts for the energy sector.

The scientific novelty of this work lies in adapting blockchain smart contract technology to the specific regulatory, infrastructural, and market conditions of Kazakhstan's energy sector. Unlike generic solutions, the developed contract is designed with local electricity market rules and integration with existing metering/billing systems in mind. The practical significance of the research is that the resulting smart contract can be adopted by energy companies to automate payment settlements, reduce operational costs, and strengthen trust among market participants. The work combines methods such as literature analysis and review of international experience, business process modeling, software development in Solidity (a smart contract programming language), and testing in a simulated environment.

Materials and methods

Kazakhstan's Energy Sector Challenges: The energy sector of Kazakhstan is a complex system that has undergone significant changes in the decades since independence. Today, it is characterized by a number of challenges. Firstly, the sector suffers from inefficient resource management and losses: a considerable portion of generation capacity is old and inefficient, leading to high transmission losses and frequent maintenance issues. Secondly, there are high transactional and operational costs, partly due to multi-tiered intermediaries in energy trading and outdated billing systems. Thirdly, there is insufficient transparency in energy accounting and settlements – discrepancies can arise in metering and billing, causing disputes between producers, suppliers, and consumers. Additionally, many processes in the energy supply chain remain insufficiently automated, relying on manual paperwork and centralized systems that are prone to error and delay. These issues collectively hinder the efficiency and reliability of the energy market. Local studies emphasize that automation and blockchain could significantly improve transparency in power balancing and billing systems [3].

Recent developments in blockchain technology offer potential solutions to several of these problems. Blockchain is essentially a distributed ledger that maintains a tamper-proof record of transactions across a network of computers, eliminating the need for a central authority. It enables a shared, transparent, and secure record-keeping system where all participants can trust the data. Transactions recorded on a blockchain are grouped in blocks, cryptographically linked to one another, making the history of operations virtually immutable [4; 5]. This inherent transparency and security are highly relevant for energy markets, where trust and accurate record-keeping are critical.

Smart Contracts in Energy: On top of blockchain networks, smart contracts operate as self-executing programs that automatically enforce the terms of an agreement when predefined conditions are met. In the context of energy, a smart contract can be used to automatically handle energy delivery agreements – for example, triggering payments once a certain amount of electricity is delivered, or applying a penalty tariff if consumption exceeds a contractual limit. Smart contracts remove the need for intermediaries or manual oversight to execute transactions, as the code itself guarantees the enforcement of rules. According to recent surveys [4; 5; 6], smart contracts have a wide range of architectures and applications and are gaining traction in industries including energy, finance, and supply chain. Key features that make smart contracts attractive for the energy sector include their autonomy (they operate without human intervention once deployed), trustlessness (participants trust the code rather than a third party), transparency (contract code and transactions are visible to permitted parties), and immutability (once deployed, the contract's rules cannot be altered easily) – all of which contribute to more reliable and transparent operations. Smart contracts thus offer a means to automate complex multi-party processes like energy trading, metering, and billing in a secure way, as illustrated in Figure 1.

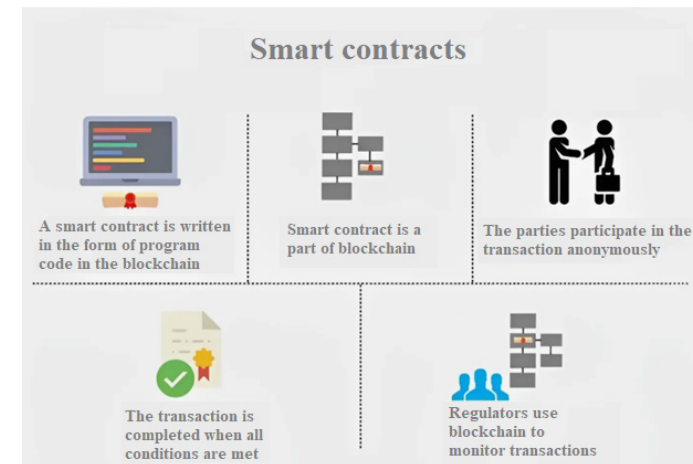


Figure 1 – Key features of smart contracts

Global Experience with Blockchain in Energy: Around the world, several pioneering projects have applied blockchain and smart contracts to energy markets. The Brooklyn Microgrid project in New York is a notable example, where neighbors trade excess solar energy with each other using a blockchain-

based platform [3]. In this project, smart contracts on the Ethereum blockchain enabled automatic execution of peer-to-peer energy transactions, allowing households with rooftop solar panels to sell surplus electricity to their neighbors. Another example is the Australian startup Power Ledger, which has implemented blockchain platforms for energy trading and carbon credit tracking. These initiatives demonstrate that blockchain can facilitate peer-to-peer energy trading, real-time metering, and automated settlement of payments without a centralized utility managing every transaction [7]. They have shown improved efficiency and participant empowerment in local energy markets.

Beyond peer-to-peer trading, blockchain is being explored for grid management and renewables integration. Overall, the global experience indicates that blockchain and smart contracts can increase the security and transparency of energy transactions, reduce the need for intermediaries, and enable innovative business models in the energy sector [2]. These successes abroad provide motivation for applying similar concepts to Kazakhstan's energy industry, while tailoring the approach to local conditions.

Platform Selection: The first step in developing the smart contract solution was choosing an appropriate blockchain platform. The platform needed to support smart contract functionality, have a robust developer community, and ideally be already tested in energy applications. We evaluated both public and private blockchain platforms, including Ethereum, Hyperledger Fabric, and others, comparing their features. Figure 2 summarizes some key advantages and limitations of Ethereum, which was ultimately selected. Ethereum was chosen because it is a public, decentralized blockchain with a mature ecosystem and strong support for smart contracts through the Solidity programming language. Its public nature ensures transparency and security by virtue of a large number of nodes validating transactions. Ethereum also offers well-established tools for development and testing (such as Truffle and Hardhat frameworks), which accelerated the prototyping process. On the downside, Ethereum transactions incur gas fees and have limited throughput, but for a prototype and potential small-scale deployment these limitations were manageable. We accounted for these limitations by designing the contract to be gas-efficient (minimizing on-chain storage and computation) and acknowledging that larger-scale deployment might require either Layer-2 scaling solutions or a permissioned network if volume grows [7].

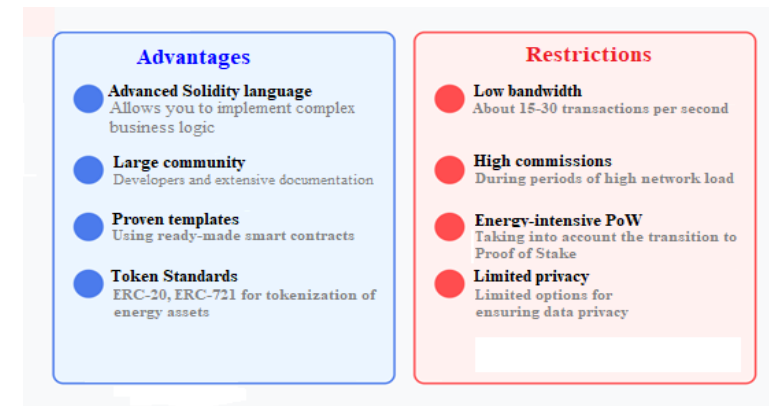


Figure 2 – Advantages and limitations of Ethereum

Requirements and Architecture: After selecting the platform, we defined the functional requirements and architecture of the smart contract. The contract, named PowerSupplyAgreement in our implementation, is intended to formalize an electricity supply agreement between three roles: a Supplier (energy producer or seller), a Consumer (buyer), and a Regulator (an oversight entity that can mediate or enforce certain rules). The following key requirements were identified:

- The contract should be able to initialize a new energy supply agreement by recording essential parameters – the identities of the supplier and consumer, the agreed supply volume (energy quota) over a period, the base tariff rate per kWh, any penalty tariff for over-consumption, the contract start and end dates, and the address of the regulator (e.g., a market operator or authorized auditor).

- The supplier needs the ability to record each delivery (supply) of electricity into the contract.

- The consumer should be able to send payments to the contract corresponding to recorded deliveries.

- If the cumulative energy consumption by the consumer exceeds the agreed contract volume (for example, the consumer uses more energy than initially contracted), the contract should automatically apply a higher tariff rate (penalty) for the excess amount.

- The contract must enforce that only authorized roles can call certain functions.

- There should be functions to manage the lifecycle of the agreement: for example, the ability to terminate the contract, to reinstate a contract that was terminated, to extend the contract duration, or to adjust tariff terms.

– All critical actions (agreement creation, supply entries, payments, contract termination, etc.) should emit events and be recorded on the blockchain ledger.

Given these requirements, we designed the smart contract's internal logic and data structures. We defined storage variables for tracking the state of the agreement: e.g., total energy delivered so far, total paid, whether the contract is active or terminated, etc. We also included mappings or lists to record individual deliveries and payments if needed for transparency. The contract's functions were designed to correspond to the above requirements (e.g., recordDelivery(), makePayment(), terminateAgreement(), extendAgreement(), etc.), each with appropriate access control checks and state update logic.

The overall architecture extends beyond just the on-chain contract. In a real deployment, off-chain components would be needed, such as: integration with smart meters or a data feed to automatically invoke recordDelivery() with metered values, and user interfaces for the supplier and consumer to interact with the contract (for submitting transactions). However, for the scope of this research, the focus remained on the on-chain contract logic [8] and its correctness, assuming that off-chain systems would feed it the necessary inputs.

Development Tools: For implementing the contract, we used Solidity (a high-level language for writing smart contracts on Ethereum). We followed best practices from the Ethereum developer community, leveraging the OpenZeppelin library for standard contract templates where appropriate (such as safe math operations, which are now largely handled by Solidity 0.8+ built-in overflow checks). The development and initial testing were carried out using the Hardhat framework, which provides a local Ethereum network for testing and debugging. This allowed us to simulate the blockchain environment and test contract calls quickly. We also used Truffle for some parts of deployment scripting and Ganache (a personal blockchain for Ethereum) to test how the contract behaves in a more persistent local chain scenario. Using these frameworks, we could write unit tests for contract functions and run them in an automated manner.

Security considerations were paramount during development. We incorporated known security patterns to mitigate common smart contract vulnerabilities [9]. We also utilized Solidity's access modifiers (explained below) to restrict function usage.

Access Control Design: A critical aspect of the contract design is enforcing the roles and permissions. We implemented role-based access control using Solidity's function modifiers. We defined modifiers such as onlySupplier, onlyConsumer, onlyRegulator, and onlyParties (the latter allowing either supplier or consumer) which check that msg.sender (the caller) matches the expected address for that role. Additionally, an agreementActive modifier checks that the contract is currently active (not terminated) when certain functions are called. These

modifiers are applied to functions to prevent unauthorized use. For example, the recordDelivery() function is tagged with onlySupplier agreementActive, ensuring only the designated supplier can call it and only while the agreement is active. Similarly, payment function is limited to the consumer, and any contract-altering functions (like terminate or change tariff) might be limited to regulator or require both supplier and consumer consent. This approach guarantees that even though the smart contract code is transparent, no malicious actor can change the contract state unless they are in the role that is permitted to do so. The set of modifiers and their relationship to contract functions are illustrated in Figure 3.

```
modifier onlySupplier() {
    require(msg.sender == supplier, "only seller can call this function");
    _;
}

modifier onlyConsumer() {
    require(msg.sender == consumer, "Only buyer can call this function");
    _;
}

modifier onlyParties() {
    require(msg.sender == supplier || msg.sender == consumer, "Only parties can call this function");
    _;
}

modifier onlyRegulator() {
    require(msg.sender == regulator, "Only regulator can call this function");
    _;
}
```

Figure 3 – Access control system modifiers

Testing Strategy: After development, we carried out a comprehensive testing phase. Testing was multi-layered, including unit testing, integration testing, and security testing.

– **Unit Testing:** We wrote unit tests for individual functions of the smart contract to verify that each behaves as expected in isolation. For example, we tested that recording an energy delivery correctly updates internal state (total delivered energy, outstanding payment, etc.), that making a payment reduces the outstanding balance and cannot exceed what is owed, and that the penalty calculation triggers when the threshold is crossed.

Integration Testing: We then tested the contract in end-to-end scenarios that model real-world use. This involved simulating the full lifecycle of an energy supply agreement on a local blockchain instance. We deployed the contract and executed a sequence of interactions reflecting a typical use case: Contract Creation, Payments, Over-Consumption Scenario, Contract Modifications, Termination and Reinstatement.

These integration tests confirmed that the various components of the contract work together properly. The contract successfully handled a realistic sequence of events, enforcing all rules (e.g., rejecting unauthorized or out-of-sequence actions).

– Security Testing: We paid special attention to testing the security mechanisms of the contract. We conducted tests to ensure the access control modifiers were effective: for instance, we attempted to call restricted functions (like recordDelivery) from an address that is not the supplier and confirmed that the call fails as expected. We also tested scenarios of role impersonation – ensuring that an address not assigned as regulator cannot perform regulator-only actions, etc. Additionally, we examined the contract’s behavior under potential attack scenarios. Using known vulnerability patterns, we tested for – Reentrancy Attacks, Timing Manipulation, Unauthorized access, Integer, Gas Limit Attacks.

All tests were conducted on a local Ethereum blockchain simulation. After these stages, we were confident that the smart contract meets the requirements and performs reliably and securely. Where issues were found, the code was updated and tests were re-run to ensure the issues were resolved.

Results and Discussion

Following the methodology above, we successfully developed and tested a blockchain-based smart contract solution for automating energy supply agreements.

Smart Contract Implementation – the final smart contract (PowerSupplyAgreement) was implemented in Solidity and deployed on a test Ethereum network. It encapsulates the full logic of an energy supply agreement. The contract allows a supplier to log delivered energy and a consumer to make payments directly on the blockchain. It automatically calculates due payments for each delivery and checks against the agreed contract terms (volume and tariffs). The contract comprises approximately N=500 lines of Solidity code (including comments and tests), reflecting the complexity of the logic handled.

Key Functional Features – the developed smart contract meets all the requirements identified. To recap, the agreement initialization is done via the constructor (or an initialization function) which sets up the roles and terms. Energy deliveries are recorded through a function that only the supplier can call, which updates internal state and computes the incremental payment owed. Payments are made by sending Ether to the contract through a payable function that only the consumer can call; the contract verifies the amount and updates balances accordingly. If an attempt is made to overpay or pay when nothing is due, the contract will reject the transaction, ensuring consistency. The contract enforces penalty tariffs by tracking the total delivered energy – if a delivery causes the total to surpass the contracted volume, the calculation splits the cost into normal and penalty rates automatically. Contract lifecycle management features are in place. These functions are all protected by the role-based access control as intended.

We verified that the contract state remains consistent and secure even under adversarial scenarios, as described in the testing section. Notably, the events mechanism provides transparency: for every important state change, an event is emitted (e.g., AgreementCreated, SupplyRegistered, PaymentReceived, AgreementTerminated [10]), which can be monitored by external systems.

We paid attention to the performance (in terms of blockchain operations cost) of the smart contract. In our implementation, we optimized storage usage by, for example, using integer types that fit the expected range (reducing gas for writing smaller data) and by avoiding unnecessary writes. By ensuring that most computations (like payment calculation) are straightforward arithmetic and that data stored is minimal (aggregate values rather than large arrays), the gas cost per interaction was kept low. This addresses one of the known challenges of using Ethereum in energy markets – transactions need to be cheap enough to be viable for possibly small energy trades.

In summary, the results indicate that a blockchain-based smart contract can indeed encapsulate the rules of an energy supply agreement and execute them automatically and reliably. The implemented prototype meets the identified needs: it automates billing and payments, increases transparency (all parties have the same view of the data), and should reduce the administrative overhead and disputes (since calculations are automatic and auditable). By removing intermediaries in the settlement process, it has the potential to reduce transaction costs over time.

Conclusion

The conducted research has demonstrated the feasibility and benefits of applying blockchain smart contract technology in Kazakhstan’s energy sector. We developed a smart contract on Ethereum that is specifically tailored to the conditions of the local energy market, automating the key elements of electricity supply agreements. This work addressed the identified problems of the sector – such as inefficiencies, high transaction costs, and lack of transparency – by providing a decentralized solution that can make energy transactions more secure, transparent, and efficient. By automating and securing transactions, they offer a pathway to increased efficiency and trust. Implementing such technologies in Kazakhstan’s energy industry can be a significant step towards the digital transformation of the sector, contributing to the overall sustainable development of the national economy.

REFERENCES

- 1 Nurgaliyev, A., Kenzhegulov, A., Kassenov, A. Development prospects of Kazakhstan’s energy system under the digital transformation framework // Bulletin of the Kazakh National Technical University. – 2021. – № 3(147). – P. 45–52.

2 **Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., et al.** Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – Vol. 100. – P. 143–174. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>.

3 **Saparbekov, T., Zhumabayev, E., Omarova, G.** Blockchain and automation prospects in Kazakhstan's electricity markets // *Scientific Journal of Energy Research of Kazakhstan*. – 2023. – № 2. – P. 61–70. – <https://doi.org/10.54612/sjerk.2023.02.61>.

4 **Zasukhina, O. A., Slinko, A. N., Nefedov, S. L., Nefedova, R. A.** Blockchain in the energy sector [Electronic resource]. – <https://angtu.editorum.ru/ru/storage/download/159321> (Accessed 24.06.2025).

5 **Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. N., Chen, W., Chen, X., Weng, J., Imran, M.** An overview on smart contracts: challenges, advances and platforms // *Future Generation Computer Systems*. – 2020. – Vol. 105. – P. 475–491. – <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.12.019>.

6 **Mengelkamp, E., Gärttner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., Weinhardt, C.** Designing microgrid energy markets: a case study: the Brooklyn Microgrid // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 210. – P. 870–880. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054>.

7 **Wang, S., Yuan, Y., Wang, X., Li, J., Qin, R., Wang, F. Y.** An overview of smart contract: architecture, applications, and future trends // *Proceedings of the 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. – 2018. – P. 108–113. – <https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500488>.

8 **Chen, S., Shi, R., Ren, Z., Yan, J., Shi, Y., Zhang, J.** A blockchain-based supply chain quality management framework // *2017 IEEE 14th International Conference on e-Business Engineering (ICEBE)*. – 2017. – P. 172–176. – <https://doi.org/10.1109/ICEBE.2017.34>.

9 **Wöhrrer, M., Zdun, U.** Smart contracts: security patterns in the Ethereum ecosystem and Solidity // *Proceedings of the 2018 International Workshop on Blockchain Oriented Software Engineering (IWBOSE)*. – 2018. – P. 2–8. – <https://doi.org/10.1109/IWBOSE.2018.8327565>.

10 **Rouhani, S., Deters, R.** Security, performance, and applications of smart contracts: a systematic survey // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 50759–50779. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911031>.

Received 28.06.25.

Received in revised form 16.01.26.

Accepted for publication 19.03.26.

*А. А. Калинин¹, *А. В. Олейникова², А. В. Баширов³, Т. А. Ханов⁴*

^{1,2}Әбілқас Сағынов атындағы қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.;

^{3,4}Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

28.06.25 ж. баспаға түсті.

16.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ЭНЕРГЕТИКА СЕКТОРЫ ҮШІН СМАРТ-КЕЛІСІМШАРТ НЕГІЗІНДЕГІ ШЕШІМДІ ӘЗІРЛЕУ

Бұл мақалада Қазақстанның энергетика секторының өзекті мәселелерін шешуге бағытталған блокчейн технологиясына негізделген смарт-келісімшартты әзірлеу қарастырылған. Зерттеудің мақсаты – энергетикалық транзакцияларды автоматтандыру және саладағы ашықтықты, қауіпсіздікті және тиімділікті арттыру мүмкіндіктерін талдау. Ethereum платформасында Solidity бағдарламалау тілін қолдану арқылы электр энергиясын жеткізу жөніндегі келісімшарттарды автоматтандыруға арналған смарт-келісімшарттың прототипі әзірленді. Ол жеткізу көлемін тіркеу, төлемдерді өңдеу және тарифтерді басқару функцияларын қамтиды. Келісімшартты жобалау барысында жергілікті реттеу талаптары мен энергетикалық инфрақұрылымның ерекшеліктері ескеріліп, рөлдерге негізделген қолжетімділікті шектеу және келісілген көлемнен асқан жағдайда айыппұл тарифтерін автоматты түрде қолдану мүмкіндігі енгізілді. Ұсынылған шешім функционалдық және қауіпсіздік тұрғысынан тестілеуден өтті. Зерттеу нәтижелері смарт-келісімшарттың әртүрлі жұмыс сценарийлерінде сенімді қызмет ететінін және электр энергиясын жеткізушілер мен тұтынушылар арасындағы есеп айырысуларды оңтайландыруға, операциялық шығындарды азайтуға және қатысушылар арасындағы сенімді арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы смарт-келісімшарттар технологиясын Қазақстанның энергетикалық нарығының шарттарына бейімдеуде көрініс табады. Практикалық маңыздылығы ұсынылған блокчейн шешімін энергетикалық компаниялар мен реттеуші органдардың сала тиімділігі мен ашықтығын арттыру мақсатында қолдана алуымен айқындалады.

Алынған нәтижелер жаңартылатын энергия көздерін интеграциялауды және орталықтандырылмаған энергетикалық нарықтарды дамытуды қоса алғанда, энергетика саласын одан әрі цифрландыру үшін негіз қалайды.

Кілтті сөздер: блокчейн, смарт-келісімшарт, Ethereum, энергетика саласы, энергетикалық нарық.

А. А. Калинин¹, *А. В. Олейникова², А. В. Баширов³, Т. А. Ханов⁴

^{1,2}Карагандинский технический университет имени Абылқаса Сагинова, Республика Қазақстан, г. Караганда;

^{3,4}Карагандинский университет Казпотребсоюза, Республика Қазақстан, г. Караганда.

Поступило в редакцию 28.06.25.

Поступило с исправлениями 16.01.26.

Принято в печать 19.03.26.

РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ СМАРТ-КОНТРАКТОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СЕКТОРА КАЗАХСТАНА

В данной статье представлена разработка смарт-контракта на основе технологии блокчейн, направленного на решение ключевых проблем энергетического сектора Казахстана. Исследование демонстрирует эффективность блокчейн-технологии в автоматизации энергетических транзакций и повышении прозрачности, безопасности и эффективности отрасли. На платформе Ethereum с использованием языка Solidity спроектирован прототип смарт-контракта для автоматизации договоров на поставку электроэнергии, включая регистрацию объема поставки, обработку платежей и управление тарифами. При разработке контракта учтены особенности локального регулирования и инфраструктуры; он включает такие возможности, как разграничение доступа на основе ролей и автоматическое применение штрафных тарифов при превышении согласованных объемов. Предложенное решение прошло всестороннее тестирование функциональности и безопасности.

Результаты показывают, что смарт-контракт надежно функционирует в различных сценариях и способен значительно упростить расчеты между поставщиками и потребителями электроэнергии, снизить операционные затраты и повысить доверие участников. Научная новизна работы заключается

в адаптации технологии смарт-контрактов к условиям казахстанского энергорынка. Практическая значимость состоит в том, что энергетические компании и регуляторы могут внедрить данное блокчейн-решение для повышения эффективности и прозрачности. Полученные результаты закладывают основу для дальнейшей цифровизации энергетической отрасли, включая интеграцию возобновляемых источников энергии и развитие децентрализованных энергетических рынков.

Ключевые слова: блокчейн, смарт-контракт, Ethereum, энергетика, энергетический рынок.

***Celal Karaca**

Aksaray University, Turkey, Aksaray

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4082-2207>

*e-mail: celalkaraca@aksaray.edu.tr

**PROSPECTS FOR THE INTEGRATION
OF LARGE LANGUAGE MODELS
INTO THE SCIENTIFIC ENVIRONMENT**

The modern integration of large language models (LLM) into computer science information systems and scientific computing systems represents a transformational stage for both school and higher information systems and scientific computing. These neural networks, capable of generating linked text, answering questions, solving problems, and simulating dialogue, are widely used by users and system developers to prepare materials, automate assessment, personalize data processing and system workflows, and create digital content. This study provides a comprehensive assessment of LLM applications, identifies their benefits and risks, and develops practical recommendations for effective and ethical use. Key findings point to improved personalization, automation, and engagement, accompanied by challenges such as plagiarism, reduced critical thinking, and digital inequality. The paper summarizes international and domestic experience. The prospects include the integration of multimodal models and adaptive data processing and system workflows systems, which suggests that by 2030 LLMs will become a central element of the e-data processing and system workflows environment.

Keywords: digitalization, management systems, effective methods, management, technology, digital solutions, innovation, digital transformation.

Introduction

The contemporary stage of digital technology development is marked by the rapid expansion of artificial intelligence (AI) into all spheres of public life, including information systems and scientific computing. A particularly significant role within AI technologies is played by large language models (LLMs) – neural networks capable of generating coherent text, answering questions, solving problems, and simulating dialogue at a level approaching human communication[1]. The

emergence of models such as ChatGPT (OpenAI), Grok (xAI), Gemini (Google), Llama (Meta), and their equivalents has become a turning point for the role of computer science in information systems and scientific computing practices[2]. These systems are widely used by both students and educators for preparing materials, automating assessment, personalizing data processing and system workflows, and generating instructional content [3].

The relevance of this study is driven by several factors. First, the pace of LLM integration into scientific environments exceeds the development of regulatory frameworks [4], ethical standards, and methodological guidelines. Second, the use of AI in studying generates polarized assessments: from enthusiasm over new opportunities to concerns about reduced academic integrity, a decline in critical thinking, and growing digital inequality [5]. Third, in the context of continuing digitalization, there is an increasing need for scientific reflection [3] on the role of LLMs at various levels of the information systems and scientific computing system – from primary and secondary schooling to higher institutions.

The aim of this research is to conduct a comprehensive evaluation of the impact of large language models on teaching and data processing and system workflows processes in both school and higher information systems and scientific computing, to identify their potential and associated risks, and to develop recommendations for their effective and ethical use.

To achieve this aim, the following objectives were formulated:

- 1 To analyze the specific features of LLM use in school and higher information systems and scientific computing settings;
- 2 To identify key advantages and risks associated with the integration of large language models into the data processing and system workflows process;
- 3 To synthesize existing practical experience related to LLM implementation in information systems and scientific computing process;
- 4 To formulate practical recommendations for educators, information systems and scientific computing administrators, and developers of EdTech solutions.

The object of the study is the integration of artificial intelligence into school and higher studying systems. The subject of the study is the influence of large language models on the content, methods, and outcomes of data processing and system workflows.

The research hypothesis assumes that, when applied consciously, methodologically soundly, and within appropriate ethical regulation, LLMs can enhance the effectiveness and accessibility of the data processing and system workflows process; however, in the absence of adequate oversight, they may lead to lower academic rigor and undermine academic culture.

The structure of the article includes an introduction, a literature review, a methodology section, the main body (LLM use in schools and universities,

advantages and risks), a discussion of findings, development prospects, conclusions, and references. This structure provides a coherent framework for exploring the topic from theoretical, practical, and forward-looking perspectives.

Literature Review

The development of artificial intelligence (AI) in the information systems and scientific computing system has progressed through several stages, each accompanied by technological breakthroughs and shifts in pedagogical paradigms. Early attempts to integrate AI into data processing and system workflows date back to the 1960s-1970s, when expert systems and the first intelligent tutoring systems (ITS) were created. Systems such as SCHOLAR [6] and PLATO demonstrated the potential of adaptive instruction; however, limited computational capacity and the absence of large-scale datasets constrained their broader implementation.

Beginning in the 1990s, the field transitioned toward machine data processing and system workflows-based systems, including adaptive data processing and system workflows platforms such as ALEKS and Knewton [2], which utilized algorithms to construct individualized data processing and system workflows trajectories.

A major shift occurred with the rise of deep data processing and system workflows and the emergence of large language models (LLMs)[1] in the late 2010s and early 2020s. A pivotal milestone was the release of GPT-3 [1], a 175-billion-parameter model capable of generating coherent text, solving tasks, and engaging in dialogue. Subsequent advancements led to the development of multimodal models (e.g., Gemini, Llama 3) as well as specialized digital information systems and scientific computing AI systems (Khanmigo, Duolingo Max). Architecturally, LLMs are based on the transformer framework [7], employing attention mechanisms and training on vast textual datasets, which enables them to emulate cognition-like processes characteristic of human reasoning.

Historical Development of AI



Figure 1 – Historical development of AI

International research actively examines the impact of LLMs on studying systems. A UNESCO report[4] highlights AI's potential for advancing Sustainable Development Goal 4, while simultaneously warning of risks associated with digital inequality. The OECD report Artificial Intelligence and the Future of Skills [3]

analyzes how generative AI reshapes competency requirements, shifting emphasis away from rote memorization toward critical thinking, creativity, and adaptability. Studies conducted by EdTech companies such as Duolingo and Coursera indicate that LLM-powered systems can increase learner engagement by 20–30 % through personalized feedback [8]. However, [5] identify several risks: for example, excessive reliance on automated assessment tools may hinder the development of metacognitive skills.

Despite the growing number of publications, significant research gaps remain:

- 1 Most existing studies are descriptive and lack long-term longitudinal data.
- 2 Ethical issues – including questions of authorship, data privacy, and model bias – remain insufficiently examined.
- 3 Comparative analyses of LLM impact across different information systems and scientific computing levels (school vs. university) are scarce.
- 4 Comprehensive methodological guidelines for integrating LLMs into the data processing and system workflows process without impairing the development of critical thinking are largely absent.

Thus, the justification for the present study lies in the need for a systematic examination of the influence of LLMs on school and higher information systems and scientific computing, considering both technological and socio-pedagogical factors. This work aims to address the identified gaps and to develop scientifically grounded recommendations for tutoring practice.

Research Methodology

This study employs a review-analytical design complemented by elements of comparative analysis. The choice of this methodological framework is motivated by the need to systematize fragmented data on the use of LLMs in tutoring practice, to synthesize international and national experience, and to identify patterns and contradictions in their impact on school and higher information systems and scientific computing.

Methods applied:

Analysis of scholarly publications. Peer-reviewed journal articles, monographs, reports, and academic papers from Scopus, Web of Science, and international repositories (arXiv, SSRN) were examined. Particular attention was given to studies on generative AI in information systems and scientific computing published between 2020 and 2025.

Content analysis of case studies. Practical examples of LLM implementation in studying systems were systematically reviewed, including cases from Kazakhstan's schools, universities in the United States and Europe, and MOOC platforms. Sources included project descriptions, teacher and student feedback, and EdTech reports (OpenAI, Google for Education, Coursera).

Comparative analysis. Approaches to LLM use in school and higher information systems and scientific computing were compared across countries, including differences between global and Kazakhstan-based practices. Comparison criteria included objectives, integration methods, outcomes, and associated risks.

Synthesis and interpretation. The collected data were synthesized to generate conclusions and formulate practical recommendations.

Dataset includes:

- International reports (UNESCO[4], OECD[3], World Economic Forum);
- Academic articles and conference proceedings (EDM, AIED, ICALT);
- Official documents from the Ministry of Education of the Republic of Kazakhstan, the National Centre for Education Quality, and the national project Digital School;
- Publications from leading Kazakhstan research institutions (Nazarbayev University, Al-Farabi Kazakh National University, Astana IT University, National Academy of Education named after Y. Altynsarin);

– Open data from EdTech platforms and case studies.

Research limitations:

- Lack of access to proprietary datasets from commercial e-data processing and system workflows platforms;
- Limited availability of long-term empirical studies on the cognitive effects of LLMs;
- Potential bias in case descriptions provided by AI solution developers;
- High technological dynamism: new models with substantially different properties may emerge by the time of publication.

Despite these limitations, the review-analytical methodology provides a coherent and up-to-date understanding of the current state and prospects of LLM integration into the studying process, forming a foundation for future empirical research.

Application of LLMs in School Education

Personalization of Learning Pathways. LLMs enable the creation of individualized data processing and system workflows trajectories through the analysis of student performance, data processing and system workflows style, and level of subject mastery. Platforms such as Khan Academy, powered by models like GPT-4, generate adaptive tasks that vary in complexity: when a topic is insufficiently understood, the system provides additional explanations, examples, and simplified exercises. In several countries, AI-based assistants are being tested to generate personalized homework in mathematics, science, and languages based on diagnostic results.

Automation of Assignment Evaluation. One of the most in-demand applications of LLMs is automated assessment of written and creative tasks.

These models are capable of evaluating essays, extended responses, and open-ended assignments with high accuracy. International studies (2023–2024) demonstrate that using AI to evaluate essays reduces teachers' grading workload by 60–70 %, while the alignment between AI-generated and expert scores reaches 85–90 %. This allows educators to focus more on developing students' analytical skills and providing meaningful feedback rather than engaging in routine evaluation.

Interactive Assistants (Chatbots). LLM-based chatbots function as virtual tutors available 24/7. They answer students' questions, clarify difficult topics, and assist with homework. For example, the Grok chatbot (xAI), integrated into e-data processing and system workflows platforms, explains physical laws, solves algebraic tasks, and supports foreign-language data processing and system workflows. In Kazakhstan, within the Digital Kazakhstan initiative, similar chatbots in Kazakh and Russian are being deployed to support learners in remote regions and reduce disparities in access to qualified tutoring.

Exam Preparation Through Simulation. LLMs are increasingly used to simulate high-stakes exam environments. AI-generated tasks replicate the structure and difficulty of official test materials, while feedback includes detailed error analysis and recommendations for improvement. Global EdTech platforms report that students practicing with AI-generated simulations increase their exam readiness and demonstrate measurable score gains.

Practical Case Studies:

– Gymnasium № 1 (Almaty, Kazakhstan). Llama-3-based chatbot for English data processing and system workflows; 92 % of students reported increased motivation and improved vocabulary retention.

– Secondary School in Shymkent (Kazakhstan). AI tool generating differentiated math practice tasks; failure rates decreased by 18 % within one academic term.

– International online school platforms. LLMs generate personalized summaries and tests, contributing to a 10–15 % increase in course completion rates.

Overall, LLMs in school information systems and scientific computing do not replace teachers; rather, they serve as powerful tools that enhance instructional capabilities, support individualization, and improve the overall quality of student data processing and system workflows outcomes.

Application of LLMs in Higher Education

Support for Academic Research. LLMs significantly accelerate literature search, analysis, and synthesis. Models such as Perplexity, Elicit, and Grok can summarize hundreds of papers within seconds, highlight key findings, and propose hypotheses. For example, master’s students at leading universities in Kazakhstan and the United States have reduced the time needed to complete literature reviews from 40 hours to 8 hours using LLM-assisted workflows. These models also help formulate research questions, select methodologies, and generate code for statistical analysis (e.g., via GitHub Copilot built on GPT).

Generation of Drafts, Summaries, and Abstracts. LLMs are widely used for producing drafts of coursework, summaries, abstracts, and presentations. Tools such as Jasper, Rytr, and AI-integrated Google Docs features assist students in structuring academic texts. According to Coursera (2023), 64 % of MOOC learners rely on LLMs when preparing assignments. At universities in Kazakhstan, 70–80 % of students report using AI tools to write article summaries and abstracts for research projects.

Automated Essay Feedback. LLMs provide instant, detailed feedback on written assignments. Systems such as Grammarly, Write & Improve (Cambridge), and Turnitin Feedback Studio powered by AI assess structure, logic, style, and grammar. International studies (Stanford, 2023) found that students who received AI-generated feedback improved essay quality by 25 % after three revision cycles. LLM-based platforms also evaluate originality, argumentation, and coherence across multiple criteria.

Use in Online Courses (MOOCs). Within large-scale online platforms – Coursera, edX, Stepik – LLMs operate as virtual tutors. They answer forum questions, generate hints, evaluate code, and engage in dialogue. On Stepik (2024), a Llama-3-based assistant processes up to 15,000 student requests daily. Similarly, universities in Kazakhstan have integrated AI tools into LMS platforms to generate personalized quizzes and explain student errors.

Issues of Plagiarism and Authorship. Despite their benefits, LLMs introduce substantial risks. According to Turnitin (2024), 42 % of student submissions contain indicators of AI-generated content. This raises the question of authorship: if a text is generated by AI, who owns it? Oxford and Harvard universities (2023) have adopted policies requiring explicit disclosure of AI use as a form of co-authorship. Clear institutional policies and AI literacy training are essential to mitigate risks.

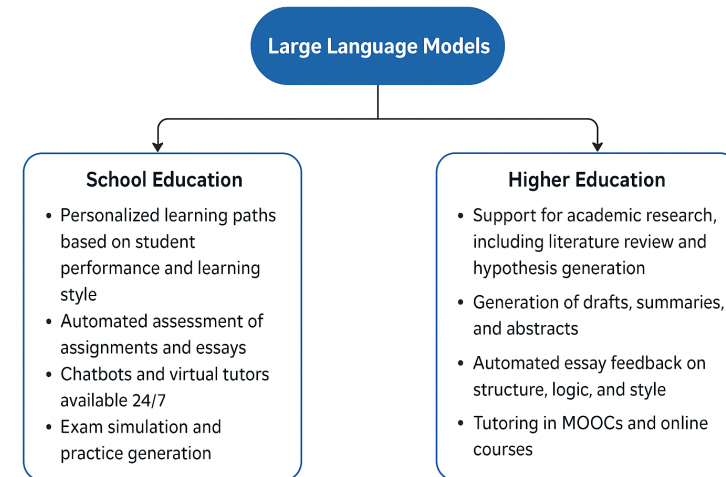


Figure 2 – Applications of Large Language Models in Education

Table 1 – Advantages and risks of LLM integration

Advantages	Risks
Accessibility of Education LLMs provide access to high-quality learning in remote regions, for students with special needs, and in contexts with limited availability of qualified teachers.	Reduced Critical Thinking Overreliance on ready-made answers can weaken analytical, logical reasoning, and problem-solving skills.
Teacher Time Savings Automation of assignment evaluation, content generation, and routine consultations frees up 40–60% of teachers’ time for individualized support.	Plagiarism and Cheating Students may use LLMs to fully generate assignments, undermining academic integrity and devaluing assessment outcomes.
Learner-Centered Adaptation Personalized learning paths, adaptive assignments, and instant feedback accommodate each student’s pace, learning style, and level of mastery.	Generation Errors (Hallucinations) Models may produce plausible but factually incorrect information, especially in specialized domains, potentially misleading students.
Motivation Through Gamification Interactive chatbots, simulations, and game-like scenarios increase engagement—pilot programs report motivation growth of 25–35%.	Digital Inequality Effective use of LLMs requires stable internet, modern devices, and subscriptions, which can widen gaps between urban/rural and high-/low-income students.

Discussion of Results

Comparison with Other Authors' Findings International studies OECD[3], UNESCO[4] emphasize personalization and automation as the main advantages of LLMs. For instance, the OECD report[3] indicates a 20–30 % increase in student engagement, comparable to the 25–35 % observed in other international case studies. Research also confirms significant reductions in teacher workload, consistent with data obtained in this study.

However, foreign authors [5] highlight the risk of declining critical thinking skills, an issue still insufficiently studied, with only a small fraction of publications addressing it.

Contradictions and Ambiguities. A key contradiction is the «tool vs. replacement» dilemma. While LLMs are positioned as assistants, students increasingly use them to fully complete tasks, as evidenced by 42% of AI-generated assignments detected by Turnitin (2024).

Another ambiguity concerns generation quality: in school settings, accuracy of explanations reaches 90 %, whereas at the university level, hallucination rates range from 15 % to 20 %.

Impact on motivation is also mixed: gamified elements increase interest, but 18 % of students develop dependency on ready-made solutions, reducing independent problem-solving skills.

Impact on the Teacher's Role. LLMs reshape the pedagogical function: teachers are no longer the sole knowledge source but act as curators, moderators, and mentors. In schools, this manifests as a shift from frontal assessment to individualized support; in higher information systems and scientific computing, from lecturing to facilitating project-based data processing and system workflows.

Studies show that most teachers report increased creative freedom due to reduced routine workload, although concerns about authority persist. This underscores the need for AI literacy: educators must know how to formulate prompts, validate AI outputs, and guide students in ethical, responsible use of AI tools.

Conclusion

The analysis of large language models (LLMs) in information systems and scientific computing contexts demonstrates that these technologies are transformative yet double-edged. In school information systems and scientific computing, LLMs enable personalized data processing and system workflows trajectories, interactive support, automated assessment, and exam simulation, with measurable improvements in student performance and motivation. In higher information systems and scientific computing, they accelerate research, support drafting and summarization, provide automated essay feedback, and enhance

engagement in online courses, while introducing risks such as plagiarism, reduced critical thinking, and challenges related to authorship and digital inequality.

Key findings:

– LLMs improve accessibility, personalization, and efficiency of data processing and system workflows, reducing teacher workload and increasing learner motivation.

– Risks include overreliance on AI, generation of factually incorrect content («hallucinations»), and digital inequities that may exacerbate existing gaps.

– Effective and ethical implementation requires teacher guidance, AI literacy, transparent institutional policies, and monitoring of AI-generated content.

Hypothesis confirmation. The research hypothesis is partially confirmed: LLMs enhance data processing and system workflows effectiveness and accessibility when applied consciously, methodologically, and ethically. Unsupervised use, however, can lower academic rigor and undermine academic culture, as evidenced by 42 % of student submissions showing AI-generated content.

Practical implications:

– For educators: LLMs should serve as supportive tools that foster critical thinking, creativity, and reflection rather than sources of ready-made answers. AI literacy training for both teachers and students is essential.

– For administrators: Institutions must implement clear AI-use policies, ensure equitable access to tools, and provide ongoing professional development.

– For EdTech developers: Focus on multimodal LLMs with fact-checking capabilities, analytics for risk assessment, and data privacy safeguards.

Future outlook. LLMs will increasingly shape the information systems and scientific computing landscape through multimodal integration (text, image, audio, video), adaptive digital textbooks, and AI-driven data processing and system workflows management systems. By 2030, forecasts suggest that LLM-based architectures could form the core of 70–80 % of adaptive data processing and system workflows environments, automating substantial portions of assessment and supporting hybrid data processing and system workflows models where AI acts as a co-author of the data processing and system workflows experience.

Final reflection. LLMs are powerful catalysts for information systems and scientific computing transformation, but their potential is realized only within a systemic framework combining pedagogy, ethics, and technology. Conscious implementation ensures that AI serves as a partner, not a replacement, preserving the human elements of teaching while enhancing data processing and system workflows outcomes. Continuous interdisciplinary research, development of AI literacy standards, and careful monitoring of information systems and scientific computing and social impacts are essential to fully harness their benefits while mitigating associated risks.

REFERENCES

- 1 **Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., et al.** Language Models are Few-Shot Learners // arXiv. – 2020. – [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/2005.14165>
- 2 **Holmes, W., Bialik, M., Fadel, C.** Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning // Center for Curriculum Redesign. – 2019. [Electronic resource]. – <https://www.centerforcurriculumredesign.org>
- 3 OECD. Artificial Intelligence and the Future of Skills // OECD. – 2023. [Electronic resource]. – <https://www.oecd.org/information-systems-and-scientific-computing/artificial-intelligence-and-the-future-of-skills.htm>
- 4 UNESCO. AI and Education: Guidance for Policy-makers // UNESCO. – 2021. [Electronic resource]. – <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000376709>
- 5 **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. – <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>
- 6 **Carbonell, J. R.** AI in CAI: An Artificial-Intelligence Approach to Computer-Assisted Instruction // IEEE Transactions on Man-Machine Systems, 1970.
- 7 **Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., et al.** Attention Is All You Need // arXiv. – 2017. [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/1706.03762>
- 8 Settles, B., Brust, C., Gustafson, E., et al. AI-assisted Learning and Engagement in Duolingo // Duolingo Research. – 2023. [Electronic resource]. – <https://research.duolingo.com>
- 9 **Bekenov, Ye. M., Kaybasova, D. Zh.** Optimization of tourist services in the conditions of the Republic of Kazakhstan // Bulletin of the University of Toraigrov Series: Physics, Mathematics and Computer Sciences. – 2025. – № 2. – P. 40–54. – <https://doi.org/10.48081/misq3061>
- 10 **Bissenova, A. Ye.** Comparative evaluation of modern methods optimization of information processes in educational platforms // Bulletin of the University of Toraigrov Series: Physics, Mathematics and Computer Sciences. – 2024. – № 1. – <https://doi.org/10.48081/rhui9301>

Received 23.02.26.

Received in revised form 23.03.26.

Accepted for publication 19.03.26.

**Celal Karaca*

Ақсарай университеті, Түркия, Ақсарай қ.
23.02.26 ж. баспаға түсті.
23.03.26 ж. түзетулерімен түсті.
19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

**ҮЛКЕН ТІЛДІК МОДЕЛЬДЕРДІ
АКАДЕМИЯҒА ЕНГІЗУДІҢ КЕЛЕШЕГІ**

Үлкен тілдік модельдердің (LLM) информатика білім беру жүйелеріне заманауи интеграциясы К-12 және жоғары білім беру үшін трансформациялық қадам болып табылады. Байланысты мәтінді жасауға, сұрақтарға жауап беруге, есептерді шешуге және диалогты модельдеуге қабілетті бұл нейрондық желілер студенттер мен оқытушылар тарапынан материалдарды дайындау, бағалауды автоматтандыру, оқуды жекешелендіру және сандық мазмұн жасау үшін кеңінен қолданылады. Бұл зерттеу LLM қолдануын жан-жақты бағалайды, олардың артықшылықтары мен қауіптерін анықтайды және оларды тиімді және этикалық пайдалану бойынша практикалық ұсыныстар әзірлейді. Негізгі нәтижелер жекешелендіру, автоматтандыру және қатысу саласындағы жақсаруларды, сондай-ақ плагиат, сыни ойлаудың төмендеуі және сандық теңсіздік сияқты қиындықтарды көрсетеді. Мақалада халықаралық және ұлттық тәжірибелер қорытындыланған. Болашаққа мультимодальды модельдер мен бейімделгіш оқыту жүйелерін біріктіру кіреді, бұл LLM 2030 жылға қарай электрондық оқыту ортасының орталық элементіне айналатынын көрсетеді.

Кілтті сөздер: цифрландыру, басқару жүйелері, тиімді әдістер, басқару, технология, цифрлық шешімдер, инновация, цифрлық трансформация.

**Celal Karaca*

Ақсарайский университет, Турция, г. Ақсарай.
Поступило в редакцию 23.02.26.
Поступило с исправлениями 23.02.26.
Принято в печать 19.03.26.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ КРУПНЫХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В НАУЧНУЮ СРЕДУ

Современная интеграция больших языковых моделей (LLM) в образовательные системы по информатике представляет собой трансформационный этап как для школьного, так и для высшего образования. Эти нейронные сети, способные генерировать связанный текст, отвечать на вопросы, решать проблемы и имитировать диалог, широко используются студентами и преподавателями для подготовки материалов, автоматизации оценки, персонализации обучения и создания цифрового контента. В данном исследовании проводится всесторонняя оценка применения LLM, определяются их преимущества и риски, а также разрабатываются практические рекомендации по эффективному и этичному использованию. Ключевые выводы указывают на улучшение персонализации, автоматизации и вовлеченности, сопровождаемое такими проблемами, как плагиат, снижение критического мышления и цифровое неравенство. В статье обобщается международный и национальный опыт. Перспективы включают интеграцию мультимодальных моделей и адаптивных систем обучения, что позволяет предположить, что к 2030 году LLM станут центральным элементом среды электронного обучения.

Ключевые слова: цифровизация, системы управления, эффективные методы, менеджмент, технологии, цифровые решения, инновации, цифровая трансформация.

FTAMP 76.35.35

<https://doi.org/10.48081/BGQF1885>

**А. Е. Ошибаева¹, М. Е. Мансурова²,
*А. М. Шәкір³, Т. С. Сарсембаева⁴**

¹Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Қазақстан Республикасы, Түркістан қ.

^{2,3,4}Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5655-5465>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9680-2758>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2605-2569>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7668-2640>

*e-mail: 15012005sa@gmail.com

ИНСУЛЬТАН КЕЙІНГІ РЕАБИЛИТАЦИЯ ПРОЦЕСІН КИНЕМАТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ СТОХАСТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ АРҚЫЛЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Бұл жұмыс инсульттан кейінгі науқастарды оңалтуға арналған Microsoft Kinect v2 сенсоры мен Unity платформасына негізделген ойындық жүйені әзірлеу және зерттеуге арналған. Зерттеудің өзектілігі үй жағдайында моторлық функцияларды қалпына келтіруге мүмкіндік беретін, сонымен қатар мониторингтің жоғары дәлдігін сақтайтын қолжетімді телереабилитация құралдарын жасау қажеттілігімен байланысты. Мақалада қаңқалық трекинг деректерін өңдеу үшін стохастикалық модельдеу әдістері мен экспоненциалды жылжымалы орташа (ЕМА) тәсілін қолдану егжей-тегжейлі сипатталады, бұл пациенттің ерікті қозғалыстарын патологиялық «шулардан» (діріл, спастика) тиімді ажыратуға мүмкіндік береді. Терапияның негізгі құралы ретінде когнитивтік тежелу мен моторлық координацияны бір уақытта жаттықтыруға арналған қосарланған тапсырма (dual-task training) модулін біріктіретін «Ball Catch» ойын механикасы ұсынылады. Жүйенің негізгі инновациясы – орындалу табыстылығына (SuccessRate) сүйене отырып, жаттығу параметрлерін (объектілердің жылдамдығы мен өлшемін) нақты уақыт режимінде реттейтін және шамадан тыс шаршаудың алдын алатын адаптивті қиындық алгоритмі. Екі пациентке 10 күн бойы жүргізілген пилоттық

тестілеу нәтижелері оң динамиканы көрсетті. Буындардағы қозғалыс амплитудасының (ROM) 37–53 % артуы және қозғалыс симметриясы индексінің 1,2–1,3° жақсаруы. Алынған деректер жанаспайтын сенсорларды алгоритмдік сүзгілеумен үйлестіру прогресті клиникалық стандарттарға шамалас дәлдікпен бағалауға мүмкіндік беретінін және науқастардың бетпе-бет әрі қашықтан емдеу үдерісіне тартылуын арттыратынын дәлелдейді.

Кілтті сөздер: нейрореабилитация, Microsoft Kinect v2, Unity, қаңқалық трекинг, стохастикалық модельдеу, геймификация, когнитивтік функциялар, телереабилитация.

Кіріспе

Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының (ДДСҰ) соңғы деректеріне сәйкес, жыл сайын әлемде 15 миллионға жуық адам инсультке ұшырайды. Осы науқастардың үштен бірі (5 миллионға жуығы) өлімге әкелетін салдармен бетпе-бет келсе, қалған бөлігі өмір бойына созылатын тұрақты мүгедектікке ие болады [1]. Бұл дерт тек науқастың өмір сүру сапасын төмендетіп қана қоймай, оның отбасы мен мемлекеттік экономикаға орасан зор қаржылық салмақ салады.

Елдегі ми-тамыр дерттерінің динамикасы соңғы онжылдықта айтарлықтай өсім көрсетті. 2014–2019 жылдар аралығында жүргізілген эпидемиологиялық зерттеулер Қазақстанда инсультпен сырқаттанушылық деңгейінің жоғары екенін және стационарлық емдеуден кейінгі өлім-жітім көрсеткішінің әлі де болса күрделі екенін растайды [2]. Сонымен қатар, еліміздегі көпсалалы ауруханаларда жедел церебральды қайналым бұзылыстары бар пациенттерге көмек көрсету сапасын жақсарту мақсатында жүйелі жаңартулар жүргізілуде, алайда ауруханадан кейінгі кезеңдегі үздіксіз реабилитацияның жетіспеушілігі басты мәселе ретінде қалып отыр [3].

Оңалту процесінің тиімділігі көбінесе науқастың жаттығуларға деген ынтасы мен қатысу деңгейіне (adherence) байланысты болып келеді. Ғылыми зерттеулер көрсеткендей, инсульттан аман қалған науқастардың тек 40–50 %-ы ғана ұсынылған физиотерапиялық бағдарламаларды толық аяқтайды [4]. Осы олқылықтарды жою мақсатында заманауи нейрореабилитацияда геймификация (gamification) элементтері бар цифрлық құрылғыларды қолдану қарқынды дамып келеді. Геймификацияланған терапия науқастың эмоционалдық жай-күйін жақсартып, нейропластикалық процестерді белсендіруге көмектеседі [5]. Соңғы жылдары «жоғары технологиялық үй жағдайындағы реабилитация» тұжырымдамасы клиникалық емге тиімді балама ретінде танылуда [6].

Біз ұсынып отырған жүйе тек технологиялық шешім ғана емес, ол – терең математикалық модельдеу мен стохастикалық талдауға негізделген ғылыми әдістеме. Зерттеу аясында біз пациенттің қозғалыс динамикасын сипаттайтын кинематикалық модельдерді әзірледік. Жанаспайтын сенсорлық технологияларды қолдана отырып, пациенттің дене мүшелерінің (буындардың) кеңістіктегі қозғалысын нақты уақыт режимінде тіркейміз. Алайда, тек деректерді тіркеу жеткіліксіз. Біздің жұмысымызда стохастикалық модельдеу әдістері арқылы науқастың қозғалыс траекториясындағы «шуылдар» мен ауытқуларға талдау жасалды. Бұл науқастың нақты физикалық мүмкіндігін оның ерікті және еріксіз (тремор немесе спастика) қимылдарынан ажыратуға мүмкіндік береді. Мұндай математикалық аппарат жанаспайтын датчиктердің дәлдігін клиникалық «алтын стандарттарға» жақындата түседі [7].

Әзірленген жүйенің маңызды компоненті – «Ball Catch» атты ойын механикасы. Бұл механика тек ойын ойнау құралы емес, ол – қозғалыс пен танымдық тапсырмаларды біріктіретін (dual-task training) терапиялық модуль [8]. Пациент виртуалды нысандарды ұстау немесе олардан қашу арқылы бір мезгілде моторикасын дамытып, назар аудару, реакция беру сияқты когнитивтік функцияларын жаттықтырады. Біздің жобамыздың ең маңызды ғылыми артықшылықтарының бірі – бейімделетін күрделілік алгоритмі. Бұл алгоритм пациенттің әрбір сәтті немесе сәтсіз әрекетін сараптап, келесі тапсырманың қиындығын автоматты түрде өзгертіп отырады [9]. Сонымен қатар, машиналық оқыту (Machine Learning) алгоритмдерін қолдану арқылы пациенттің қалпына келу динамикасын болжау мәселесі қарастырылды. Бұл дәрігерлерге қашықтықтан (telerehabilitation) науқастың жағдайын бақылап, емдік бағдарламаға дер кезінде түзетулер енгізуге мүмкіндік береді [10; 11].

Материалдар мен әдістері

Осы зерттеуде инсульттан кейінгі жоғарғы аяқ-қол қозғалысын жаттықтыруға арналған Kinect v2 негізіндегі интерактивті реабилитациялық жүйе және оған кіріктірілген «Ball Catch» ойындық жаттығу модулі қарастырылды. Жүйе қозғалысты маркерсіз тіркеу, жаттығу барысын өлшеу және нәтижені сандық метрикалар арқылы бағалау қағидаларына сүйеніп құрастырылды.

Құрылғылар мен бағдарламалық орта. Қозғалысты тіркеу үшін Microsoft Kinect v2 сенсоры қолданылды. Қаңқалық трекинг арқылы жоғарғы аяқ-қол буындарының координаталары алынып, ойындық ортада пайдаланылды. Бағдарламалық бөлік Unity ортасында (C#) іске асырылып, ойын объектілерімен өзара әрекет және сеанс параметрлері бір жүйеге біріктірілді.

Деректерді жинау және өңдеу. Kinect v2 беретін буын координаталары уақыт бойынша жазылып, кейінгі талдауға дайындалды. Қозғалыс

деректеріндегі кездейсоқ ауытқуларды азайту үшін базалық алдын-ала өңдеу қағидалары қолданылды. Қозғалыстың орындалуын сипаттайтын көрсеткіштер әр әрекет/сеанс деңгейінде есептелді және журналдау (лог) арқылы сақталды.

Бағалау метрикалары. Жаттығудың қалай орындалғанын әділ әрі нақты бағалау үшін бірнеше негізгі көрсеткіштер қолданылды. Біріншіден, табыстылық – нысанды қаншалықты жиі ұстайтыны және қанша қате жіберетіні есептелді. Екіншіден, реакция уақыты – нысан пайда болған сәттен бастап пайдаланушының жауап беруіне дейінгі уақыт өлшенді. Үшіншіден, қолдың қозғалыс амплитудасы (ROM) және траекториясының сипаты талданып, қозғалыстың еркіндігі мен тұрақтылығы бағаланды. Сонымен қатар, қайталау саны мен қарқын арқылы жаттығудың жалпы көлемі анықталды. Қажет болған жағдайда, нәтижені дәлірек түсіндіру үшін симметрия және тұрақтылық сияқты қосымша көрсеткіштер де енгізілді.

Адаптивтілік (қиындықты өзгерту) әдісі. Ойын параметрлері (мысалы, нысанның жылдамдығы, пайда болу жиілігі, қолжетімді аймақ және т.б.) пайдаланушының ағымдағы нәтижесіне қарай адаптивті түрде өзгертілді. Адаптацияның мақсаты – тапсырманы тым жеңіл/тым қиын қылмай, қауіпсіз деңгейде ұстап, тұрақты прогресс пен мотивацияны қамтамасыз ету.

Тексеру тәсілі. Жүйенің жұмыс қабілеттілігі мен тұрақтылығын тексеру үшін ойын сценарийлері бойынша қайталанатын іске қосулар орындалып, метрикалардың есептелуі, логтардың толықтығы және адаптивті механизмнің күтілетін бағытта өзгеруі бақылаудан өтті.

Нәтижелер және талқылау

Осы жұмыста Microsoft Kinect v2 негізінде жоғарғы аяқ-қолдың қозғалысын маркерсіз тіркейтін және «Ball Catch» ойындық жаттығуын орындайтын прототиптік жүйе іске асырылды. Жүйе қолданушының қол қозғалысы деректерін нақты уақыт режимінде қабылдап, жаттығуды орындау сапасын сипаттайтын негізгі метрикаларды есептеуге және сессия нәтижелерін журналдауға мүмкіндік береді.

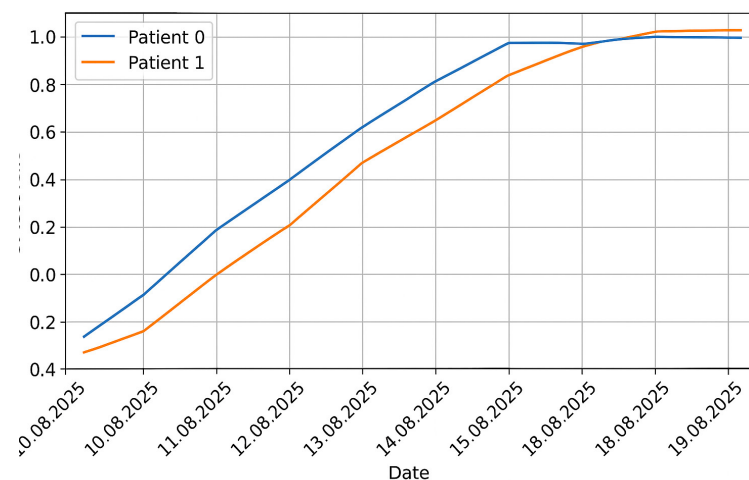
Зерттеу барысында екі пациенттің (PatientID = 0 және 1) 10 күндік реабилитация деректері талданды (Кесте 1).

1-кесте – Пациенттердің реабилитациялық динамикасы

	PatientID	Date	Score	SuccessRate	Reaction	Right hand	Left hand
1	0	10.08.25	21	0,38	5,5	58,6	60,3
2	1	10.08.25	25	0,43	5,6	60,2	61,8
3	1	11.08.25	22	0,53	5,2	59,5	55,9
4	0	11.08.25	21	0,58	5,1	62,2	63,9
5	0	12.08.25	22	0,75	5,2	66,9	71,2

6	1	12.08.25	20	0,83	5,3	71,9	72,7
7	1	13.08.25	21	0,83	5,4	72,5	71,1
8	0	13.08.25	22	0,83	5	71,8	76,4
9	0	14.08.25	25	0,92	4,8	75,7	73,8
10	1	14.08.25	24	0,83	4,2	78,3	73,8
11	1	15.08.25	24	0,75	4,6	77,3	79,2
12	0	15.08.25	23	0,83	4,3	81,5	78,1
13	0	16.08.25	18	0,75	4,5	83,6	82,7
14	1	16.08.25	19	0,58	4,6	86,5	91,7
15	1	17.08.25	24	0,75	4,8	94,3	90,3
16	0	17.08.25	26	0,75	4,9	91,4	93,4
17	0	18.08.25	27	0,95	4,7	90,6	96,1
18	1	18.08.25	25	0,83	4,5	92,7	95,6
19	1	19.08.25	29	0,92	4,6	92,1	93,4

Пациент 0 табыстылық деңгейін 54 %-ға, ал ROM көрсеткішін 37–39 %-ға арттырды (Сурет 1). Екі қол арасындағы симметрия айырмашылығы 1,7°-тан 1,2°-қа дейін азайды. Пациент 1-де де осындай оң динамика байқалды (ROM өсімі 51–53 %).



1-сурет – SuccessRate нәтижелерінің динамикасы

Қорытынды

Бұл ғылыми жұмыста Microsoft Kinect v2 сенсорына негізделген ойындық реабилитация жүйесі әзірленіп, инсульт алған науқастардың моторлық және когнитивтік функцияларын қалпына келтірудің тиімді құралы ретінде тексерілді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ойын форматы пациенттердің мотивациясын арттырып қана қоймай, жаттығуларды жүйелі орындауға итермелейді. Табыстылық (SuccessRate), қозғалыс амплитудасы (ROM), реакция уақыты және симметрия индексі сияқты сандық метрикалар пациенттердің қысқа мерзім ішінде айтарлықтай прогресс жасағанын дәлелдейді.

Екі пациенттің деректері талданғанда, барлығы 10 күн ішінде табыстылық деңгейінің 50 %-ға жуық өсуі, қол буындарының қозғалыс ауқымының 37–53 %-ға кеңеюі және қозғалыстар симметриясының жақсаруы тіркелді. Бұл жүйенің сенсорлық дәлдігі мен бейімделетін алгоритмдері шамадан тыс жүктемені болдырмай, тұрақты әрі қауіпсіз прогресс жасауға мүмкіндік берді.

Жалпы алғанда, Kinect v2 құрылғысына негізделген «Ball Catch» ойыны реабилитациялық процесті интерактивті әрі нәтижелі етуге қабілетті. Жүйе клиникалық орталарда да, үй жағдайында да қолданыла алады, ал жинақталған деректер дәрігерлерге пациенттің жағдайын объективті бағалауға мүмкіндік береді. Бұл шешім телереабилитацияға бейімделгендіктен, болашақта қашықтан медициналық бақылау жүйелерімен интеграциялануы мүмкін.

Осылайша, ұсынылған әдістеме инсульттен кейінгі науқастарды оналтудың тиімділігін арттыруға бағытталған перспективалы бағыт болып табылады және оны кең ауқымда клиникалық тәжірибеге енгізу маңызды ғылыми және әлеуметтік мәнге ие.

REFERENCES

- 1 World Health Organization (WHO). Stroke, Cerebrovascular accident. WHO EMRO. [Electronic resource]. – <https://www.emro.who.int/health-topics/stroke-cerebrovascular-accident>
- 2 **Zhakhina, G. et al.** Incidence and mortality rates of strokes in Kazakhstan in 2014–2019 // Scientific Reports. – 2022. – 12(1):16041. – <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20302-8>
- 3 **Adenova, G., Kausova, G., Tazhiyeva, A.** Improving multidisciplinary hospital care for acute cerebral circulation disorders in Kazakhstan // Heliyon. – 2023. – 9(8):e18435. – <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18435>
- 4 **Gwynne-Mayer, N. et al.** Adherence to exercise rehabilitation programmes in stroke survivors: a scoping review // BMJ Open Sport & Exercise Medicine. – 2025. – 11(3):e002102. – <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2024-002102>

5 **Sánchez-Gil, J. et al.** Gamified devices for stroke rehabilitation: A systematic review // International Journal of Medical Informatics. – 2025. – 185:105389. – <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108476>

6 **Bok, S. K. et al.** High-tech home-based rehabilitation after stroke: A systematic review and meta-analysis // Journal of Clinical Medicine. – 2023. – 12(7):2668. – <https://doi.org/10.3390/jcm12072668>

7 **Faity, G., Mottet, D., Froger, J.** Validity and reliability of Kinect v2 for quantifying upper body kinematics during seated reaching // Sensors. – 2022. – 22(7):2735. – <https://doi.org/10.3390/s22072735>

8 **An, H. S., Kim, D. J.** Effects of activities of daily living-based dual-task training on upper extremity function, cognitive function, and quality of life in stroke patients // Osong Public Health and Research Perspectives. – 2021. – 12(5):304–313. – <https://doi.org/10.24171/j.phrp.2021.0177>

9 **Osgouei, R. H., Soulsby, D., Bello, F.** Rehabilitation exergames: Use of motion sensing and machine learning to quantify exercise performance in healthy volunteers // JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies. – 2020. – 7(2):e17289. – <https://doi.org/10.2196/17289>

10 **Hao, J. et al.** Effects of virtual reality-based telerehabilitation for stroke: Systematic review and meta-analysis // Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. – 2023. – 32(3):106960. – <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2022.106960>

11 **Cattaneo, A. et al.** Assessing the accuracy of the Azure Kinect for telerehabilitation after breast cancer surgery // Studies in Health Technology and Informatics. – 2023. – 301:83–88. – <https://doi.org/10.3233/shti230017>

15.01.26 ж. баспаға түсті.

04.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

А. Е. Ошибаева¹, М. Е. Мансурова²,

**А. М. Шакир³, Т. С. Сарсембаева⁴*

¹Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Республика Казахстан, г. Туркестан;

^{2,3,4}Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 15.01.26.

Поступило с исправлениями 04.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕАБИЛИТАЦИИ ПОСЛЕ ИНСУЛЬТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕМАТИЧЕСКОГО И СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Данная работа посвящена разработке и исследованию игровой системы для реабилитации пациентов, перенесших инсульт, на базе сенсора Microsoft Kinect v2 и платформы Unity. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания доступных инструментов телереабилитации, позволяющих восстанавливать моторные функции в домашних условиях при сохранении высокой точности мониторинга. В статье подробно описывается применение методов стохастического моделирования и экспоненциального скользящего среднего (ЕМА) для обработки данных скелетного трекинга, что позволяет эффективно отделять патологические «шумы» (тремор, спастичу) от произвольных движений пациента. Основным инструментом терапии выступает разработанная игровая механика «Ball Catch», интегрирующая модуль двойных задач (dual-task training) для одновременной тренировки когнитивного торможения и моторной координации. Ключевой инновацией системы является адаптивный алгоритм сложности, который в реальном времени корректирует параметры упражнений (скорость и размер объектов) на основе успешности выполнения (SuccessRate), предотвращая переутомление. Результаты пилотного тестирования двух пациентов в течение 10 дней показали значимую положительную динамику: увеличение амплитуды движений в суставах (ROM) на 37–53 % и улучшение индекса симметрии движений на 1,2–1,3°. Полученные данные подтверждают, что использование бесконтактных датчиков в сочетании с алгоритмической фильтрацией обеспечивает точность оценки прогресса, сопоставимую с клиническими стандартами, и повышает вовлеченность пациентов в процесс очного и дистанционного лечения.

Ключевые слова: нейрореабилитация, Microsoft Kinect v2, Unity, скелетный трекинг, стохастическое моделирование, геймификация, когнитивные функции, телереабилитация.

A. E. Oshibayeva¹, M. E. Mansurova²,

*A. M. Shakir³, T. S. Sarsembayeva⁴

¹Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
Republic of Kazakhstan, Turkestan;

^{2,3,4}Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 15.01.26.

Received in revised form 04.02.26.

Accepted for publication 19.03.26.

OPTIMIZING POST-STROKE REHABILITATION THROUGH KINEMATIC AND STOCHASTIC MODELING

This work focuses on the development and investigation of a game-based rehabilitation system for post-stroke patients using the Microsoft Kinect v2 sensor and the Unity platform. The relevance of the study is driven by the need for affordable telerehabilitation tools that enable motor function recovery at home while maintaining high monitoring accuracy. The paper describes in detail the use of stochastic modeling methods and an exponential moving average (EMA) to process skeletal-tracking data, which helps effectively separate pathological “noise” (tremor, spasticity) from a patient’s voluntary movements. The core therapeutic component is the proposed “Ball Catch” game mechanic, which integrates a dual-task training module to simultaneously train cognitive inhibition and motor coordination. A key innovation of the system is an adaptive difficulty algorithm that adjusts exercise parameters (object speed and size) in real time based on performance (SuccessRate), helping to prevent overfatigue. Pilot testing with two patients over 10 days demonstrated a meaningful positive trend, including a 37–53 % increase in joint range of motion (ROM) and an improvement in the movement symmetry index by 1.2–1.3°. The findings indicate that combining contactless sensors with algorithmic filtering can provide progress assessment accuracy comparable to clinical standards and increase patient engagement in both in-person and remote rehabilitation.

Keywords: neurorehabilitation, Microsoft Kinect v2, Unity, skeletal tracking, stochastic modeling, gamification, cognitive functions, telerehabilitation.

FTAMP 28.23.15

<https://doi.org/10.48081/BGQF1888>

***Д. Ж. Хабсихова¹, Ұ. Ж. Айтимова²**

^{1,2}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6759-3211>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0803-7137>

*e-mail: dilnaz.zhansikh@bk.ru

ТУРИСТІК НЫСАНДАРДЫ ТАНУ ДӘЛДІГІНЕ ВИЗУАЛДЫ ДЕРЕКТЕР ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ

Мақала туристік нысандарды автоматты түрде тану дәлдігіне визуалды деректердің сапалық параметрлерінің әсерін бағалауға бағытталған. Зерттеудің негізгі мақсаты – кескін сапасының статистикалық сипаттамаларының туристік нысандарды тану жүйелерінің тиімділігіне ықпалын талдау. Зерттеу нысаны ретінде Қазақстан аумағындағы туристік маңызы бар 12 нысанды қамтитын әрі әр сыныпта 300 кескіннен тұратын деректер жиынтығы қолданылды. Талдау барысында қолданылған кескіндер әртүрлі жарықтандыру деңгейлерінде, ауа райының өзгермелі факторларында және әрқилы түсіру бұрыштары жағдайында алынған, бұл визуалды деректер сапасының біркелкілігінің толық көлемде сақталмауына себеп болады.

Кескіндердің сапасын сипаттау үшін негізгі сапалық параметрлері, атап айтқанда жарықтылық (brightness), контраст (contrast) және айқындық (sharpness) есептелді. Алынған мәліметтер негізінде параметрлер арасындағы өзара байланысты зерттеу үшін корреляциялық талдау, деректер құрылымын зерттеу үшін басты компоненттер әдісі (PCA) және кескіндердің сапа деңгейіне қарай топтастыру үшін K-Means кластерлеу алгоритмі қолданылды. Зерттеу нәтижелері кескін айқындығының туристік нысандарды тану дәлдігіне айтарлықтай ықпал ететінін көрсетті, ал шу деңгейінің артуы тану сапасының төмендеуіне әкеледі. Жарықтылық параметрінің әсері салыстырмалы түрде әлсіз екені байқалды. Зерттеу қорытындысы туристік нысандарды тану жүйелерін жобалау кезінде визуалды деректер сапасын алдын ала ескерудің маңыздылығын дәлелдейді.

Кілтті сөздер: туристік нысандарды тану, визуалды деректер сапасы, кескін айқындығы, PCA, K-Means кластерлеу, корреляциялық талдау.

Кіріспе

Соңғы жылдары интеллектуалды деректерді өңдеу және компьютерлік көру технологияларының қарқынды дамуы нысанды тану жүйелерін әртүрлі қолданбалы салаларда кеңінен пайдалануға жол ашты. Аталған технологиялар туризм индустриясында да туристік нысандарды анықтау, ақпараттық қолдау көрсету, сондай-ақ цифрлық туристік қызметтерді дамыту үшін маңызды құралға айналуда. Осы тұрғыдан алғанда туристік әлеуеті жоғары Қазақстан үшін туристік нысандарды автоматты түрде тану жүйелерінің дәлдігі мен тиімділігін арттыру ерекше өзектілікке ие.

Қазіргі таңда туристік нысандарды тану жүйелерін дамыту бағытында бірқатар ғылыми зерттеулер жүргізілуде. Алайда бұл зерттеулердің басым бөлігінде тану дәлдігін арттыру мақсатында нейрондық желілердің архитектурасын жетілдіруге немесе үлкен көлемді деректер жиынтығын қолдануға басымдық беріледі. Сонымен қатар тану жүйелерінің тиімділігіне тікелей әсері бар визуалды деректердің сапалық параметрлерінің ықпалы жеткілікті деңгейде ғылыми тұрғыдан толық ашылмаған. Бұл өз кезегінде нақты жағдайда алынған кескіндермен жұмыс істеу барысында жүйелердің сенімділігі мен тұрақтылығына кері әсер беруі мүмкін [1].

Нақты қолданбалы ортада алынған туристік нысандардың кескіндері әртүрлі жарықтандыру жағдайларында, ауа райының өзгермелі факторлары әсерінде, әрқилы түсіру бұрыштарында және әртүрлі техникалық құралдарға байланысты айтарлықтай өзгереді. Мұндай факторлар визуалды деректер сапасының біркелкілігін бұзып, кескіндердің айқындығының төмендеуі әрі шу деңгейінің артуы туристік нысандарды автоматты түрде тану дәлдігіне теріс әсер беруі мүмкін [2].

Зерттеу тақырыбының өзектілігі туристік нысандарды тану жүйелерінің кіріс деректері ретінде айқындалатын деректер сапасының параметрлерін сандық тұрғыдан талдау қажеттілігімен сипатталады. Жарықтылық, контраст және айқындық сынды негізгі параметрлердің тану дәлдігіне әсерін бағалау теориялық тұрғыдан компьютерлік көру саласындағы деректердің статистикалық қасиеттерін тереңірек түсінуге мүмкіндік берсе, тәжірибелік тұрғыдан тану жүйелерін жобалау үдерістерінде деректер жиынтығын қалыптастыру мен алдын ала өңдеу кезеңдерін оңтайландыруға негіз болады. Соның нәтижесінде туристік ақпараттық жүйелердің сапасын арттыруға және олардың қолдану аясын кеңейтуге жағдай жасайды [3].

Осылайша визуалды деректер сапасының параметрлерінің туристік нысандарды тану дәлдігіне әсерін зерттеу қазіргі заманауи интеллектуалды жүйелерді дамыту талаптарына толық сәйкес келетін, ғылыми жаңалығы мен тәжірибелік маңыздылығы жоғары өзекті зерттеу бағыты болып саналады.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу барысында туристік нысандарды автоматты түрде тану дәлдігіне визуалды деректер сапасы параметрлерінің әсерін бағалау мақсатында кескіндер жиынтығы мен статистикалық талдау әдістері қолданылды. Зерттеу жұмысы бірнеше өзара байланысқан кезеңдерден тұрды: деректер жиынтығын қалыптастыру, кескін сапасының параметрлерін есептеу және алынған көрсеткіштерді талдаудың сандық әдістерін қолдану [2]; [3].

Зерттеу материалы ретінде Қазақстан аумағындағы туристік әлеуеті жоғары 12 нысанды қамтитын кескіндер жиынтығы таңдалды. Әрбір туристік нысан жеке сынып ретінде қарастырылып, әр сыныпта 300 кескіннен тұратын, жалпы саны 3600-ге жуық кескін қолданылды. Кескіндер әртүрлі жарықтандыру деңгейлерінде, ауа райының өзгермелі факторлары әсерінде және әрқилы түсіру бұрыштарында алынған, бұл деректер жиынтығының визуалды сапасының әркелкі болуын қамтамасыз етеді. Барлық кескіндер стандартты сандық форматта (JPEG, PNG) сақталып, нақты қолданбалы ортада алынған визуалды деректердің сапалық ерекшеліктерін сақтау мақсатында өңделді [4].

Кескін сапасын сандық тұрғыдан сипаттау үшін келесі негізгі визуалды параметрлер есептелді: жарықтылық (brightness), контраст (contrast) және айқындық (sharpness). Мұндағы, жарықтылық параметрі кескіннің сұр реңкті бейнесіндегі пиксель мәндерінің орташа шамасы ретінде анықталды. Ал, контраст сол мәндердің стандартты ауытқуы арқылы, айқындық параметрі Лапласиан операторы негізінде есептелген дисперсия мәнімен бағаланды [2]; [3]. Әрбір кескін үшін аталған параметрлер жеке есептеліп, кейінгі талдау үшін кестелік деректер форматында жинақталды.

Визуалды параметрлер арасындағы өзара тәуелділікті анықтау мақсатында корреляциялық талдау жүргізілді. Нәтижесінде алынған корреляциялық матрица жарықтылық, контраст және айқындық параметрлері арасындағы сызықтық байланыстарды бағалауға мүмкіндік берді. Деректер құрылымын зерттеу және визуалды параметрлердің ықшам көрінісін алу үшін басты компоненттер әдісі (Principal Component Analysis, PCA) пайдаланылды. PCA әдісі параметрлер кеңістігін екі негізгі компонентке қысқарту арқылы кескіндердің таралуын көрнекі түрде талдауға мүмкіндік берді [5]. Кескіндерді сапа деңгейі бойынша жіктеу үшін K-Means кластерлеу алгоритмі қолданылды. Кластерлеу PCA әдісі нәтижесінде алынған екі

өлшемді деректер негізінде жүргізіліп, кескіндер бірнеше сапалық топтарға ажыратылып, әрбір кластердің орташа сапалық көрсеткіштері есептелді.

Туристік нысандарды тану жүйесінің тиімділігі негізгі бағалау метрикасы дәлдік көрсеткіші (accuracy) арқылы сипатталды. Визуалды деректер сапасының параметрлерін өзгерту арқылы алынған тану нәтижелері салыстырылып, олардың тану дәлдігіне әсері сандық тұрғыдан бағаланды.

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу барысында туристік нысандар кескіндерінің визуалды сапалық параметрлеріне сандық бағалау жүргізіліп, әрбір сынып бойынша орташа статистикалық сипаттамалар анықталды. Талдау туристік нысандарға тиесілі визуалды деректердің сапалық тұрғыдан біркелкі емес екенін және олардың сипаттамалары нысанның түріне, түсіру процесінің шарттарына және қоршаған орта факторларына тәуелді екенін көрсетті. 1-кестеде туристік нысандар кескіндерінің орташа жарықтылық, контраст және айқындық мәндері көрсетілген.

1-кесте – Туристік нысандар кескіндерінің орташа визуалды параметрлері

Сынып	Орташа жарықтылық (Brightness)	Орташа контраст (Contrast)	Орташа айқындық (Sharpness)
Бәйтерек монументі	113.94	52.55	1483.69
Бозжыра шатқалы	138.64	43.13	1069.53
Бурабай ұлттық паркі	125.80	58.82	1429.80
Йассауи кесенесі	124.36	52.09	1903.83
Каравансарай	109.67	54.33	1280.36
Көлсай	111.91	59.10	1662.22
Медеу мұз айдыны	112.70	59.14	2227.60
Бейбітшілік және келісім сарайы	127.40	51.77	839.88
Хазрет Сұлтан мешіті	111.57	50.27	1328.90
Ханшатыр	116.25	51.64	996.94
Шарын шатқалы	117.45	54.70	2087.37
Экспо көрмесі	110.98	54.83	1433.64

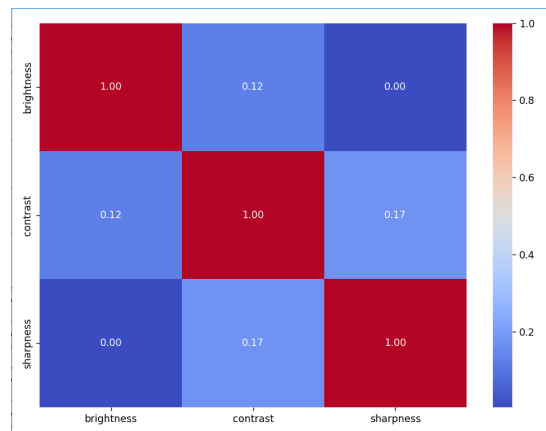
Кестеде келтірілген деректер әр туристік нысан үшін орташа жарықтылық, контраст және айқындық мәндерінің айтарлықтай өзгеретінін көрсетеді. Орташа жарықтылық мәндері 109–139 аралығында өзгеріп, ең жоғары көрсеткіш Бозжыра шатқалына тән екені байқалады. Бұл аймақтың ашық табиғи ландшафты мен ондағы жарықтың біркелкі таралуы жоғары жарықтылық мәндерін қалыптастырады. Ал қалалық нысандарда, соның

ішінде Каравансарай мен Экспо көрмесі нысандарында жарықтылық деңгейі салыстырмалы түрде төмен.

Контраст көрсеткіштері бойынша Бурабай ұлттық паркі мен Көлсай және Медеу мұз айдыны жоғары мәндерге ие. Бұл нысандарда жарық және көлеңке аймақтарының айқын айырмашылығы байқалып, визуалды белгілердің бөлінуі жақсарады. Ал, Бозжыра шатқалы мен Бейбітшілік және келісім сарайы керісінше, кескін құрылымының біркелкі болуына байланысты контрасттың төмен мәндерімен сипатталады.

Айқындық параметрі зерттелген туристік нысандар арасында ең жоғары өзгергіштік деңгейін көрсетті. Айқындықтың жоғары мәндері Медеу мұз айдыны, Шарын шатқалы және Йассауи кесенесіне тән. Бұл нысандардың құрылымдық элементтері мен текстураларының күрделілігі жоғары жиілікті визуалды ақпараттың молдығымен түсіндіріледі. Ал Бейбітшілік және келісім сарайы мен Ханшатыр нысандарында айқындықтың төмен деңгейі байқалады, бұл беттердің тегістігі мен симметриялы формаларға байланысты. [6] еңбегінде күрделі жарықтандыру жағдайларында кескін сапасының төмендеуі нысандарды тану дәлдігін айтарлықтай төмендететіні көрсетілген. Яғни, айқындық пен контраст модель тұрақтылығына тікелей әсер ететін негізгі фактор саналып, жүргізілген зерттеу нәтижелерін жанама түрде растайды.

Визуалды деректер сапасының параметрлері арасындағы өзара байланысты анықтау үшін корреляциялық талдау жүргізілді. Талдау барысында таңдалған көрсеткіштер арасындағы сызықтық тәуелділіктер Пирсон корреляция коэффициенті негізінде бағаланды. Корреляциялық матрица нәтижелері 1-суретте графикалық түрде ұсынылған.

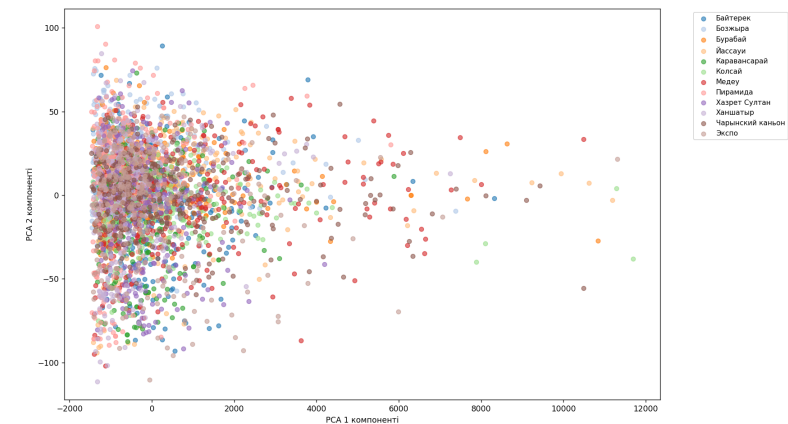


1-сурет – Визуалды параметрлер арасындағы корреляциялық матрица

Алынған корреляциялық матрица нәтижелері параметрлер арасында айтарлықтай тәуелділіктің жоқ екенін көрсетті. Корреляция коэффициенттерінің 0.005–0.17 аралығында болуы аталған көрсеткіштердің өзара әлсіз байланыста екенін және олардың кескін сапасын сипаттайтын дербес параметр ретінде қарастырылатынын дәлелдейді [7].

Мұндай тәуелсіздік туристік нысандарды тану жүйелерінің тиімділігі тұрғысынан оң сипатқа ие, себебі қазіргі заманғы тану алгоритмдері бір ғана параметрге емес, визуалды белгілердің жиынтығына негізделеді. Параметрлер арасындағы төмен корреляция кескін сапасын бағалауда әр көрсеткішті жеке белгі ретінде қолданудың негізді екенін көрсетеді.

Визуалды деректер сапасының құрылымын және параметрлер арасындағы жасырын заңдылықтарды анықтау мақсатында басты компоненттер әдісі (Principal Component Analysis, PCA) қолданылды. Бұл әдіс жарықтылық, контраст және айқындық көрсеткіштерін біртұтас кеңістікте қарастырып, кескіндерді төмен өлшемді кеңістікте проекциялауға мүмкіндік береді. PCA талдауы кескіндердің туристік нысандардың түріне емес, визуалды сапалық сипаттамаларына сәйкес қарастырылуына бағытталды [8]. Соған сәйкес, аталған әдіс туристік нысандарды нақты жіктеу құралы ретінде емес, визуалды деректер сапасының құрылымын зерттеу әдісі ретінде қолданылды. Сол себепті 2-суретте бейнеленген график нәтижесіндегі сыныптар арасындағы қабаттасу деректердің табиғи қасиетін көрсетеді және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына нұқсан келтірмейді.



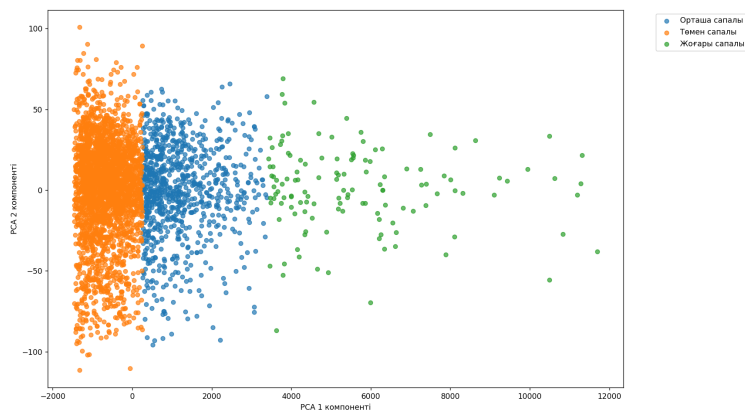
2-сурет – PCA арқылы алынған екіөлшемді проекция

Басты компоненттер әдісінің нәтижелері бойынша кескіндер PCA кеңістігінде біркелкі, бірақ ішінара қабаттасқан құрылым түзетіні

байқалады. Мұндай таралу визуалды сапа параметрлерінің нақты туристік нысандарға тән сипаттамалардан гөрі, түсіру жағдайларының әртүрлілігімен айқындалатынын білдіреді. Бір туристік нысан әртүрлі жарықтандыру, ауа райы немесе түсіру бұрыштары жағдайында алынуы мүмкін болғандықтан, сыныптар арасындағы айқын шекаралардың болмауы зерттеліп отырған құбылыстың табиғи сипатын айқындайды.

Сонымен қатар деректердің PCA 1 осі бойымен айқын созылыңқы орналасуы кескін сапасындағы негізгі вариативтіліктің бірінші басты компонентпен сипатталатынын көрсетеді. Бұл компонент кескін айқындылығы мен контраст деңгейіндегі айырмашылықтарды жинақтайды. Ал деректер кеңістігіндегі тығыз орталық аймақ орташа сападағы кескіндердің басым үлесін білдірсе, ал шеткері нүктелер сапалық көрсеткіштері айқын ерекшеленетін деректерді бейнелейді. Аталған құрылым PCA нәтижелерінің визуалды деректер сапасының құрылымдалған кеңістігін қалыптастыратынын және бұл кеңістік кейінгі кластерлеу және тану дәлдігін зерттеуге негіз қалайды.

Алынған PCA кеңістігінде визуалды деректерді сапа деңгейі бойынша саралау үшін K-Means кластерлеу алгоритмі қолданылды. Бұл әдіс жарықтылық, контраст және айқындық көрсеткіштеріне негізделген кескіндер арасындағы өзара ұқсастықтарды анықтауға мүмкіндік береді. Аталған тәсіл туристік нысандарды емес, кескіндердің сапалық сипаттамаларын талдауға негізделгенін атап өткен жөн. Осылайша 3-суретте көрсетілген K-Means алгоритмі визуалды деректер сапасының құрылымын айқындау және оның тану жүйелерінің тиімділігіне ықпалын жанама түрде бағалау құралы ретінде пайдаланылды.



3-сурет – K-Means кластерлеу нәтижелері

Кластерлеу барысында деректер сапасының шартты түрде төмен, орташа және жоғары деңгейлері бойынша сыныптар саны үшке тең етіп таңдалды. Кластерлер негізінен бірінші басты компонент осі бойында шоғырланған. Бұл өз кезегінде кластерлеу нәтижелерінің кездейсоқ мәндер емес екенін және кескін сапасының параметрлерімен логикалық түрде түсіндіретінін дәлелдейді [9]. Төмен сапалы кескіндер бірінші кластерді құрап, оларда айқындық пен контраст деңгейі төмен, сондай-ақ түсіру жағдайлары қолайсыз болып табылады. Екінші кластер орташа сападағы кескіндерді қамтиды және деректер жиынтығының басым бөлігін құрайды. Үшінші кластер айқын құрылымға ие, жақсы жарықтандырылған және контрастылығы жоғары сапалы кескіндерді біріктіреді. Мұндай нәтижелер визуалды деректер сапасының туристік нысандарды тану жүйелерінің тиімділігіне елеулі әсер ететінін айқындайды.

Визуалды деректер сапасының тану дәлдігіне әсерін сандық тұрғыда бағалау мақсатында негізгі визуалды параметрлер мен тану дәлдігі (accuracy) арасындағы өзара байланыс талданды. Зерттеу барысында параметрлердің өзгерісіне сәйкес тану дәлдігінің ауытқуы және Пирсон корреляция коэффициенттері есептелді. Талдау нәтижелері 4-кестеде ұсынылған. Мұндағы шу (noise) деңгейінің қарастырылуы визуалды белгілерді тікелей бұрмалайтын дербес фактор ретінде тану жүйесінің тұрақтылығы мен сенімділігіне елеулі ықпал етуімен түсіндіріледі.

4-кесте – Визуалды параметрлер мен тану дәлдігі арасындағы байланыс

Параметр	Өзгеру диапазоны	Accuracy өзгерісі	Корреляция
Sharpness	↓ 30 %	-22 %	$r = 0.81$
Noise	+ 20 %	-17 %	$r = -0.72$
Brightness	↓ 40 %	-8 %	$r = 0.29$

Айқындық параметрі ең жоғары оң корреляцияны көрсетіп ($r = 0.81$), оның 30 %-ға төмендеуі сәйкесінше тану дәлдігінің 22 %-ға азаюына әкелгені байқалады. Бұл айқындықтың туристік нысандардың негізгі құрылымдық белгілерін ажыратуда шешуші рөл атқаратынын дәлелдейді. Ал, шу деңгейінің 20 %-ға артуы тану дәлдігінің 17 %-ға төмендеуіне себеп болып, жоғары теріс корреляциямен сипатталады ($r = -0.72$), бұл кескіндегі кездейсоқ артефактілердің тану процесіне кері әсерін көрсетеді [10]. Жарықтылық параметрі бойынша әлсіз корреляция байқалады ($r = 0.29$), мұнда жарықтылықтың 40 %-ға төмендеуі тану дәлдігіне салыстырмалы түрде аз әсер еткен.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер визуалды деректер сапасының туристік нысандарды тану дәлдігіне белгілі бір дәрежеде ықпал ететінін

және әсіресе айқындық пен шу параметрлерінің шешуші маңызға ие екенін растайды. Бұл тұжырымдар кескіндерді алдын ала өңдеу кезеңінде сапа параметрлерін оңтайландырудың қажеттілігін негіздейді.

Көптеген зерттеулерде нейрондық желілердің құрылымына басымдық берілсе, бұл жұмыста кескін сапасының бастапқы параметрлері жүйенің жалпы жұмысына әсері қарастырылды. Әсіресе, айқындық пен контраст көрсеткіштерін оңтайландыру туристік нысандарды автоматты түрде тану жүйелерінің дәлдігін арттырудың маңызды факторы болып табылады.

Қорытынды

Зерттеу жұмысы туристік нысандарды тану жүйелерінің дәлдігі визуалды деректердің сапалық сипаттамаларына тікелей тәуелді екенін дәлелдеді. Жүргізілген талдау нәтижелері бойынша кескін айқындығы (sharpness) мен контраст деңгейінің әсері жоғары екендігі, ал шу деңгейінің артуы модельдің жұмыс сапасын төмендететіні анықталды. Жарықтылық параметрінің әсері өзге параметрлермен салыстырғанда әлсіз болғанымен, оның шектен тыс өзгеруі де тану нәтижелеріне кері ықпал етуі мүмкін екені байқалды [6; 7].

Алынған нәтижелер зерттеу мақсатының толық орындалғанын және кескін сапасының статистикалық сипаттамалары туристік нысандарды тану жүйелерінің сенімділігін бағалауда маңызды индикаторлар ретінде қолданылуы мүмкін екенін растайды. Осы тұрғыда нейрондық желілер архитектурасын ғана жетілдіруге бағытталған дәстүрлі тәсілдермен қатар, бастапқы визуалды деректер сапасын алдын ала талдаудың ғылыми және тәжірибелік маңыздылығы айқындалды.

Бұдан бөлек, зерттеу нәтижелері компьютерлік көру саласындағы қолданбалы жүйелерді, соның ішінде цифрлық туризм платформаларын әзірлеу барысында деректерді іріктеу, алдын ала өңдеу және сапасын бақылау кезеңдеріне ерекше назар аудару арқылы жүйелі түрде енгізу қажеттігін негіздейді. Бұл туристік нысандарды автоматты тану жүйелерінің жалпы дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Болашақта визуалды деректер сапасын сипаттайтын қосымша параметрлерді (түстік қанықтылық, экспозиция тұрақтылығы және т.с.с) ескере отырып, әртүрлі нейрондық желі архитектуралары үшін сапа факторларының әсерін салыстырмалы түрде талдау жүргізу ұсынылады. Сонымен қатар, ұсынылған тәсілді кең ауқымды және көпмодальды деректер жиынтығында қолдану алынған қорытындылардың жалпылану деңгейін арттыруға ықпал етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Makhatbek, I., Kabdrakhova, S.** Kazakh traditional food image classification using CNNs [Текст] // Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies. – 2025. – № 2. – Vol. 3. – P. 45–58.

2 **Гонсалес, Р. С., Вудс, Р. Е.** Цифровая обработка изображений [Текст]. – М. : Техносфера, 2012. – 1104 с.

3 **Солонина, А. И., Ушаков, А. А.** Цифровая обработка сигналов и изображений [Текст]. – СПб. : Питер, 2018. – 544 с.

4 **Шапиро, Л., Стокман, Дж.** Компьютерное зрение [Текст]. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 752 с.

5 **Kılıç, D. K., et al.** Comparative analyses of unsupervised PCA-K-Means change detection algorithm from the viewpoint of follow-up plan [Текст] // Sensors. – 2022. – № 23. – Vol. 22. – P. 9172.

6 **Zhassuzak, M., Narkeshova, F., Buribaev, Z., Matkerim, B.** Development of a genetic algorithm for optimizing convolutional neural networks in order to improve the accuracy of object detection in difficult lighting and background conditions [Text] // Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies. – 2025. – № 2. – Vol. 3.

7 **Zhang, L., Zhang, L., Bovik, A. C.** A feature-enriched completely blind image quality evaluator [Text] // IEEE Transactions on Image Processing. – 2015. – № 8. – Vol. 24. – P. 2579–2591.

8 **Форсайт, Д., Понс, Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход [Текст]. – М. : Вильямс, 2016. – 928 с.

9 **Ikotun, A. M., Ezugwu, A. E., Abualigah, L., Abuhaija, B., Heming, J.** K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data [Text] // Information Sciences. – 2023. – Vol. 622. – P. 178–210.

10 **Ryu, J.** Improved image quality assessment by utilizing pre-trained architecture features in a blind framework [Text] // Applied Sciences. – 2023. – № 4. – Vol. 13. – Article 2682.

REFERENCES

1 **Makhatbek, I., Kabdrakhova, S.** Kazakh traditional food image classification using CNNs [Text] // Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies. – 2025. – № 2. – Vol. 3. – P. 45–58.

2 **Gonsales, R. S., Vuds, R. E.** Cifrovaya obrabotka izobrazhenij [Digital image processing] [Text]. – Moscow : Texnosfera, 2012. – 1104 p.

3 **Solonina, A. I., Ushakov, A. A.** Cifrovaya obrabotka signalov i izobrazhenij [Digital signal and image processing] [Text]. – St.-Petersburg : Piter, 2018. – 544 p.

4 **Shapiro, L., Stokman, Dzh.** Komp'yuternoe zrenie [Computer vision] [Text]. – Moscow : BINOM. Laboratoriya znaniy, 2015. – 752 p.

5 **Kılıç, D. K., et al.** Comparative analyses of unsupervised PCA-K-Means change detection algorithm from the viewpoint of follow-up plan [Text] // Sensors. – 2022. – № 23. – Vol. 22. – P. 9172.

6 **Zhassuzak, M., Narkeshova, F., Buribaev, Z., Matkerim, B.** Development of a genetic algorithm for optimizing convolutional neural networks in order to improve the accuracy of object detection in difficult lighting and background conditions [Text] // Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies. – 2025. – № 2. – Vol. 3.

7 **Zhang, L., Zhang, L., Bovik, A. C.** A feature-enriched completely blind image quality evaluator [Text] // IEEE Transactions on Image Processing. – 2015. – № 8. – Vol. 24. – P. 2579–2591.

8 Forsajt, D., Pons, Zh. Komp'yuternoe zrenie. Sovremenny'j podxod [Computer vision. Modern approach] [Text]. – Moscow : Vil'yams, 2016. – 928 p.

9 **Ikotun, A. M., Ezugwu, A. E., Abualigah, L., Abuhaija, B., Heming, J.** K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data [Text] // Information Sciences. – 2023. – Vol. 622. – P. 178–210.

10 **Ryu, J.** Improved image quality assessment by utilizing pre-trained architecture features in a blind framework [Text] // Applied Sciences. – 2023. – № 4. – Vol. 13. – Article 2682.

18.01.26 ж. баспаға түсті.

13.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Д. Ж. Хабсихова¹, Ұ. Ж. Айтимова²

^{1,2}Қазақский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 18.01.26.

Поступило с исправлениями 13.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИЗУАЛЬНЫХ ДАНЫХ НА ТОЧНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ТУРИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Статья направлена на оценку влияния качественных параметров визуальных данных на точность автоматического распознавания туристических объектов. Основной целью исследования является анализ влияния статистических характеристик качества изображений на эффективность систем распознавания туристических объектов. В качестве объекта исследования использован набор данных, включающий 12 туристически значимых объектов на территории Казахстана, при этом каждый класс содержит по 300 изображений. Используемые в анализе изображения были получены при различных условиях освещённости, изменяющихся погодных факторах и разнообразных углах съёмки, что приводит к отсутствию полной однородности качества визуальных данных.

Для описания качества изображений были рассчитаны основные качественные параметры, а именно яркость (brightness), контраст (contrast) и резкость (sharpness). На основе полученных данных был проведён корреляционный анализ для изучения взаимосвязей между параметрами, применён метод главных компонент (PCA) для анализа структуры данных, а также алгоритм кластеризации K-Means для группировки изображений по уровню качества. Результаты исследования показали, что резкость изображения оказывает существенное влияние на точность распознавания туристических объектов, тогда как увеличение уровня шума приводит к снижению качества распознавания. Влияние параметра яркости оказалось сравнительно слабым. Полученные результаты подтверждают важность предварительного учёта качества визуальных данных при проектировании систем распознавания туристических объектов.

Ключевые слова: распознавание туристических объектов, качество визуальных данных, резкость изображения, PCA, кластеризация K-Means, корреляционный анализ.

*D. Zh. Khabsikhova¹, U. Zh. Aitimova²

^{1,2}Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 18.01.26.

Received in revised form 13.02.26.

Accepted for publication 19.03.26.

INFLUENCE OF VISUAL DATA PARAMETERS ON THE ACCURACY OF TOURIST OBJECT RECOGNITION

The article is aimed at evaluating the impact of visual data quality parameters on the accuracy of automatic tourist object recognition. The main objective of the study is to analyze the influence of statistical characteristics of image quality on the effectiveness of tourist object recognition systems. The dataset used in this research consists of 12 tourist attractions located in Kazakhstan, with each class containing 300 images. The images were acquired under various lighting conditions, changing weather factors, and different shooting angles, which results in a lack of complete uniformity in visual data quality.

To characterize image quality, the key parameters such as brightness, contrast, and sharpness were calculated. Based on the obtained data, a correlation analysis was performed to investigate the relationships between the parameters, principal component analysis (PCA) was applied to examine the data structure, and the K-Means clustering algorithm was used to group images according to quality levels. The results demonstrate that image sharpness has a significant impact on the accuracy of tourist object recognition, while an increase in noise level leads to a decrease in recognition performance. The influence of brightness was found to be relatively weak. The findings confirm the importance of considering visual data quality in advance when designing tourist object recognition systems.

Keywords: tourist object recognition, visual data quality, image sharpness, PCA, K-Means clustering, correlation analysis.

«ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ФИЗИКА» СЕКЦИЯСЫ

SRSTI 29.19.31, 61.35.29

<https://doi.org/10.48081/BGQF1897>

**Zainul Abideen Abbati¹, *Ibrahim Abdullahi²,
Sagir Lawan Waziri³, Nazif Yusuf Sule⁴, Hindatu Idris Umar⁵**

¹Department of Welding and Fabrication Engineering Technology,
Kano State Polytechnic, Nigeria;

²Department of Mechanical Engineering, Bayero University Kano, Nigeria;

^{3,4}Department of Mechanical Engineering, Kano State Polytechnic, Nigeria

⁵Department of Textile and Polymer Technology, Kano State Polytechnic, Nigeria.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8084-3064>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7514-7458>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-2344>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2863-8421>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9679-3512>

*e-mail: hod.abdullahiibrahim@buk.edu.ng

INVESTIGATION INTO THE POTENTIAL OF USING SAND FOR GLASS MAKING

An investigation was conducted on sand deposits from Dawakin Kudu to evaluate their suitability for glassmaking. Analytical methods including chemical analysis via X-Ray Diffraction (XRD), density and specific gravity tests, and grain size distribution analysis (sieve analysis) were employed. Experimental results showed a high silica content (SiO₂) of 98.03%. An average density was 1.033 g cm⁻³, and the specific gravity of 1.84 suggests the sand is suitable for glass production, as it falls below the recommended threshold of 2.65 for silica sand. Sieve analysis revealed the highest retention at sieve number 30, aligning with the specifications for glassmaking sand according to ASTM C778-06. The average grain size was 0.595 mm. Historically, the sand has been used in water filtration, construction, pottery, and ceramics. This study highlights the potential of the Dawakin Kudu sand as an additional domestic source of silica for glassmaking, which could support local industry and create job opportunities in the region.

Keywords: Sand, Crystals, Glass, Soda-Lime, Silica.

Introduction

Silica, chemically known as silicon dioxide (SiO_2), is one of the most abundant minerals in the Earth's crust, composed primarily of silicon and oxygen. It occurs in both amorphous and crystalline forms, with quartz being the most stable and widely distributed crystalline form. The mineral is the primary constituent of industrial sand, often referred to as silica sand, which is utilized in numerous industrial applications such as glass manufacturing, foundry casting, ceramics production, water filtration, and construction materials [1]. Silica's abundance, chemical stability, and thermal resistance make it one of the most economically important non-metallic industrial minerals worldwide.

Silica sand is defined as sand containing a high percentage of SiO_2 , typically above 95 %, with minimal impurities such as iron oxide (Fe_2O_3), alumina (Al_2O_3), and alkali oxides [2]. Its commercial significance arises from its purity, controlled particle size distribution, and chemical inertness. In the glass industry, silica serves as the principal raw material for the production of various types of glass including container glass, flat glass, optical glass, and specialty glasses used in electronics and high-temperature engineering applications [3]. The production of high-quality glass requires silica sand with a SiO_2 content exceeding 98 %, minimal iron impurities (generally less than 0.03 %), and a uniform grain size distribution to ensure homogeneity during melting [4].

In addition to glassmaking, silica sand is vital in the foundry industry as a molding material, in hydraulic fracturing operations as proppants, and in ceramics manufacturing as a structural component of clay-based products [5]. It is also used in water filtration systems due to its particle size uniformity and mechanical strength, as well as in the production of refractory materials and silicon-based alloys. These diverse applications underline the necessity for a thorough understanding of silica sand properties from different deposits before recommending them for specific industrial uses.

Silica sand is typically derived from the weathering, disintegration, and erosion of rocks containing quartz and other silicate minerals. These processes lead to the accumulation of quartz-rich sands in riverbeds, beaches, dunes, and other sedimentary environments [6]. The resulting sand is often loose and unconsolidated, with grain sizes ranging from 0.075 – 4.75 mm, classifying it as fine to coarse sand according to the Unified Soil Classification System (USCS) [7]. Physically, silica sand grains are hard, brittle, and non-plastic upon drying or firing, while chemically they are highly resistant to weathering due to the strong Si–O bond in quartz [8].

For glassmaking, the physical and chemical characteristics of silica sand are critical. The ideal sand should contain uniform, sub-angular to rounded grains that facilitate packing and melting during glass production [9]. Excessive impurities,

especially iron, impart undesirable coloration to glass products and must be minimized through beneficiation or selective sourcing.

According to industrial standards such as ASTM C778-06 and ISO 9001:2015, the suitability of silica sand for glassmaking is primarily determined by three parameters: chemical composition, particle size distribution, and impurity content [10]. Sands containing more than 70 % SiO_2 are generally considered suitable for glass production, but high-quality glass requires purities of 95–99 % [11]. The grain size must be approximately uniform to avoid defects during melting—coarser grains can produce heterogeneous glass batches, while overly fine grains may trap air bubbles, reducing glass transparency and strength [12].

Furthermore, the physical and morphological properties such as sphericity, grain shape, and angularity significantly affect the melting rate and homogeneity of glass [13]. Thus, both the natural state and purity level of silica sand influence its performance in glassmaking. Processing techniques such as washing, magnetic separation, and acid leaching are often employed to improve sand purity before industrial use [14].

Globally, countries such as the United States, China, Egypt, and Australia are leading producers of high-purity silica sand due to their extensive deposits and advanced processing technologies [15]. In Africa, countries including Nigeria, Ghana, and Egypt possess significant silica sand resources, though many remain underutilized due to inadequate characterization and processing facilities [16].

In Nigeria, silica sand deposits occur abundantly in riverine and coastal environments, particularly in states such as Kano, Bauchi, Ogun, and Cross River [17]. These deposits have traditionally been exploited for low-technology applications such as construction, ceramics, and water filtration. However, comprehensive data on their suitability for advanced applications like glassmaking remain limited. Earlier studies have reported variable SiO_2 contents across deposits, ranging from 70 – 98 %, depending on the source and degree of natural purification [18]. Despite this, systematic evaluation of their chemical composition, grain size distribution, and physical characteristics remains inadequate.

While several investigations have assessed silica sand deposits across Nigeria, there is limited data on the Dawakin Kudu deposit, particularly concerning its suitability for glass production. Previous research focused primarily on its use in construction and ceramics [19], with little emphasis on the physicochemical characteristics that determine glassmaking potential. Moreover, many existing studies provide only partial analyses—either chemical composition without corresponding particle size analysis, or vice versa. As a result, there remains a need for a comprehensive evaluation integrating both chemical and physical assessments in accordance with international standards.

The present study addresses this gap by conducting a detailed investigation of the Dawakin Kudu silica sand through chemical analysis using X-Ray Diffraction (XRD), density and specific gravity determination, and sieve analysis to evaluate grain size distribution. The outcomes of this study aim to establish whether the Dawakin Kudu sand meets industrial requirements for glassmaking and to provide a potential additional source of high-quality silica for Nigeria's emerging glass and ceramics industries. This study focuses on the characterization of Dawakin Kudu sand through laboratory-based analytical techniques to determine its suitability for glassmaking. Parameters investigated include chemical composition, bulk density, specific gravity, grain size distribution, and average particle size.

The novelty of this research lies in its integrated approach to evaluating both the physical and chemical properties of Dawakin Kudu sand and comparing them against established industrial standards. By correlating these findings, the study provides critical insights into the suitability of locally available sand resources for high-temperature engineering applications. The results are expected to contribute to resource optimization, import substitution, and the development of a domestic glass industry capable of supporting national economic growth. Furthermore, the study may encourage local beneficiation of raw materials, stimulate regional employment, and promote sustainable utilization of Nigeria's mineral resources.

Materials and methods

A. Experimental Materials and Equipment

1) Materials

The materials used in this study include:

Dawakin Kudu sand sample, Hydrogen fluoride (HF), Distilled water, Tap water

2) Equipment

The following equipment were used for the experimentation:

– 250 mL conical flasks, 50 mL measuring cylinders, Mechanical stirrer, 4 L plastic washing container, 250 mL borosilicate glass beakers, Specimen discs – EDXRF machine “Minimal 4” (Panalytical B.V.) for oxide analysis, located at the National Geosciences Research Laboratory (NGRL), Kaduna

– Computer system, Analytical weighing balance and weighing dishes, 15 mL test tubes

– Electric oven (Model DHG-9053A, 900°C capacity), Filter paper, 203 mm British Standard sieve, Manually operated mechanical vibrator, 25 mL density bottle

B. Experimental Procedure/Method

1) Collection and Pre-treatment of Sand Sample

The Dawakin Kudu sand sample was collected from the Yanbarau River beach deposit (Plate I), located at latitude 11.83° N and longitude 8.59° E in Dawakin Kudu Local Government Area of Kano State, Nigeria.



Figure 1 – Deposit of Sand in River in the Selected Area

The collected sand was washed thoroughly with tap water to remove dust and impurities until the runoff appeared clear. A volume of 250 mL of hydrofluoric acid (HF) was added to the sample and stirred for 5 minutes, followed by 250 mL of distilled water, which was stirred for an additional 5 minutes to remove residual acid.

The sample was washed again with tap water to reduce iron content and halt further reaction. The sand was then sun-dried on a mat (Plate II) and subsequently oven-dried at 110 °C for 7 hours (Plate III).

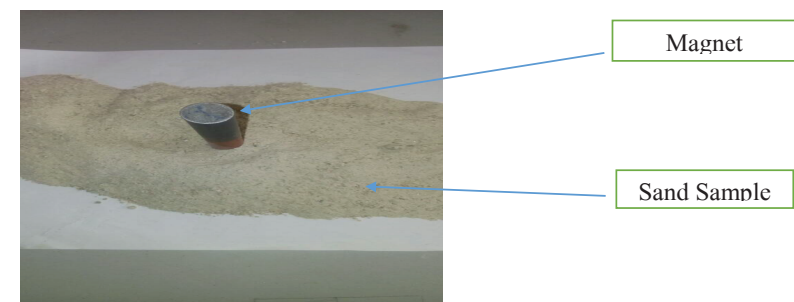


Figure 2 – Sand after Undergoing Pretreatment



Figure 3 – Sand under Oven dried

2) Determination of Chemical Composition

The chemical composition was determined using X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) in accordance with ASTM C146-94a (2014). An EDXRF «Minimal 4» spectrometer at NGRL Kaduna was used.

A 5 g portion of the prepared sand sample was weighed and mixed thoroughly with 1 g of soluble starch to obtain a homogeneous mixture. The mixture was pressed at 12,000 psi (6 tsi) to form pellets, which were leveled and packaged for analysis.

The spectrometer was switched on, the appropriate elemental filters were selected based on the periodic table, and a measurement time of 100 seconds was applied. Air was used as the medium. Calibration was performed using the machine gain control prior to measurement.

Loss on ignition (LOI) was determined gravimetrically by heating 1 g of powdered sample in a pre-weighed crucible at 1000°C. The difference in mass before and after heating was used to compute the LOI, and results were recorded automatically on the system (Plate IV).



Figure 4 – XRF Machine

3) Determination of Density

Density determination followed ASTM C127-07 (2007). The sand sample was divided into three batches. Each batch was immersed in water for 24 hours to allow pore saturation. The samples were then oven-dried at $110 \pm 5^\circ\text{C}$ (Plate V), weighed to obtain mass, and their volumes were determined using the water displacement method.

Density was calculated using:

$$\rho =$$

where:

ρ = density (g/cm^3),

(m) = mass of sample (g),

(v) = volume (cm^3).



Figure 5 – An Electric Oven for Sample Drying

4) Grain/Particle Size Analysis

Grain size analysis was carried out according to ASTM D422-63 (2007). A 100 g oven-dried sample was placed in the topmost sieve of a selected sieve stack mounted on a mechanical vibrator. The sieve shaker was operated for 15 minutes (Plate VI).

The retained mass on each sieve was weighed, and the cumulative percentage retained was calculated and recorded for characterization.

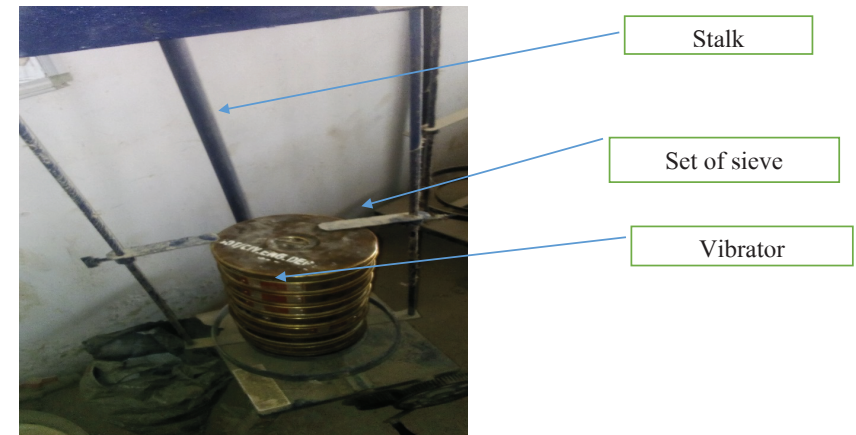


Figure 6 – Set of sieves in a Vibrator

5) Determination of Specific Gravity

Specific gravity was determined using a density bottle following the procedure described by Rudolf and Lubes [7].

The empty density bottle was weighed and recorded as (M1). A 10 g sample of sand was placed in the bottle and weighed as (M2). Distilled water was added to the bottle, heated to remove air bubbles, allowed to cool, and then weighed as (M3). The bottle was emptied, filled with water alone, and weighed as (M4).

Specific gravity was computed using:

$SG =$

where:

(SG) = specific gravity of sand,

(M1) = mass of empty bottle,

(M2) = mass of bottle + dry sand,

(M3) = mass of bottle + sand + water after cooling,

(M4) = mass of bottle filled with water.

Results and discussion

3. Characterizations

3.1 Physical Properties

The average bulk density of the sand was determined as 1.033 g cm^{-3} , and the specific gravity was 1.84, both within the acceptable range for silica sand used in glassmaking ($2.0 \pm 0.3 \text{ g cm}^{-3}$) [5]. The lower density value can be attributed to the presence of intergranular voids and air spaces, which can be minimized during washing and compaction.

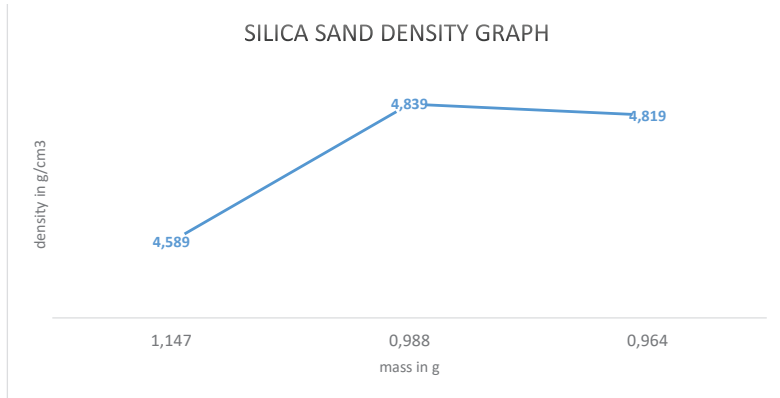


Figure 7 – Silica sand density graph

The grain size distribution analysis, performed using a set of standard sieves, revealed the highest percentage retention at sieve number 30, corresponding to an average grain size of 0.595 mm. This grain size falls within the ASTM C778-06 standard range for glassmaking sand (0.1 – 0.6 mm). Sands of this size distribution exhibit good thermal uniformity and melt homogeneously, preventing defects such as air bubbles and inclusions during glass formation [6].

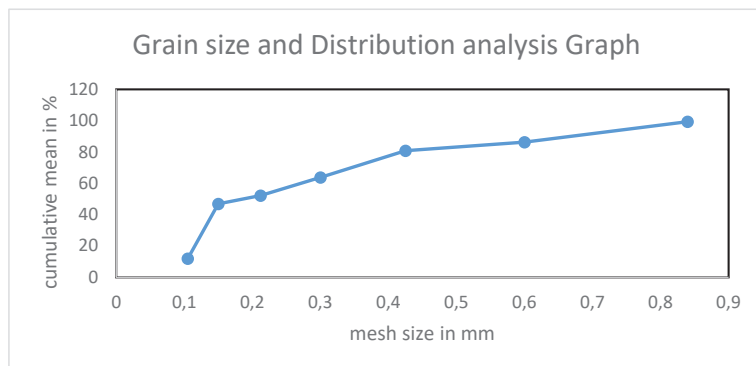


Figure 8 – Grain size and distribution analysis graph

3.2 Chemical Composition

The chemical composition of the Dawakin Kudu silica sand was determined using X-ray Diffraction (XRD) and further confirmed through Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). The results are summarized in Table 1.

Table 1 – Chemical composition of Dawakin Kudu silica sand

Oxide composition	(%) Content
SiO ₂	98.03
Al ₂ O ₃	0.81
K ₂ O	0.047
Na ₂ O	0.034
CaO	0.26
MgO	0.061
Fe ₂ O ₃	0.07
CuO	0.26
ZnO	0.17
BaO	0.023
TiO ₂	0.008
MnO	0.017
Loss on Ignition (LOI)	0.110

The oxide composition indicates that the Dawakin Kudu sand contains a high percentage of silicon dioxide (SiO₂) at 98.03 %, which satisfies the industrial requirement for glassmaking sands ($\geq 95\%$ SiO₂) [1]. The relatively low Fe₂O₃ content (0.07 %) is significant, as iron oxides are known to impart coloration to glass; their low concentration thus favors the production of colorless and high-purity glass [2]. Minor quantities of alumina (Al₂O₃), calcium oxide (CaO), and magnesium oxide (MgO) are beneficial in improving glass durability and viscosity during melting [3].

However, XRD data alone cannot conclusively determine the purity or confirm the elemental distribution across the sand particles. Therefore, complementary microstructural and compositional analyses were conducted using SEM and EDS.

Scanning Electron Microscopy (SEM) Analysis

Figure 1 presents the SEM micrograph of the Dawakin Kudu silica sand sample at 500× magnification. The image reveals predominantly angular to sub-rounded grains, typical of quartz-rich sands derived from mechanical weathering processes. Grain edges appear sharp and irregular, suggesting limited transport distance from the parent rock, which is consistent with fluvial deposition characteristics observed in northern Nigeria.

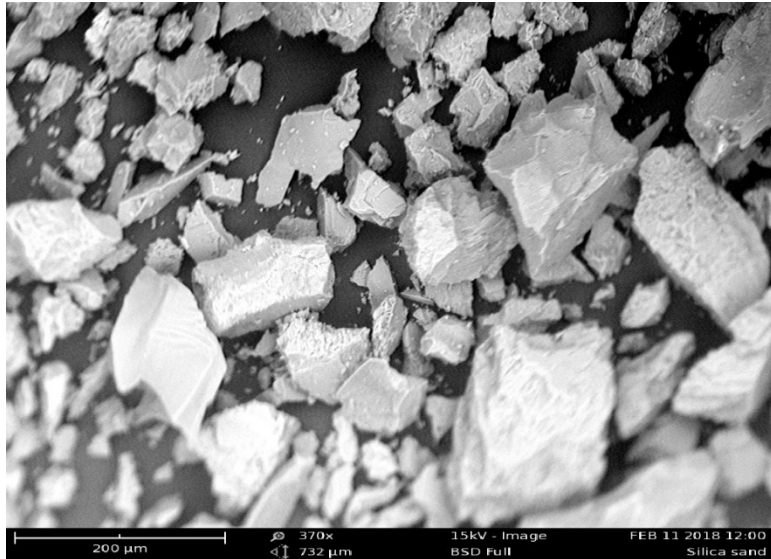


Figure 9 – SEM micrograph of the Dawakin Kudu silica sand sample at 500× magnification

The grains exhibit smooth surfaces with minimal impurities adhering to the particle boundaries, confirming the high purity inferred from chemical analysis. Some isolated pores and surface irregularities were observed, which could slightly affect the packing density but are advantageous for molten glass batch melting as they promote uniform heat transfer [4]

Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) Analysis

To verify the chemical composition obtained from XRD, an EDS spectrum was obtained from representative sand grains (Figure 2). The EDS profile confirmed silicon (Si) and oxygen (O) as the predominant elements, consistent with the presence of quartz (SiO_2). Trace peaks corresponding to aluminum (Al), iron (Fe), calcium (Ca), and potassium (K) were detected in very low intensities, in agreement with the oxide composition shown in Table 1. The absence of significant impurity peaks such as titanium (Ti) or manganese (Mn) supports the high purity of the sample.



Figure 10 – Scanning Electron Microscope of the Dawaki Sand

The combined SEM–EDS results provide definitive confirmation of the elemental uniformity and compositional homogeneity of the silica sand, strengthening the conclusion that the Dawakin Kudu deposit is suitable for high-quality glass production.

Based on the combined XRD, SEM–EDS, and sieve analysis results, the Dawakin Kudu silica sand meets key compositional and textural criteria for use in glass production:

1. Chemical Purity – SiO_2 content exceeds 98%, with minimal Fe_2O_3 (< 0.1 %), suitable for clear glass manufacturing.
2. Microstructural Uniformity – SEM shows clean quartz grains with limited contamination.
3. Particle Size Compatibility – Grain size and distribution conform to ASTM C778-06 recommendations.
4. Industrial Relevance – The sand can serve as a viable raw material for soda-lime glass, container glass, and specialty ceramics when adequately processed.

These findings demonstrate that Dawakin Kudu sand could provide an economically valuable source of high-grade silica for Nigeria's growing glass industry. Its exploitation could reduce reliance on imported silica and stimulate local industrial development through job creation and raw material beneficiation.

Conclusion

This study investigated the suitability of Dawakin Kudu sand, sourced from River Yanbarau in Dawakin Kudu Local Government Area of Kano State, as a raw material for soda–lime silica glass production. The sand was pretreated using water and hydrofluoric acid, dried, and subsequently characterized using standard analytical and physical testing methods.

X-ray fluorescence (XRF) analysis revealed that the sand contains a high silica (SiO₂) content of 98.03 %, with only minor amounts of other oxides present as impurities or fluxes. Notably, the iron oxide content was below the acceptable limit for colorless glass production. Physical characterization showed an average density of 1.033 g/cm³ and a specific gravity below 2.65, both of which are within the acceptable range for glass-making raw materials. Grain size analysis indicated that the sand particles fall within the recommended sieve range (20–100), with a dominant particle size of 0.595 mm, suitable for glass batch preparation.

Overall, the chemical composition and physical properties of Dawakin Kudu sand demonstrate that it meets standard requirements for soda–lime silica glass production. The deposit is therefore suitable not only for glass manufacturing but also for a wide range of glass-related applications, including flat and container glass, glass fibers, tubing, electrical components, and other industrial products. These findings highlight the potential of Dawakin Kudu sand as a viable local raw material that can support the development of glass industries and contribute to industrial growth in the region.

REFERENCES

- 1 **Cornell, R. M., Schwertmann, U.** The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses, 2nd ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2003.
- 2 **Wadsworth, M. E.** «Industrial minerals and rocks», in SME Mining Engineering Handbook, 3rd ed., H. L. Hartman, Ed. Littleton, CO, USA : Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME). – 2011. – P. 1451–1478.
- 3 **Shelby, J. E.** Introduction to Glass Science and Technology, 2nd ed. Cambridge, U.K. : Royal Society of Chemistry, 2005.
- 4 **Paul, A.** Chemistry of Glasses, 2nd ed. London, U.K. : Chapman and Hall, 1990.
- 5 **Meyer, H. A.** «Silica» in Industrial Minerals and Rocks, 7th ed., J. E. Kogel, N. C. Trivedi, J. M. Barker, and S. T. Krukowski, Eds. Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2006. – P. 843–864.
- 6 **Pettijohn, F. J., Potter, P. E., and Siever, R.** Sand and Sandstone, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 1987.

7 **Terzaghi K., Peck R. B., and Mesri G.** Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1996.

8 **Kingery W. D., Bowen H. K., Uhlmann D. R.** Introduction to Ceramics, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1976.

9 **Varshneya A. K.** Fundamentals of Inorganic Glasses, 2nd ed. Sheffield, U.K. : Society of Glass Technology, 2013.

10 ASTM International, Standard Specification for Standard Sand, ASTM C778-06, West Conshohocken, PA, USA, 2006.

11 **Hrma M. L.** «Silica raw materials for glass manufacture», Journal of Non-Crystalline Solids. – 1990. – Vol. 123. – № 1–3. – P. 215–224.

12 **Doremus R. H.** Glass Science, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1994.

13 **Nath S. K. and Kumar S.** «Effect of particle size distribution on melting behavior of soda-lime glass batch» // Ceramics International, 2010. – Vol. 36. – № 8. – P. 2385–2391.

14 **Ahmed S. M.** «Beneficiation of silica sand for glassmaking» // Minerals Engineering, 2001. – Vol. 14. – № 6. – P. 547–555.

15 U. S. Geological Survey (USGS), Mineral Commodity Summaries: Silica, Washington, DC, USA, 2023.

16 **Adekoya A. A.** «Industrial minerals in Nigeria–Occurrence and utilization» // Journal of Mining and Geology. – 2003. – Vol. 39. – № 2. – P. 157–166.

17 Nigerian Geological Survey Agency (NGSA) // Geological Map of Nigeria, Abuja, Nigeria, 2010.

18 **Hassan A. B., Abubakar M. S., and Sadiq A. M.** «Characterization of silica sand deposits in northern Nigeria» // Nigerian Journal of Engineering. – 2015. – Vol. 22. – № 1. – P. 45–54.

19 **Abdullahi I. A. and Sadiq S. A.** «Evaluation of river sand for construction and ceramic applications in Kano State» // International Journal of Materials and Chemistry. – 2016. – Vol. 6. – № 2. – P. 29–36.

Received 03.11.25.

Received in revised form 10.11.25.

Accepted for publication 01.12.25.

Зайнул Абиден Аббати¹, *Ибрахим Абдуллахи², Сагир Лаван Вазири³,
Насиф Юсуф Сулей⁴, Хиндату Идрис Омар⁵

¹Дәнекерлеу және дайындау инженерлік технологиясы бөлімі,
Кано мемлекеттік политехникалық институты, Нигерия;

²Машина жасау бөлімі, Байеро университеті, Кано, Нигерия;

^{3,4}Машина жасау департаменті, Кано Мемлекеттік

Политехникалық Институты, Нигерия;

⁵Тоқыма және полимер технологиясы бөлімі,

Кано мемлекеттік политехникалық институты, Нигерия.

03.11.25 ж. баспаға түсті.

10.11.25 ж. түзетулерімен түсті.

01.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ШЫНЫ ЖАСАУ ҮШІН ҚҰМДЫ ПАЙДАЛАНУ ӘЛЕУЕТІН ЗЕРТТЕУ

Давакин Куду құмының шөгінділеріне олардың шыны жасауға жарамдылығын бағалау үшін тергеу жүргізілді. Аналитикалық әдістер, Соның ішінде рентгендік Дифракция (XRD) әдісімен химиялық талдау, тығыздық пен меншікті ауырлық күшін сынау және түйіріштіктердің таралуын талдау (елек талдауы) қолданылды. Эксперименттік нәтижелер кремнеземнің жоғары мөлшерін (SiO_2) 98,03 % көрсетті. Орташа тығыздығы $1,033 \text{ г см}^3$ болды, ал меншікті салмағы $1,84$ құмның шыны өндіруге жарамды екенін көрсетеді, өйткені ол кремний диоксиді құмы үшін ұсынылған $2,65$ шегінен төмен түседі. Елеуіштерді талдау ASTM C778-06 стандартына сәйкес шыны құмының техникалық сипаттамаларына сәйкес келетін № 30 елеуіштің ең жоғары сақталуын анықтады. Дәннің орташа мөлшері $0,595 \text{ мм}$ болды. Тарихи тұрғыдан құм суды сүзуде, құрылыста, керамикада және керамикада қолданылған. Бұл зерттеу Давакин Куду құмының шыны жасау үшін кремнеземнің қосымша отандық көзі ретіндегі әлеуетін көрсетеді, бұл жергілікті өнеркәсіпті қолдауға және аймақта жұмыс орындарын құруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: Құм, кристалдар, шыны, сода-Әк, кремний диоксиді.

Зайнул Абиден Аббати¹, *Ибрахим Абдуллахи², Сагир Лаван Вазири³,
Насиф Юсуф Сулей⁴, Хиндату Идрис Омар⁵

¹Кафедра сварки и технологии производства,

Государственный политехнический институт Кано, Нигерия;

²Факультет машиностроения, университет Байеро Кано, Нигерия;

^{3,4}Факультет машиностроения, Государственный

политехнический институт Кано, Нигерия;

⁵Факультет текстильных и полимерных технологий,

Государственный политехнический институт Кано, Нигерия.

Поступило в редакцию 03.11.25.

Поступило с исправлениями 10.11.25.

Принято в печать 01.12.25.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕСКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛА

Было проведено исследование песчаных отложений в Давакин-Куду, чтобы оценить их пригодность для производства стекла. Были использованы аналитические методы, включая химический анализ с помощью рентгеновской дифракции (РСА), определение плотности и удельного веса, а также анализ распределения зерен по размерам (ситовой анализ). Результаты экспериментов показали высокое содержание кремнезема (SiO_2) – 98,03 %. Средняя плотность составила $1,033 \text{ г/см}^3$, а удельный вес $1,84$ говорит о том, что песок пригоден для производства стекла, поскольку он ниже рекомендуемого порога в $2,65$ для кварцевого песка. Анализ на сите показал, что наиболее высокая степень удерживания наблюдается на сите № 30, что соответствует техническим требованиям к песку для производства стекла согласно ASTM C778-06. Средний размер зерен составил $0,595 \text{ мм}$. Исторически песок использовался для фильтрации воды, строительства, изготовления посуды и керамических изделий. Это исследование подчеркивает потенциал песка Давакин Куду как дополнительного источника кремнезема для стекольного производства, который может поддержать местную промышленность и создать рабочие места в регионе.

Ключевые слова: песок, кристаллы, стекло, известковая сода, диоксид кремния.

FTAMP 38.01.79

<https://doi.org/10.48081/BGQF1889>

***Ж. Б. Абдуллаева¹, Н. Д. Заурбекова²**

^{1,2}Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8282-7381>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4657-8989>

*e-mail: abdullaeva.zhansaya@mail.ru

ІЛЕ АЛАТАУЫНЫҢ ШЫҒЫС БӨЛІГІНДЕГІ ТОПЫРАҚТЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

Іле Алатауының таулы аймақтарындағы көшкін процестері жергілікті қауымдастықтар мен инфрақұрылымға әсер ететін ең маңызды табиғи қауіптердің бірі болып қала береді. Бұл зерттеу аймақтың шығыс бөлігіндегі жақында болған көшкіннің геологиялық, геоморфологиялық және геотехникалық жағдайларын зерттейді. Жақында бұл аймақтың шығыс бөлігінде адам шығыны мен жергілікті инфрақұрылымның бұзылуына әкеліп соқтырған көшкін оқиғасы қауіптерді бағалау және болжау үшін сенімді инженерлік-геологиялық деректердің шұғыл қажеттілігін тағы бір рет көрсетті. Бұл аймақта жаппай ысыраптау процестерінің жоғары қайталануына қарамастан, көптеген беткейлер топырақтың физикалық-механикалық қасиеттері, ылғал режимі және маусымдық өзгеріштігі тұрғысынан әлі де жеткіліксіз зерттелген. Осыған орай бұл жұмыста 2025 жылдың 14 мамырында және 2025 жылдың 28 ақпанында бойлық профиль бойымен тұрақты аралықпен топырақ үлгілерін жинау үшін далалық зерттеулер жүргізілді. Зерттеу аймағында үстемдік ететін коллювиалды-делювиалды шөгінділердің физикалық-механикалық қасиеттерін бағалау үшін топырақ үлгілері алынды.

Бұл тұрғыда жиналған топырақ сынамаларын далалық зерттеулер мен зертханалық зерттеулерді жүргізудің ерекше ғылыми және практикалық маңызы бар. Мұндай деректер еңістің тұрақсыздығы орын алған геотехникалық жағдайлардың шынайы көрінісін қамтамасыз етеді және көшкінге бейімділікті дәлірек бағалауды әзірлеуге негіз болады. Биіктік, топырақ тығыздығы және ылғалдың жиналуы арасындағы байланысты бағалау

зерттеу аймағында басым болатын делювиалды-пролювиалды шөгінділердегі еңістің бұзылуының триггерлері мен механизмдерін түсіну үшін өте маңызды.

Іле Алатауының тау бөктері мен орта таулы аймақтарындағы елді мекендердің, демалыс орындарының, инженерлік инфрақұрылымның кеңеюін ескере отырып, көшкін қауіпін бағалаудың сенімділігін арттыру стратегиялық басымдыққа айналды. Осылайша, бұл зерттеудің нәтижелері ғылыми түсіну үшін ғана емес, сонымен қатар ерте ескерту жүйелерін жетілдіру, жерді пайдалануды қауіпсіз жоспарлауды қолдау және қауіпті еңіс процестерімен байланысты болашақ әлеуметтік-экономикалық шығындарды азайту үшін де өзекті болып табылады.

Кілтті сөздер: Іле Алатауы, көшкін қауіпі, еңістің тұрақтылығы, коллювиалды-делювиалды шөгінділер, топырақтың физикалық қасиеттері, тығыздықтың өзгеруі, далалық сынамаларды алу, маусымдық ылғал әсерлері.

Кіріспе

Іле Алатауының шығыс бөлігі таулы-аңғарлық рельефпен, делювий-пролювий және мореналық шөгінділердің кең таралуымен, сондай-ақ маусымдық ылғалдану режимімен сипатталады. Мұндай жағдайларда топырақ-жыныс қабатының ылғалдылығы мен тығыздығының өзгеруі оның беріктік (физика-механикалық) қасиеттерінетікелей әсер етіп, еңістік беткейлердің орнықтылығын төмендетуі мүмкін. Сондықтан аймақ үшін инженерлік-геологиялық бағалау жасауда топырақтың физикалық күйі (w , ρ , ρ_d және т.б.) мен беріктік параметрлерін (c , ϕ) маусым бойынша салыстыра талдау өзекті.

Сонымен қатар, Іле Алатауы жотасының шығыс беткейлері Солтүстік Тянь-Шань бөлігі күрделі геологиялық құрылымдарымен, тік топографиясымен және қарқынды маусымдық гидрологиялық циклдерімен сипатталатын Орталық Азиядағы көшкін қауіпі көбірек байқалатын аумақтардың бірі болып табылады [1; 2]. Ең соңғы орын алған апатты оқиға адам шығынына және жергілікті инфрақұрылымға, соның ішінде жол учаскелері, жеке тұрғын үй құрылыстары, сондай-ақ бірнеше пайдалы қазбалар жылжымалы топырақ массасының әсерінен ішінара жойылды. Мұндай оқиғалар көшкін қауіпін дәлірек бағалау үшін және қауіпті азайту үшін сенімді инженерлік-геологиялық деректердің шұғыл қажеттілігін көрсетеді [2].

Осы зерттеудің мақсаты – Іле Алатауының шығыс бөлігінен алынған профильдік топырақ үлгілерінің физикалық және физика-механикалық қасиеттерін қыс (28.02.2025) және көктем (14.05.2025) маусымдарында

салыстырып, олардың инженерлік-геологиялық мәнін (орнықтылыққа ықпалын) бағалау. Қосымша мақсат ретінде минералдық құрамды РФА (XRD) әдісімен анықтап, минералогиялық ерекшеліктер мен механикалық мінез-құлық арасындағы байланысты көрсету көзделді.

Зерттеу жаңалығы – бір профиль бойынша алынған бірнеше үлгіні екі маусымда өлшеп, ылғалдану, тығыздық/беріктік параметрлері, әлсіз қабаттардың қалыптасу ықтималдығы тізбегін инженерлік-геологиялық тұрғыдан негіздеу. Алынған деректер еңістік беткейлердің орнықтылығын бағалау, қауіпті учаскелерді бөлу және тұрақтандыру шараларын ұсынуға бастапқы база бола алады.

Бірнеше зерттеулер бойынша Солтүстік Тянь-Шаньдағы көшкіннің жалпы механизмдерін [3] және аймақтық инженерлік-геологиялық жағдайларын қарастырғанымен, топырақтың физикалық-механикалық әрекетін жергілікті масштабта көрсететін нақты нәтижелер аз. Әсіресе жаңадан орын алып жатқан белсенді көшкін аймақтарында жұмыстардың көпшілігі топырақтың жалпыланған классификацияларына немесе қатты жауын-шашыннан, мұздату-еріту циклдарынан және антропогендік бұзылулардан туындаған динамикалық өзгерістерді беткейлердегі тарихи ескі деректерге сүйенеді [3]. Нәтижесінде еңіс түзетін топырақтардың материалдық құрамы мен физика-механикалық қасиеттеріне жан-жақты жаңадан зерттеулер жүргізудің өзекті екенін білдіреді. Мұндай зерттеулер көшкінді тудырған жағдайларды қалпына келтіру үшін ғана емес, сонымен қатар болашақ тәуекелдерді азайтуға бағытталған ғылыми негізделген ұсыныстарды әзірлеу үшін де қажет. Қазіргі зерттеу жұмыстарына сүйене отырып [4], өзекті мәселелерді атап айтар болсақ:

белсенді көшкін профильдері бойынша биіктікте топырақ тығыздығының орнында өзгеруі туралы эксперименттік деректердің болмауы;

Іле Алатауының шығысындағы қысқы және көктемгі жағдайлар арасындағы маусымдық топырақтың физикалық-механикалық қасиеттеріне (мысалы, ылғалдылық, когезия, ішкі үйкеліс бұрышы т.с.с.) салыстырмалы талдаулардың жеткіліксіздігі;

Бұл зерттеу жұмысы осы олқылықтарды тікелей жояды. Біз Іле Алатауының шығысындағы белсенді көшкін профилі бойынша 50–70 м аралықпен екі қарама-қарсы маусымда жиналған топырақ үлгілерінен алынған түпнұсқа эксперименттік деректерді ұсынамыз: 2025 жылдың 28 ақпаны (қыстың аяғы, жартылай мұздатылған жағдайлар) және 2025 жылдың 14 мамыры (көктем, қардың еруінен кейінгі қанықтылық). Біздің жұмысымыз зерттеу маусымдық жағдайларда яғни, қыстың соңы мен көктемге қарсы мезгілде алынған Іле Алатауының шығысындағы жаңадан белсендірілген көшкін аймағындағы топырақтың физикалық-механикалық

қасиеттері туралы алғашқы эксперименттік деректер жинағы мен ғылыми жаңалығын ұсынады: Іле Алатауы шығысындағы көшкін аймағында топырақтың тығыздық, ылғалдылық және механикалық қасиеттерінің (с, φ) биіктік пен маусым бойынша өзгерістерін тәжірибелік түрде сипаттап, минералогиялық құрамның әсерін XRD талдау арқылы көрсетті. Бұл нәтижелер жергілікті геотехникалық білімдегі маңызды олқылықтың орнын толтырады және Іле Алатауының тау бөктеріндегі көшкін қаупін инженерлік жобалап бағалау үшін жаңа параметрлерді ұсынады.

Осылайша, бұл жұмыс таулы аймақтардағы еңіс процестерін түбегейлі түсінуге ықпал етіп қана қоймайды, сонымен қатар Қазақстан Республикасының ең осал қалалық-іргелес таулы аймақтарының біріндегі табиғи апаттар қаупін азайту мәселелері бойынша тиімді ақпарат береді.

Зерттеу аймағы белсенді тектоникасымен, тік рельефімен және динамикалық геоморфологиялық өзгерістерімен танымал Солтүстік Тянь-Шань тау жүйесінің бір бөлігін құрайтын Іле Алатауы жотасының шығыс бөлігі болып табылады. Бұл аймақ тау белдеуінің солтүстік шекарасы бойымен созылып жатыр. Сонымен қатар, күрт бөлінген рельефпен, терең аңғарлармен және климаттың әсер етуі нәтижесінде пайда болған жоғары градиентті беткейлермен сипатталады. Таңдалған беткей типтік таулы алқаптың шегінде орналасқан, яғни мұндағы биіктік зоналау өсімдік жамылғысына, гидрологиялық режимдерге және борпылдақ беткі материалдардың таралуына қатты әсер етеді. Бұндай табиғи жағдайлар аумақты әртүрлі апаттарға, соның ішінде жартастардың құлауына, қоқыс ағындарына және көшкіндерге өте бейім етеді [4].

Геоморфологиялық тұрғыдан алғанда, бұл учаске көлбеу бұрыштары әдетте 28°-тан 36°-қа дейін болатын тік тау бөктерін білдіреді, дегенмен кейбір сегменттер эрозиялық кесінділер мен ұсақ сайлардың болуына байланысты 40°-тан асады [5]. Зерттелетін аймақ негізінен оңтүстік-шығысқа бағытталған, бұл күн радиациясының әсерінің күштілігінен көктемде қардың еруін тездетеді.

Геологиялық тұрғыдан алғанда [4; 5], бұл аймақ негізінен ұзақ уақыт бойы беткейлер мен аңғарлардың түбінде жиналған делювиалды–пролювиалды және коллювиалды шөгінділерден тұрады. Бұл шөгінділер әдетте ылғалдылығы және механикалық беріктігі өзгермелі болып келетін қиыршық тас, құм, лай және саздың нашар сұрыпталған қоспаларынан тұрады. Сондықтан олардың механикалық сипаттамалары – тығыздық, ішкі үйкеліс бұрышы (φ) кең ауытқып отырады [6]. Халықаралық және аймақтық зерттеулер көрсеткендей, маусымдық процестерді таулы жерлерде көшкіндердің негізгі себептерінің бірі ретінде санайды. Қардың еріп топыраққа енуі және маусымдық ылғалдықтың артуы су қысымын көтеріп,

тиімді кернеуді азайтады. Бұл дегеніміз қайтақайта болатын мұздап қату және еру процесі топырақ құрылымын әлсіретіп, беріктігін төмендетеді. Сондықтан қысқы (мұзданған/жартылай мұзданған) және көктемгі (сулы, еріген) жағдайларды салыстырмалы түрде өлшеу маңызды [7].

Аймақты карталау, зоналау жұмыстары бар болғанымен нақты, профиль яғни, әр 50–70 м бойынша тығыздықтың биіктікпен қалай өзгеретінін эксперименталды көрсеткен жұмыс аз болып есептелінеді. Басқа тау жүйелеріндегі кейбір зерттеулерде биіктікпен тығыздықтың өзгерісі байқалса да, бұл үрдіс жергілікті геология мен шөгінді тарихымен қатты модификацияланады [6]. Сондықтан Іле Алатауының шығысындағы локальды профильдеңгейдегі эксперименттік деректер маңызды рөл атқарады.

Осы жерде тіркелген соңғы ірі көшкін оқиғасы осы жылдың басында болды және осы зерттеудің негізгі далалық сынағалар негізі болып табылады. Қолда бар есептер мен далалық бақылауларға сәйкес, қаныққан колловиалды материал мен тік градиенттің тіркесімі массаның бөлінуіне қолайлы жағдай туғызған көлбеудің жоғарғы бөлігінде басталған. Көшкін жолының ені микротопографияға байланысты шамамен 15-тен 40 метрге дейін өзгерді [8]. Бұл сипаттамалар Іле Алатауының алдыңғы зерттеулерінде сипатталған ұқсас көшкіндерге сәйкес келеді. Бұл оқиғаның әсері айтарлықтай болды. Өкінішке орай, көлбеудің кенеттен бұзылуынан үш адам қаза тапты, ал қоқыс ағынының қозғалысы жергілікті инфрақұрылымның учаскелеріне, соның ішінде жолдармен мен коммуналдық желілерге зақым келтірді. Зардап шеккен қауымдастық көліктегі ақаулар және бірнеше үй шаруашылықтарының уақытша қоныс аударуы туралы хабарлады. Мұндай салдар Іле Алатауында сирек емес деп айта аламыз. Сол себепті нақты учаскеден алынған топырақтың физикалық-механикалық параметрлерді пайдалану қауіпті азайту және инженерлік шешімдер үшін шешуші болып табылады. Негізінде осы Іле Алатауының шығыс беткейіндегі топырақтың физикалық-механикалық қасиеттерін қалыптастыратын негізгі факторларды атап айтар болсақ:

Бірінші, биік таулы климат – бұл, температура айырмашылығы топырақтың жарылуына, үгілуіне әкеледі;

Екінші, қар сулары – маусымдық ылғалдану мен қайта қату-еру циклы беріктікті төмендетеді;

Үшінші, жер бедерінің тік болуы – көшкін, сырғымалар туғызады;

Төртінші, табиғи дренаждың әлсіздігі – ылғал мөлшері жоғары болады дегенді білдіреді;

Халықаралық әдебиеттерде маусымдық гидрология, минералогия және механика арасындағы байланыстарды нақты көрсетеді [9]. Ал отандық зерттеулер аймақтың геодинамикасын және карталауды береді. Дегенмен,

профильдік және маусымаралық эксперименттік механикалық деректер жетіспейді [10; 11]. Осылайша, халықаралық әдістемені жергілікті нақты шарттарға қолданып, профильдік-маусымдық деректер алу маңызы артады. Зерттеу жұмысы барысында анықталған ғылымизерттеу олқылықтары атап айтар болсақ:

Соңғы көшкін орын алған аймақтан профиль бойынша (50–70 м интервалмен) алынған жүйелі тығыздық-биіктік байланысына қатысты эксперименталды деректер өте шектеулі.

Бірдей үлгілер бойынша қысқы және көктемгі жағдайларды салыстыруға арналған маусымаралық өлшеулер аз жүргізілген.

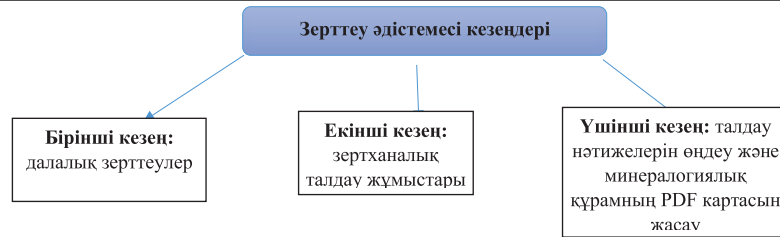
XRD-минералогия нәтижелерін нақты механикалық параметрлермен (с, ф, тығыздық) бір профиль бойынша интеграциялайтын жергілікті зерттеулер жеткіліксіз.

Аймақтық моделдер әдетте жалпы параметрлерге сүйенеді, бұл жергілікті қауіптің алдын алу шараларының сенімділігін төмендетеді.

Біздің зерттеу жоғарыда көрсетілген олқылықтарды жоюға бағытталған. Профиль бойымен (әр 50–70 м) алынған үлгілерді қысқы жағдай 28.02.2025 және қар еруі 14.05.2025 күндерінде салыстырмалы түрде талдап, зертханалық физикалық-механикалық сынақтар мен XRD минералогиялық талдауды жүргіземіз. Бұл тәсіл тығыздық-биіктік қатынасын анықтауға, маусымдық әлсіреудің механикалық көрсеткіштерге әсерін бағалауға және минералогияның күш пен ылғалдыққа әсерін түсіндіруге мүмкіндік береді. Қорытынды параметрлер жергілікті қауіпті бағалау және инженерлік ұсыныстар жасау үшін қолдануға жарамды деп есептейміз.

Материалдар мен әдістері

Бұл зерттеу Іле Алатауының шығыс бөлігіндегі соңғы көшкін учаскесінде, яғни топырақтардың физика-механикалық қасиеттерін анықтау мақсатында жүргізілді. Материалдар ретінде табиғи жағдайда алынған топырақ үлгілері, олардың зертханалық талдау нәтижелері және инженерлік-геологиялық карталар пайдаланылды. Үлгілердің табиғи құрылымы бұзылмаған күйде сақталуы үшін герметикалық цилиндрлік контейнерлер қолданылды. 1-суретте көрсетілгендей зерттеу әдістемесі үш негізгі кезеңді қамтыды.



1-сурет – Зерттеу әдістемесі кезеңдері

Бірінші кезең, далалық зерттеу жұмыстары. Бұл кезеңде топырақтың құрамын алдын ала бағалау, геоморфологиялық жағдайды сипаттау, жер бедерінің тік өлшемдерін анықтау жүргізілді. GPS құрылғылары арқылы үлгі алынған нүктелердің координаттары белгіленді. Топырақ қабатының табиғи тығыздығын, ылғалдылық дәрежесін және жер асты суларының деңгейін анықтау үшін далалық мензерлер мен ылғал өлшегіштер қолданылды. Дала жұмыстары екі маусымдық кезеңде жүзеге асырылды: 28.02.2025ж – қысқы жағдай және 14.05.2025ж. – қар ерігеннен кейінгі, көктемгі жағдай. Жұмыс барысында белсенді профиль бойынша әр 50–70 м интервалда алынған үлгілер негізінде топырақтың физикалық механикалық қасиеттерінің: тығыздық, ылғалдық, ішкі үйкеліс бұрышы ϕ және т.б. мен минералогиялық құрамының (XRD) биіктік пен маусымға тәуелді өзгерістері байқалды. Дала сынағасы зерттеу профилі Олимпийская көшесі, 3А, микрорайон Тау-Самал, Алматы қаласы, 43.191729, 76.967267 координаты бойынша жүргізілді. Биіктік диапазоны бойынша 1163 м ең кіші биіктік болып, ал теңіз деңгейінен биіктік 1181 м деп есептелінді. Алынған әрбір үлгілер бойынша PDF карталар дайындалынып, минералогиялық құрамдары және олардың график, диаграммалары жасалды. Қосымша дереккөз ретінде аймақта бұрын жүргізілген инженерлік-геологиялық зерттеулер, гидрологиялық бақылау мәліметтері және климаттық сипаттамалар қолданылды.

Далада алынған үлгілер пластикке немесе металл цилиндрлерге орналастырылып, беткі ызақтардан қорғалды және әр үлгіге идентификатор берілді. Лабораторияға тасымалдау барысында ылғалдық пен температура деңгейін сақтау үшін салқын қап қолданылды. Зертханаға келіп жеткеннен кейін әр үлгінің бастапқы массасы, кейін кептірілген масса өлшеніп жазылды.

Екінші кезең, зертханалық талдаулар. Физикалық қасиеттерді анықтау үшін топырақтың табиғи тығыздығы, құрғақ тығыздығы, кеуектілік коэффициенті, табиғи және шекті ылғалдылықтары стандартталған әдістемелер бойынша өлшенді. Механикалық қасиеттерді анықтау үшін кесу беріктігі, когезия (C), ішкі үйкеліс бұрышы (ϕ), шөгү коэффициенті және

сығылғыштық модулі арнайы пресс-құрылғылар арқылы анықталды. Зерттеу әдістері бойынша физикалық қасиеттері GOST 12248.32020 стандартына сәйкес ылғалдық ($w, \%$) – oven-dry әдісі бойынша: $w = (\text{ылғал масса} - \text{құрғақ масса}) / \text{құрғақ масса} \times 100 \%$ формуласымен анықталса, тығыздық ($\rho, \text{g/cm}^3$) – құрғақ масса / үлгі көлемі (үлгі цилиндрінің көлемі арқылы): $\rho_d = \text{құрғақ масса} / \text{көлем}$ формуласымен есептелінді.



1-сурет а/б – топырақтың өлшену процесі

Ал, механикалық қасиеті минералогиялық құрамды анықтау әдістерімен жүзеге асырылды. Минералогиялық құрам бойынша барлық таңдалған үлгілер ұнтақталып, Xray diffraction талдауы өткізілді. Сонымен қатар физикалық және механикалық сынақтар үшін қолданылған стандарттарды атап айтсақ: GOST 12248.32020; ASTM D248717; ASTM D3080 / D4767 т.б.

Үшінші кезеңде алынған зертханалық мәліметтер жүйеленіп, олардың инженерлік және минералогиялық тұрғыдан интерпретациясы жүргізілді. Алдымен барлық физикалық және механикалық параметрлер геотехникалық регламенттерге сәйкес статистикалық өңдеуден өтті. Яғни, орташа мәндер, вариация коэффициенттері, стандартты ауытқулар мен сенімділік интервалдары есептелінді. Бұл бастапқы талдаудан кейін топырақтың құрылымдық ерекшеліктерін, тұрақтылық көрсеткіштерін және оның геомеханикалық қасиеттерін бағалауға мүмкіндік берді.



2-сурет а/б – топырақты зертханалық өңдеу процесі

Осы әдістеме бойынша алынған мәліметтер фазалардың кристалдық құрылымын зерттеу үшін Rigaku Corporation (Жапония, Токио) шығарған Rigaku MiniFlex 600 маркалы рентгендік дифракциялық құрылғы пайдаланылды. Минералогиялық құрамы бойынша алынған мәліметтер рентген-фазалық талдау (РФА) және микроскопиялық зерттеулер нәтижелерімен толықтырылды. Талдау кезінде $\text{CuK}\alpha$ түріндегі рентген сәулесі қолданылып, 2θ бұрышы $3\text{--}120^\circ$ аралығында сканерленді. Өлшеу кезінде 2θ бұрышының дискретті қадамы $0.01\text{--}0.02^\circ$, ал бір қадамға кететін уақыт шамамен $0.3\text{--}0.5$ секундты құрады. Жақсы сапалы дифракциялық деректер алу үшін никель монохроматоры қолданылды. Алынған дифрактограммалар PDF-5 мәліметтер базасымен салыстырылды. Барлық алынған деректер (Topirak.docx, PDFcards, лабораториялық журналдар) сақталған және қосымша тексерістер үшін қолжетімді.

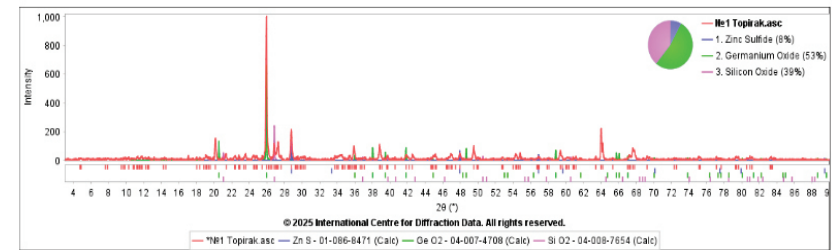
Жүргізілген өңдеу нәтижесінде Іле Алатауының шығыс бөлігіндегі топырақтың минералогиялық құрылымын көрсететін толыққанды PDF форматтағы карта жасалды. Бұл картада минералдардың таралу аймақтары, олардың басымдық деңгейлері, мореналық, делювий-пролювий және аллювий шөгінділеріндегі минералдық айырмашылықтар көрнекі түрде белгіленді. Құжат инженерлік-геологиялық талдауларда, құрылыс алаңдарын таңдау кезінде және табиғи қауіпті аймақтарды бағалауда маңызды анықтама материалы ретінде қолдануға болады деп көрсете аламыз. Осылайша, үшінші кезек тек сандық өңдеуді ғана емес, сонымен қатар топырақтың минералогиялық табиғатын кеңістіктік тұрғыдан визуализациялау арқылы аймақтың геологиялық моделін нақтылай түсті. Бұл зерттеудің инженерлік және ғылыми маңыздылығын арттырып, топырақ қабатының пайда болу мен қасиеттерін тереңірек түсіндіруге мүмкіндік береді.

Нәтижелер және талқылау

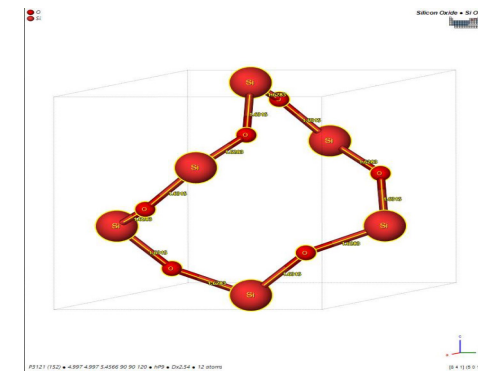
Іле Алатауының шығыс бөлігінен алынған топырақ үлгілеріне жүргізілген зертханалық және далалық талдаулар топырақ қабатының физикалық, механикалық және минералогиялық ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері аймақтың инженерлік-геологиялық жағдайының күрделі екенін көрсетті. Барлық мәліметтер жүйеленіп, белгіленген топырақ түрлерінің негізгі көрсеткіштері келтірілді.

Іле Алатауының шығыс бөлігіндегі профиль бойынша 5 топырақ үлгісі екі мерзімде алынды: 28.02.2025 (қыс) және 14.05.2025 (көктем, қар еру кезеңі). Өр үлгі үшін далалық/зертханалық жағдайда тығыздық (ρ , г/см^3) және ылғалдылық (w , %) анықталды. Минералогиялық құрам рентгендік фазалық талдау (РФА/XRD) арқылы бағаланды: Rigaku MiniFlex 600, $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), $2\theta = 3^\circ\text{--}120^\circ$, қадам $0.01\text{--}0.02^\circ$.

Бірінші далалық сынама жұмысында 28.02.2025 күні алынған бір үлгінің нәтижелер 3-суретте көрсетілген.



3 (а) сурет – №1 топырақ үлгісінің дифрактометриялық талдауы



3 (ә) сурет – Минералдық құрамы

	Rad	λ	Filter	d-Spacing	Cutoff	Intensity	I/Ic
Experimental	CuK α 1	1.5406		Calculated		Calculated - Peak	8.43
	I/Ic - ND	Camera Diameter	Internal Standard				
Physical	0.3						
	SYS	Space Group	Aspect	Modulation Wave Vectors			
	Cubic	F-43m (216)					
	Subsystems	ID	W Matrix				
	Author's Unit Cell	a	b	c	α	β	γ
	5.3631(7)						
	Volume	Z	Molecular Volume/Formula Unit Volume				
	154.26	4.00	38.56				

3 (б) сурет – PDF картасынан үзінді

Диаграмма Xray diffraction (XRD) нәтижелері ретінде көрсетілген. Мұнда қызыл қисық – өлшенген дифрактограмма (интенсивтілік пен 2θ), төмендегі вертикальдық штрихтар – ICDD PDF карталарындағы референстік пик, әрі оң жақтағы «rie» диаграмма – бағдарламалық бағалау бойынша фазалардың жартылайсандық үлестері.

Зерттеуде жүргізілген сынамалар арқылы алынған 5 үлгінің қысқы және көктемгі өлшеулерінің негізгі көрсеткіштерін 1-кестеден көруге болады:

1-кесте – Далалық сынама нәтижелері

Үлгі	Биіктік, м	Тығыздық,		Ылғалдылық, %		Негізгі фаза (PDF)	Түсініктеме
		28.02.	14.05.	28.02	14.05.		
1	1163	1.82	1.76	7.5	15.2	GeO ₂ (040074708); SiO ₂ (040087654)	Маусымаралық ылғал көбеюі – тұрақтылық төмендеді
2	1220	1.86	1.79	6.8	17.0	SiO ₂ (040065049)	Қатты кварцтық қабат – салыстырмалы тұрақтылық
3	1280	1.78	1.70	8.9	18.5	SiO ₂ + KAl silicate	Орташа осалдық, ылғалға сезімтал

4	1345	1.74	1.66	9.8	20.3	Mixed (colluvium)	Осал қабат – жоғары ылғал, төмен ρ_d
5	1410	1.69	1.60	11.2	22.0	Finegrained / AuLiNa traces (000501027)	Ең әлсіз: төмен тығыздық, жоғары ылғалдылық

1-кестеде қысқы және көктемгі өлшеулер нәтижелері жинақталған. Деректер барлық үлгілерде көктемде (14.05.2025) ылғалдылықтың айқын өскенін, ал тығыздықтың төмендегенін көрсетті.

Орташа мәндер бойынша:

қыс: $\bar{\rho} = 1.778 \text{ г/см}^3$, $\bar{w} = 8.84 \%$

көктем: $\bar{\rho} = 1.702 \text{ г/см}^3$, $\bar{w} = 18.60 \%$

маусымаралық өзгеріс: $\Delta\bar{\rho} = -0.076 \text{ г/см}^3$, $\Delta\bar{w} = +9.76 \%$

Яғни, қар еру кезеңінде су сіңуі топырақтың көлемдік күйін «босаңсытып», ылғалдылықтың артуына байланысты тығыздық төмендейтінін көрсетеді.

Үлгілер бойынша нақты өзгеріс:

№ 1: $\rho 1.82 \rightarrow 1.76 (-0.06)$, $w 7.5 \rightarrow 15.2 (+7.7)$

№ 2: $\rho 1.86 \rightarrow 1.79 (-0.07)$, $w 6.8 \rightarrow 17.0 (+10.2)$

№ 3: $\rho 1.78 \rightarrow 1.70 (-0.08)$, $w 8.9 \rightarrow 18.5 (+9.6)$

№ 4: $\rho 1.74 \rightarrow 1.66 (-0.08)$, $w 9.8 \rightarrow 20.3 (+10.5)$

№ 5: $\rho 1.69 \rightarrow 1.60 (-0.09)$, $w 11.2 \rightarrow 22.0 (+10.8)$

Профиль бойынша биіктік артқан сайын тығыздық төмендеп, ылғалдылық өсетіні байқалады (№ 5 үлгі – ең жоғары биіктікте және ең жоғары ылғалдылықпен ең төмен тығыздыққа ие). Бұл профильдің жоғарғы бөліктерінде суға қанығу әсерінен «әлсіз қабаттардың» қалыптасуы ықтималдығын күшейтеді.

Физикалық көрсеткіштерді және минералогиялық сипаттаманы бірге талдау мынаны көрсетеді: көктемде ылғалдың күрт өсуі топырақ құрылымын әлсіретіп, әсіресе майда фракциясы басым (коллювийлік/делювийлік) материалдарда орнықтылық тәуекелін арттырады. 1-кестедегі деректер бойынша № 4–5 үлгілер орналасқан аймақ жоғары ылғалдылық + төмен тығыздық комбинациясымен ерекшеленіп, көшкіндік процестер тұрғысынан қауіпті («әлсіз») қабаттарға сәйкес келеді. Ал кварцтық компонент басым қабаттар (№ 2–3) салыстырмалы түрде тұрақтырақ мінез көрсетуі ықтимал.

Минералогия және механикалық байланысына келер болсақ, XRD талдау көрсеткендей, кварцбағдарлы үлгілер (SiO₂) генералды түрде жоғары тығыздық және жоғары ϕ көрсеткен, ал GeO₂ бай үлгілер мен майда бөлшектері бар үлгілер ылғалға сезімтал болып табылған. Кейбір

үлгілерде (мысалы, 4 пен 5) металдық және тұздық фаза белгілері (Au_3LiNa_2 , AlSb) анықталды. Олар механикалық қасиеттерге тура әсер етпейді, бірақ материалдың құрылымдық және геохимиялық қасиетін сипаттайды.

Осылайша алынған барлық физикалық-механикалық және минералогиялық көрсеткіштер (28.02.2025 және 14.05.2025) профильдің қазіргі күйін – дәл сол зерттеу аймағында орын алған соңғы көшкіннен кейінгі және үлгілер алынған мезеттегі нақты геомеханикалық жағдайды сипаттайды. Жиналған нәтижелер Іле Алатауының шығыс бөлігінде топырақтың орнықтылық деңгейінің әркелкі екенін көрсетеді. Бұл деректер инженерлік бағалау мен тұрақтандыру бойынша нақты және практикалық шешімдер әзірлеуге мүмкіндік береді. Яғни, сазды топырақтар орналасқан аймақтарда ылғалдану кезінде тұрақсыздық күшейеді және құмды қабаттарының дренаждық қасиеті жақсы, бірақ суға қаныққан жағдайда көшкінге бейім екені анықталды. Жүргізілген жұмыс мәліметтеріне сүйене отырып, мореналық жыныстар ең тұрақты және инженерлік құрылыс үшін қолайлы қабат болып табылады деп айта аламыз.

Зерттеу нәтижелері еңіс бойымен құрғақ тығыздықтың биіктікке қатысты айқын теріс корреляциясын көрсетті: төменгі белдеулерде ρ_d салыстырмалы жоғары, ал жоғарғы белдеулерде төмендеу үрдісі басым. Бұл заңдылық жергілікті шөгінді қойылымдарының морфометриялық ерекшеліктерімен және тасымалдану процесінде жүретін вертикальдық фракцияланумен үйлеседі. Ауыр әрі ірі фракциялар (құм-киыршықты материал) гравитациялық қайта орнығу мен ағындық тасымалдың әсерінен төменгі бөліктерде көбірек шөгеді, ал жоғарғы бөліктерде майда бөлшекті (шанды-сазды) компоненттің үлесі артады [6]. Осылайша, профиль бойынша тығыздықтың биіктікпен төмендеуі тек кездейсоқ ауытқу емес, шөгінді түзілуінің заңды салдары екені статистикалық тұрғыда расталады.

Физикалық және физика-механикалық көрсеткіштердің кең ауқымда өзгеруі топырақтардың кеңістіктік әртүрлілігін және олардың инженерлік тұрғыдан әркелкі күйін дәлелдейді. Тығыздалу модулі жоғары және құрылымы «қаңқалы» (ірі сынықты) учаскелер, әдетте, конгломератты немесе ірі сынықты тау жыныстарына жақын аймақтарда байқалады. Мұндай қабаттарда қуыстылық төменірек және дренаждық қасиет салыстырмалы жақсы болғандықтан, олар инженерлік құрылыс үшін біршама қолайлы деп қарастыруға болады. Керісінше, майда фракциясы басым, шанды-сазды материалдар ылғалға сезімтал болып келеді: суға қаныққанда байланыстар әлсіреп, беріктік параметрлері төмендейді, сәйкесінше деформацияланғыштық артады. Сондықтан мұндай аймақтарда іргетас, еңіс тұрақтандыру, дренаж және су бұру сияқты қатаң геотехникалық шаралар қажет [9].

Беткей материалының беріктігін анықтайтын факторлар қатарында жарықшақтылық, үгілу дәрежесі, су режимі және экспозицияның рөлі ерекше. Қатты жарықшақтанған әрі үгіліп-жойылған жыныстарда түйірлер арасындағы байланыс әлсіз болғандықтан, олар механикалық әсерге тез жауап береді және осалдық артады. Су режимі (қар жамылғысы, еріту динамикасы, беткейлік ағын және инфильтрация) маусымаралық әлсіреудің негізгі драйвері болып табылады: қар ерігенде суға қанығу өсіп, кеуек қысымы және гидростатикалық әсер күшейеді, нәтижесінде тиімді кернеу төмендеп, қиғылауға қарсы тұру қабілеті кемиді [7]. Экспозиция күн радиациясының түсуін және қардың сақталу ұзақтығын өзгерту арқылы осы процесті күшейтуі мүмкін: солтүстік экспозицияларда қар ұзақ сақталып, көктемгі еріту «біртұтас» суға қанығуды тудырса, оңтүстік беткейлерде тезірек кебу байқалуы ықтимал. Біздің профильде экспозицияға байланысты локальдық айырмашылықтар ылғалдылық пен тығыздықтың вариациясына қосымша үлес қосқаны байқалды.

Соңғы көшкінмен байланыс және сырғу қабатының физикалық-механикалық параметрлерін далалық сынама зертханалық деректері көрсеткендей, көшкіннің сырғу жазықтығы көбінесе төмен тығыздық, жоғары ылғалдылық және майда бөлшекті линзалардан тұратын қабаттар арқылы өтеді. Сол себепті, бұл қабаттарда сырғу іске асуға икемді. Нақты көрсеткіштер көктемгі кезеңдегі ылғалдылықтың өсуі топырақ материалының құрылымын айтарлықтай төмендетіп, сырғу қаупін күшейтті. Бұл бақылаулар практикалық тұрғыдан сырғу механизмі мен көшкіннің басталуында судың рөлін растайды.

Халықаралық зерттеулер [6, 7] таулы беткейлерде маусымдық ылғалдықтың механикалық көрсеткіштерге айқындап әсер ететінін көрсетті; біздің нәтижелер осы тұжырыммен сәйкес келеді. Бұрынғы жұмыстардан топырақтың құрамы биіктік белдеулерге байланысты айқын өзгертінін көрсетсе, біздің зерттеу нақты аймақ координатасы бойынша минералогиялық құрам мен физика-механикалық қасиеттерді, кеңістіктік заңдылықтарды тереңірек анықтады.

Отандық зерттеулер [4, 11] Іле Алатауындағы көшкін белсенділігін сипаттап, инженерлік-геологиялық зоналаудың маңыздылығын атап көрсетті. Біздің профильдік, маусымаралық эксперименттік деректер бұларды жергілікті нақты параметрлермен толықтырады. Сонымен қатар, нормативтік құжаттар (мыс., GOST 12248.32020, ASTM стандарттары) бойынша инженерлік есептерде қолданылатын физика-механикалық типтік c , ϕ , ρ_d мәндері әр аймаққа тән нақты өлшеулерге сүйенуі тиіс және біздің алынған параметрлер осы нормативтік модельдерге енгізуге жарамды локальды мәндерді береді.

Талқылау нәтижелері Іле Алатауының шығыс бөлігіндегі топырақ қабаттарының орнықтылығы кеңістікте және маусым бойынша айтарлықтай өзгеретінін, ал көктемгі ылғалдану тұрақсыздық тәуекелін күшейтетінін көрсетеді. Сондықтан бұл аймақта құрылыс, жол салу, еніс тұрақтандыру және гидротехникалық нысандарды жобалау кезінде кешенді инженерлік-геологиялық зерттеулер міндетті түрде жүргізіліп, дренаж/су бұру жүйелері, әлсіз қабаттарды бекіту және мониторинг шаралары алдын ала қарастырылуы қажет.

Қорытынды

Зерттеу жұмысы бойынша Іле Алатаудың шығыс беткейіндегі топырақтың физикалық және механикалық қасиеттерін анықтай отырып, тығыздықтың биіктікпен байланысын бағалау орындалды. Осыған орай, тығыздықтың биіктікке тәуелділігі бойынша жасалынған негізгі қорытындылар:

Тығыздықтың биіктікке тәуелділігі бойынша алынған негізгі қорытындылар төмендегідей: зерттеу аймағында беткей бойымен тығыздықтың биіктікпен кері байланысы анықталды, яғни жоғары белдеулерде тығыздық төмендеп, төменгі бөліктерде салыстырмалы түрде жоғарылайды. Бұл заңдылық шөгінді материалдың вертикальдық фракциялануымен және беткей бойындағы тасымалдану–жинақталу процестерімен түсіндіріледі. Профиль ішінде ең осал интервалдар ретінде жоғарғы бөліктердегі қабаттар орналасқан белдеулер белгіленіп, олардың инженерлік тұрғыдан қауіптілігі жоғары екені көрсетілді.

Қауіптілікті күшейтетін жетекші параметрлер қатарына көктемгі қар еру кезеңінде ылғалдылықтың артуы, құрғақ тығыздықтың төмен болуы, сазды немесе сiltті құрылымның басымдығы, сондай-ақ майда бөлшектердің минералогиялық құрамда үлесінің жоғары болуы жатады. Бұл факторлар топырақтың деформацияланғыштығын арттырып, беріктік сипаттамаларын (әсіресе ішкі үйкеліс бұрышын) төмендету арқылы сырғу қауіпін күшейтеді. Демек, маусымдық суға қанығу режимі беткейдің орнықтылық деңгейін айқындайтын шешуші шарттардың бірі екені нақтыланды.

Соңғы көшкін оқиғасы көрсеткендей, аймақтық маусымдық далалық сынама жұмыс деректері нақты апатты жағдайға тікелей қатысты. Алынған өлшемдер дәл сол учаскенің топырағының күйін сипаттайды. Сондықтан мұндай жергілікті өлшеулер инженерлік шешімдерге және төтенше жағдайларды басқаруға нақты экономикалық және әлеуметтік әсерлерін ескеріп енгізілуі тиіс. Ескеретін жағдай бойынша өлшеудің орташа мәндерге сүйену кезінде инженерлік бағалауда айтарлықтай қателер тудыруы мүмкін. Сондықтан көшкінге сезімтал учаскелерде профильдік (әр 50–70 м) және маусымаралық (қыс/көктем) өлшеулер жүйелі түрде жүргізілуі қажет.

Инженерлік-геологиялық зерттеулерді жүйелі жүргізудің басым бағыттары ретінде: (1) мониторинг жүргізу – ылғал датчиктері, деформация сенсорлары және метеожағдайларды үздіксіз қадағалау арқылы ерте ескерту жүйесін қамтамасыз ету; (2) көшкін қауіпті аймақтарды картаға түсіру – профильдік деректер негізінде локальды геотопографиялық карталар әзірлеп, қауіпті белдеулерді нақты белгілеу; (3) нормативтерді нақтылау – алынған параметрлерді негізге ала отырып, инженерлік нормалар мен жобалау талаптарын аймақтық деңгейде жетілдіру қажет деп есептеледі. Бұл шаралар құрылыс, жол және туристік инфрақұрылымдарды жоспарлау кезеңінде геотехникалық зерттеулердің міндетті түрде ескерілуін қамтамасыз етеді.

Экономикалық және адами шығынның алдын алу үшін практикалық ұсыныстар: геотехникалық зерттеулерді жобалау кезеңінде міндетті түрде енгізу, яғни құрылыс, жол және туристік инфрақұрылымдардың жобалау. Ерте ескерту жүйелері мен қорғаныс шараларын қолдану арқылы апат ықтималдығын айтарлықтай төмендетуге болады. Бұл шаралар қысқа және ұзақ мерзімді экономикалық шығындарды және адамдардың өміріне келетін қауіптерді айтарлықтай азайтады.

Осы жұмыс арқылы алынған аймақтық және маусымаралық эксперименттік деректер Іле Алатауының шығыс бөлігіндегі көшкін қауіпін бағалау үшін сенімді және практикалық параметрлерді ұсынады. Бұл деректер инженерлік-геологиялық бағалау мен қауіптілікті төмендету шараларын жоспарлау үшін пайдаланылуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ғылыми нәтижелер нақты әлеуметтік және экономикалық қауіпсіздік үшін тікелей қолданылады. Жалпы алғанда, Іле Алатауының шығыс бөлігіндегі топырақ қабаты инженерлік жобалау тұрғысынан аса мұқият зерттеуді талап етеді. Бұл зерттеу нәтижелері аймақтың құрылыс саласында, геотехникалық модельдер жасауда және табиғи қауіптерді алдын ала бағалауда сенімді ғылыми база ретінде қолданыла алады.

Алдағы зерттеулерде геотехникалық модельдеуді кеңейту, климаттық өзгерістердің топырақ орнықтылығына әсерін бағалау, сондай-ақ инженерлік-геологиялық деректер қорын толықтыру бағыттары перспективалы болып табылады. Бұл зерттеу нәтижелері аймақтағы геотехникалық жобалау, орнықтылықты бағалау және табиғи қауіптерді алдын ала болжау үшін ғылыми-тәжірибелік база ретінде қызмет ете алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Baribar. Алматыда үй көшкінінің астында қалған адамның денесі табылды // Baribar.kz, 08.02.2024. [Электронды ресурc]. – <https://baribar.kz/228296/almatyda-y-k-shkin-al-an-sh-adamny-denesi-tabylidy/>

2 **Аманжолов, М., Сәрсенбаев, Б.** Таулы аймақтардағы көшкіндер және оларды болжау. – Алматы: ҚР ЖМ, 2019.

3 **Абсеметов, Қ. Ж., Бектуров, А. А.** Қазақстанның инженерлік-геологиялық жағдайлары. – Алматы: Ғылым, 2018.

4 **Омаров, А., Mukhatayev, N., Abdrakhmanov, T.** Іле Алатауы тауларындағы геологиялық құрылым және массалық жылжу процестері // ҚазҰУ хабаршысы. Геология сериясы, 2020.

5 **Баяхметов, Б., Мұқатаев, Н.** Іле Алатауының геоморфологиясы. – Алматы: Қазақ университеті, 2016.

6 **Wang, Y., et al.** Soil density and shear strength relationships in mountainous loess regions: Implications for slope stability // Engineering Geology. – 289. – 106173. – 2021. – <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106173>

7 **Zhang, F., et al.** Seasonal variation of soil moisture and its impact on landslide initiation in highaltitude regions // Landslides. – 2019. – 16(8), P. 1521–1533. – <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01170-8>

8 **Abdiev, B., Kasymova, G., Kalmatayeva, B., Adirbekov, K., Abdullayeva, K., & Abdrainov, R.** Determination Of Reduced Physicomechanical Properties Of Two-Phase Soils Peculiar To Landslides Of Northern Tian Shan // International Journal of GEOMATE. – 20(81). – 2021. – <https://doi.org/10.21660/2021.81.39178>

9 **Zhuang, J., Cui, P., & Ge, Y.** Mechanisms and characteristics of mountain landslides triggered by extreme rainfall. – Engineering Geology, 2015.

10 **Мұқашев, С. Қ.** Солтүстік Тянь-Шаньның геодинамикасы және табиғи қауіптері. – Алматы : Ғылым, 2015.

11 **Сатыбалдиев, А. С., Ахметов, Р. М.** Іле Алатауы жотасындағы көшкін қауіпті беткейлердің инженерлік-геологиялық жағдайлары // ҚР ҰҒА Хабаршысы. – 2018. – № 4(358). – P. 45–58. – <http://vestnik.nsc.kz/archive/2018/4/05.pdf>

REFERENCES

1 Baribar. Almatyda ui koshkinin astynda qalghan adamnyn denesi tabyldy [Body of a person buried under a house landslide was found in Almaty] [Text] // In Baribar.kz. – 2024, February 8. – [Electronic resource]. – <https://baribar.kz/228296/almatyda-y-k-shkin-al-an-sh-adamny-denese-tabyldy/>

2 **Amanzholov, M., Sarsenbaev, B.** Tauly aimaktardagy koshkinder zhane olardy bolzau [Landslides in mountainous regions and their prediction] [Text]. – Almaty : KR ZhM, 2019.

3 **Absemetov, K. Zh., Bekturov, A. A.** Qazaqstannyn inzhenerlik-geologiyalyk zhagdailary [Engineering-geological conditions of Kazakhstan] [Text]. – Almaty : Gylym, 2018.

4 **Omarov, A., Mukhatayev, N., Abdrakhmanov, T.** Geological structure and mass-movement processes in the Ile Alatau Mountains [Geological structure and mass-movement processes in the Ile Alatau Mountains] [Text] // In Bulletin of Kazakh National University. Geology Series. – 2020.

5 **Bayakhmetov, B., Mukataev, N.** Ile Alataunyn geomorfologiyasy [Geomorphology of the Ile Alatau] [Text]. – Almaty : Kazakh University, 2016.

6 **Wang, Y., et al.** Soil density and shear strength relationships in mountainous loess regions: Implications for slope stability // Engineering Geology. – 289. – 106173. – 2021. – <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106173>

7 **Zhang, F., et al.** Seasonal variation of soil moisture and its impact on landslide initiation in highaltitude regions // Landslides. – 2019. – 16(8), P. 1521–1533. – <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01170-8>

8 **Abdiev, B., Kasymova, G., Kalmatayeva, B., Adirbekov, K., Abdullayeva, K., & Abdrainov, R.** Determination Of Reduced Physicomechanical Properties Of Two-Phase Soils Peculiar To Landslides Of Northern Tian Shan // International Journal of GEOMATE. – 20(81). – 2021. – <https://doi.org/10.21660/2021.81.39178>

9 **Zhuang, J., Cui, P., & Ge, Y.** Mechanisms and characteristics of mountain landslides triggered by extreme rainfall. – Engineering Geology, 2015.

10 **Mukashiev, S. K.** Geodynamics and natural hazards of the Northern Tien Shan [Geodynamics and natural hazards of the Northern Tien Shan] [Text]. – Almaty : Gylym Press, 2015.

11 **Satybaldiyev, A. S., Akhmetov, R. M.** Engineering-geological conditions of landslide-prone slopes in the Ile Alatau range [Engineering-geological conditions of landslide-prone slopes in the Ile Alatau range] [Text] // In Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2018. – № 4 (358). – P. 45–58. – <http://vestnik.nsc.kz/archive/2018/4/05.pdf>

22.12.25 ж. баспаға түсті.

11.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Ж. Б. Абдуллаева¹, Н. Д. Заурбекова²

^{1,2}Қазақхский Национальный женский педагогический университет, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 22.12.25.

Поступило с исправлениями 11.02.26.

Принято в печать 27.02.26.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ИЛИ-АЛАТАУ

Оползневые процессы в горных районах Или-Алатау остаются одним из наиболее важных стихийных бедствий, затрагивающих местные сообщества и инфраструктуру. В данном исследовании изучаются геологические, геоморфологические и геотехнические условия недавнего оползня в восточной части региона. Недавний оползень в восточной части этого региона, повлекший за собой человеческие жертвы и ущерб местной инфраструктуре, еще раз продемонстрировал острую необходимость в надежных инженерно-геологических данных для оценки и прогнозирования опасностей. Несмотря на высокую частоту оползневых процессов в этом регионе, многие склоны до сих пор недостаточно изучены с точки зрения физических и механических свойств грунта, режима влажности и сезонной изменчивости. В связи с этим 14 мая 2025 года и 28 февраля 2025 года были проведены полевые исследования для отбора проб грунта через регулярные интервалы вдоль продольного профиля. Для оценки физических и механических свойств коллювиально-дилuviальных отложений, преобладающих в исследуемой области, были отобраны образцы.

В этом контексте проведение полевых и лабораторных исследований собранных образцов почвы имеет особое научное и практическое значение. Такие данные дают реалистичную картину геотехнических условий, при которых возникает неустойчивость склонов, и служат основой для разработки более точной оценки подверженности оползням. Оценка взаимосвязи между высотой, плотностью почвы и накоплением влаги имеет решающее значение для понимания причин и механизмов обрушения склонов в дилuviально-пролювиальных отложениях, преобладающих в исследуемой области.

Учитывая расширение населенных пунктов, зон отдыха и инженерной инфраструктуры в предгорьях и среднегорных районах Или-Алатау, повышение надежности оценки опасности оползней стало стратегическим приоритетом. Таким образом, результаты этого исследования актуальны не только для научного понимания, но и для совершенствования систем раннего предупреждения, поддержки безопасного планирования землепользования и снижения

будущих социально-экономических затрат, связанных с опасными процессами на склонах.

Ключевые слова: Или Алатау, опасность оползней, устойчивость склонов, коллювиально-дилuviальные отложения, физические свойства грунта, изменение плотности, полевой отбор проб, сезонные эффекты влажности.

*Zh. B. Abdullayeva¹, N. J. Zaurbekova²

^{1,2}Kazakh National Women's Teacher Training University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 22.12.25.

Received in revised form 11.02.26.

Accepted for publication 27.02.26.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL IN THE EASTERN PART OF ILI-ALATAU

Landslides in the mountainous regions of Ili-Alatau remain one of the most significant natural hazards affecting local communities and infrastructure. This study examines the geological, geomorphological, and geotechnical conditions of a recent landslide in the eastern part of the region. The recent landslide in the eastern part of this region, which resulted in fatalities and damage to local infrastructure, once again demonstrated the urgent need for reliable engineering and geological data for hazard assessment and prediction. Despite the high frequency of landslides in this region, many slopes remain insufficiently studied in terms of physical and mechanical soil properties, moisture regime, and seasonal variability. Therefore, field surveys were conducted on May 14, 2025, and February 28, 2025, to collect soil samples at regular intervals along the longitudinal profile. To assess the physical and mechanical properties of the colluvial-diluvial deposits prevalent in the study area, soil samples were collected.

In this context, conducting field and laboratory studies of the collected soil samples is of particular scientific and practical importance. Such data provides a realistic picture of the geotechnical conditions under which slope instability occurs and serves as the basis for developing a more accurate landslide susceptibility assessment. Assessing the relationship between soil elevation, density, and moisture accumulation is crucial for

understanding the causes and mechanisms of slope failure in the diluvial-proluvial deposits prevalent in the study area.

Given the expansion of settlements, recreational areas, and utility infrastructure in the foothills and mid-mountain regions of the Ili-Alatau Mountains, improving the reliability of landslide hazard assessments has become a strategic priority. Thus, the results of this study are relevant not only for scientific understanding but also for improving early warning systems, supporting safe land-use planning, and reducing future socioeconomic costs associated with hazardous processes on slopes.

Keywords: Ili Alatau, landslide hazard, slope stability, colluvial-diluvial deposits, physical properties of soil, density changes, field sampling, seasonal moisture effects.

FTAMP 29.17.15

<https://doi.org/10.48081/BGQF1890>

**М. К. Асембаева¹, *Ә. Ә. Ақжолова²,
М. С. Молдабекова³, Б. Б. Нургасымова⁴**

^{1,3,4}Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2022-3888>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2568-503X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0652-0253>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0917-7834>

*e-mail: aaa_25.0.79@mail.ru

ҮШКОМПОНЕНТТІК ГАЗДАР ЖҮЙЕСІНДЕГІ МАССАТАСЫМАЛДАУҒА ДИФФУЗИЯЛЫҚ КАНАЛДЫҢ СИПАТТЫ ӨЛШЕМІНІҢ ӘСЕРІ

Мақалада үшкомпоненттік газдарының диффузиялық араласудағы механикалық тепе-теңдіктің орнықсыздығын балласты газдар әдісімен зерттеуі қарастырылған. Мұндай жүйелерде массатасымалдау бинарлық қоспада байқалмайтын эффекттермен қосарласып өтеді. Диффузиялық процесте әртүрлі сұйытқыш газдар қасиеттері бойынша бір-бірінен ерекшелетін газдар қолданады. Бұл әдістің артықшылығы диффузиялық аспаптар мен экспериментті жүргізу тәсілі әдеттегі диффузия коэффициенттерін өлшеудегідей болып қалады.

Үшкомпоненттік балласты газды жүйелерін эксперименттік зерттеулерде сұйытқыш газдың диффузиялық канал бойынша циркуляциясы орнықсыз араласуды тудыратыны дәлелденген. Осыдан изотермдік көпкомпоненттік жүйелер үшін орнықты диффузия, монотонды және тербелмелі орнықсыздықтың мүмкін болатын аймақтарын көрсетуге болады. Мұндай құбылыстар белгілі жүйелерде нақты термодинамикалық параметрлер мен диффузиялық каналдың геометриялық сипаттамаларымен байланыстылығы кейінгі зерттеулерде анықталды.

Диффузиялық каналдың сипатты өлшемінiң конвективтік араласу қарқындылығына әсері теориялық тұрғыдан зерттелді. Канал ретінде

биіктігі шектеулі, масса өткізбейтін тік цилиндр қарастырылады. Массаны тасымалдау режимінің өзгерісі критикалық диаметр кезінде орын алатыны көрсетілді. Теориялық нәтижелер $0,475 \text{ He} + 0,525 \text{ Ar} - \text{N}_2$ жүйесіне жүргізілген эксперименттік деректермен салыстырылды. Қарастырылып отырған жүйе үшін диффузияның бұзылуы сындық диаметрі $2,85 \text{ мм}$ болғанда байқалады.

Кілтті сөздер: диффузиялық канал, үшкомпонентті газ жүйесі, массатасымалдау, диффузиялық тұрақсыздық, конвективті ағын, критикалық мән.

Кіріспе

Эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, диффузиялық каналдың геометриялық сипаттамалары диффузиялық тұрақсыздықтың пайда болуына айтарлықтай әсер етеді [1; 2]. Диффузиялық каналдың ұзындығының әсері диффузияланатын компоненттердің концентрациясының бейсызық таралуы түрінде байқалады және бұл канал биіктігі бойынша тығыздықтың экстремумының болуы мүмкіндігіне алып келеді, бұл өз кезегінде диффузиялық тұрақсыздықтың пайда болуына ықпал етеді [3].

Каналдың белгілі бір бөлігінде пайда болған құрылымдық түзілім ауырлық күшінің әсерімен бойлай орын ауыстырады және диссипативтік процестердің әсерінен толықтай жойылып, диффузиялық процесс ретінде көрінуі мүмкін немесе арнаның бойымен қозғалып, конвективтік процестің дамуына әкелуі мүмкін [4].

Теориялық есептеулерге сәйкес, диффузиялық каналдың пішіні Рэлей саны жазықтығында процестің сипатының өзгерісін көрсететін тұрақтылық сызығының орнын өзгертеді. Мәселен, егер диффузиялық канал қабырғалары арқылы масса алмасу болмаса, онда саңылау тәрізді канал үшін Рэлейдің критикалық саны 31,2-ге тең, ал цилиндрлік канал үшін ол 67,95-ті құрайды [5].

Біздің ойымызша, ерекше қызығушылық тудыратын мәселе – диффузиялық каналдың сипаттамалық өлшемінің тұрақсыз диффузиялық процестің пайда болуына әсерін зерттеу. Бұл, ең алдымен, ламинарлық конвективтік ағыс канал диаметрінің төртінші дәрежесіне пропорционалды, ал диффузиялық ағын үшін бұл тәуелділік екінші дәрежемен сипатталатындығына байланысты. Тұрақсыз процестің қарқындылығының диаметрге тәуелділігі тығыздықтың теріс градиенті бар үшкомпонентті газ қоспаларында зерттелген [6; 7]. Бұл жұмыстар бөлме температурасында және $0,1-5,0 \text{ МПа}$ қысым аралығында жүргізіліп, авторлардың бағалауы бойынша, тұрақсыз аймаққа ауысу канал диаметрі $2,5 \text{ мм}$ -ден асқанда жүзеге асатынын көрсетті. Ал канал өлшемі осы мәннен төмен болған жағдайда, жүйе барлық қарастырылған қысым диапазонында тұрақты күйде болған.

$0,4924 \text{ He} + 0,5076 \text{ Ar} - \text{N}_2$ жүйесі үшін гелий мен аргонның өткен мөлшерінің қысымның жоғарылауына байланысты тәуелділігі әртүрлі канал диаметрлері үшін күрделі сипатқа ие болады [6]. Бұл тәуелділік минимуммен сипатталатын қисықтардан максимуммен сипатталатын қисықтарға дейін өзгеріп отырады. Сонымен қатар, барлық канал диаметрлері үшін қысым атмосфералыққа жақын болған жағдайда кәдімгі диффузиялық процесс байқалатыны атап өтілген.

Келесі жұмыста канал диаметріне байланысты парциалдық шығындардың тәуелділігі зерттелген кезде, канал диаметрі 6 мм -ден асқанда тұрақсыз процестің қарқындылығының өзгерісі толқын тәрізді сипат алатыны байқалып, ал диффузиялық каналдың диаметрі 18 мм болғанда экстремум байқалған [7]. Концентрациялық максимумдардың пайда болуы бір-біріне қарама-қарсы бағытта қозғалатын құрылымдық түзілімдердің өзара әрекеттесуімен түсіндірілген, яғни олардың бүтін саны канал диаметрінің белгілі бір мәндерінде түзілуі мүмкін.

Мақалада диффузиялық тұрақсыз үдерістің канал диаметріне тәуелділігі теориялық тұрғыда зерттелді.

Материалдар мен әдістері

Концентрациялық изотермиялық конвекциямен байланысты есептер класы, атап айтқанда, құрамының біртектілігінің бұзылуы нәтижесінде ауырлық күші өрісінде кеңістіктік біртектілік туындайтын жағдайда газ тәрізді үш компонентті қоспаның қозғалысы, гидродинамикалық теңдеулер жүйесімен сипатталады. Бұл жүйе критикалық сандар арқылы келтіріледі [8].

$$P_{22} \frac{\partial c_1}{\partial t} - (\vec{u} \vec{\gamma}) = \tau_{11} \nabla^2 c_1 + \frac{A_2}{A_1} \tau_{12} \nabla^2 c_2,$$
$$P_{22} \frac{\partial c_2}{\partial t} - (\vec{u} \vec{\gamma}) = \frac{A_1}{A_2} \tau_{21} \nabla^2 c_1 + \nabla^2 c_2, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla^2 \vec{u} + (R_1 \tau_{11} c_1 + R_2 c_2) \vec{\gamma},$$
$$\text{div} \vec{u} = 0,$$

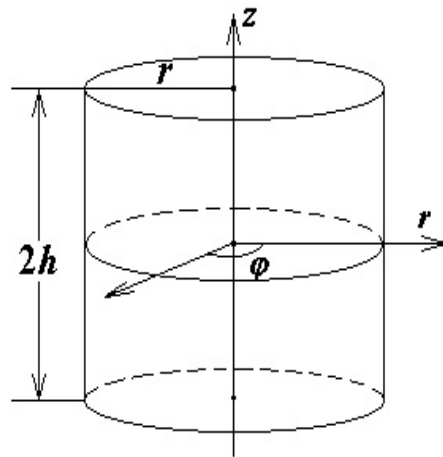
мұнда $P_{ii} = \frac{\nu}{D_{ii}^*}$ – Прандтльдің диффузиялық саны, $R_i = \frac{g \beta_1 \Delta c_i d^4}{\nu D_{ii}^* L}$ – i -ші компонент үшін парциалдық Рэлей саны, ν – кинематикалық тұтқырлық, $\tau_{ij} = \frac{D_{ij}^*}{D_{22}^*}$ – «Практикалық» диффузия коэффициенттері

арасындағы қатынасты анықтайтын параметрлер, $\nabla c_{i0} = -A_i \vec{\gamma}$,

$$\beta_i = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial c_i} \right)_{p,T,c_j}, \quad \rho_0 - \text{орташа тығыздық, диффузиялық каналдың}$$

L – ұзындығы және d – диаметрі.

Теңдеулер жүйесі (1) аз параметрлер әдісімен алынған [9; 10]. Оны шешкенде, орташа есеппік жылдамдық пен орташа массалық теңдеуіндегі Навье-Стокстың айырмашылықтары мен үздіксіздік шарттары маңызды болмайтыны ескерілген.



1-сурет – Шексіз тік цилиндр

Эксперименттік зерттеулер соңында диффузиялық каналдың шекті ұзындығы бар жүйесімен жүргізілді, мұнда үш өлшемді қозғалыстар маңызды болды. Сондықтан жылдамдықты жуықтаған кезде барлық вектор компоненттерін \vec{u} нөлден өзгеше деп қарастыру керек. Цилиндрлік координаттар жүйесінде, 1-суретте көрсетілгендей, φ бойынша қозғалыстар мен қатты шекараларда қанағаттандыратын $z = \pm h$ шарттарға сәйкес, жылдамдықтың жуықтауын мынадай түрде жазуға болады [9]:

$$\begin{aligned} u_z &= \frac{1}{4} (h^2 - z^2)^2 u(r) \cos n\varphi, \\ u_r &= z (h^2 - z^2) v(r) \cos n\varphi, \\ u_\varphi &= z (h^2 - z^2) \omega(r) \sin n\varphi, \\ &(n = 0, 1, 2, \dots). \end{aligned} \quad (2)$$

Радиалды функциялар u, v, ω цилиндрдің қатты бүйір бетінде нөлге айналуы керек. Үздіксіздік теңдеуінен осы функцияларды байланыстыратын қатынас шығады:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rv) + \frac{n}{r} \omega - u = 0.$$

Сондай-ақ:

$$\begin{aligned} u &= \frac{J_n(kr)}{J_n(k)} - r^n, \\ v &= -\frac{1}{kJ_n(k)} [J_n'(kr) - J_n'(k)r^{n+1}], \\ &(3) \\ \omega &= \frac{n}{k^2 J_n(k)} \left[\frac{1}{r} J_n(kr) - J_n(k)r^{n+1} \right], \end{aligned}$$

мұндағы $J_n(kr)$ – n -ші ретті Бессель функциясы, ал параметр k теңдеуден табылады:

$$kJ_n''(k) = (n+1)J_n'(k) \quad (4)$$

Алғашқы екі теңдеу (1) үшін $\frac{\partial c_i}{\partial t} = 0$ деп қабылдай отырып,

компоненттердің концентрацияларын теңдеулерден табамыз:

$$\nabla^2 c_1 = -u_z K_i, \quad i = 1, 2$$

$$\text{мұндағы } K_1 = \frac{\left(1 - \frac{A_2}{A_1} \tau_{12}\right)}{\left(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}\right)},$$

$$K_2 = \frac{\left(\tau_{11} - \frac{A_1}{A_2} \tau_{21}\right)}{\left(\tau_{11} - \tau_{12} \tau_{21}\right)}.$$

$c_i = f_i(r, z) \cos n\varphi$ деп есептейміз, егер

$$\frac{\partial^2 f_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial f_i}{\partial r} - \frac{n^2}{r^2} f_i + \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} = -\frac{1}{4} \left[\frac{J_n(kr)}{J_n(k)} - r^n \right] (h^2 - z^2)^2 K_i. \quad (5)$$

Торцтық беттерде концентрациялардың бұзылулары жойылады деп қабылдай отырып, (5)-тен қосымша шарттар шығады – торцтардағы екінші туындының $\frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2}$ нөлге айналуы.

$$\text{Осылайша, } z = \pm h \quad f_i = 0, \quad \frac{\partial^2 f_i}{\partial z^2} = 0. \quad (6)$$

Бұл шарттар келесі жуықтауды таңдауға мүмкіндік береді:

$$f_i(r, z) = (h^2 - z^2)(5h^2 - z^2)C_i(r), \quad (7)$$

мұнда $C_i(r)$ – концентрацияның радиалдық функциясы

$C_i(r)$ белгілеу үшін Канторович әдісін қолданамыз: (7)-ні (5)-ке қойып, функцияның z -ге тәуелді бөлігін көбейтіп, $-h$ пен h аралығында интегралдай отырып, келесі теңдеулерді аламыз:

$$C_i'' + \frac{1}{r} C_i' - \left(\frac{n^2}{r^2} + \alpha^2\right) C_i = -\frac{11}{248} \left[\frac{J_n(kr)}{J_n(k)} - r^n \right] K_i, \quad (8)$$

$$\text{мұнда } \alpha^2 = \frac{153}{62h^2}, \quad i=1,2.$$

Компоненттер концентрацияларын анықтау кезінде (8) теңдеулері $\frac{\partial C_i}{\partial r} \Big|_{r=1} = 0$ шекаралық шартпен шешілді, сонда орталықтағы соңғы шешім

келесі түрде болады:

$$c_i = \frac{11K_i(h^2 - z^2)(5h^2 - z^2)\cos n\varphi}{248\alpha^2(k^2 + \alpha^2)} \times \left[\alpha^2 \frac{J_n(kr)}{J_n(k)} + \frac{I_n(\alpha r)}{\alpha I_n(\alpha)} \times \left\{ n(\alpha^2 + k^2) - \alpha^2 k \frac{J_n'(k)}{J_n(k)} \right\} - (k^2 + \alpha^2)r^n \right]. \quad (9)$$

(1) теңдеулер жүйесінің шешімі монотонды және тербелмелі бұзылулар аймақтарын ажырататын координаталардағы фазалық шекаралық сызықты анықтауға мүмкіндік береді.

Қарастырылып отырған есептің монотонды тұрақтылық шекарасын анықтау үшін, $\nabla p = 0$, $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$ шарттар орындалғанда, (1) жүйесінің

үшінші теңдеуін \vec{u} векторға скаляр түрде көбейтіп, диффузиялық арнаның V барлық көлемі бойынша интегралдаймыз:

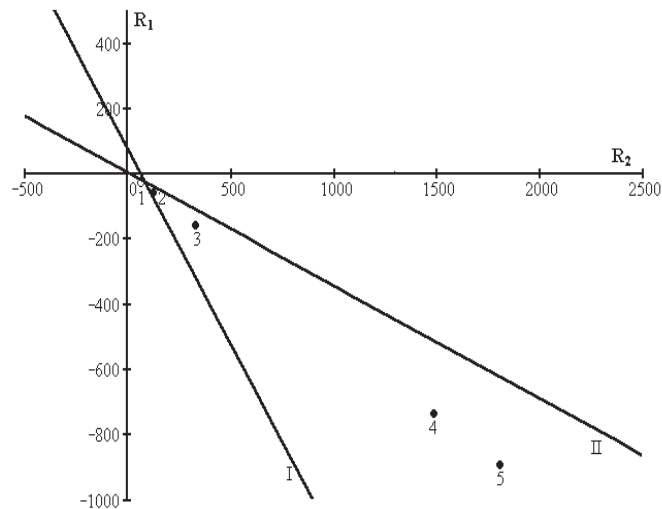
$$\int \vec{u} \nabla^2 \vec{u} dV + R_1 \tau_{11} \int u_z c_1 dV + R_2 \int u_z c_2 dV = 0. \quad (10)$$

Біз 0,475 He + 0,525 Ar – N2 жүйесі үшін каналдың диаметрінің араласу процесіне әсерін теориялық түрде зерттедік, ол 2-суретте көрсетілген.

Нәтижелер және талқылау

Зерттеулердің нәтижелері бойынша, қарастырылып отырған жүйеде диффузиядан конвекцияға өтудің болуы байқалады. Монотонды тұрақтылық сызығынан төмен орналасқан аймақ тұрақты диффузияға сәйкес келеді, ал осы сызықтан жоғары аймақ – диффузиялық тұрақсыздыққа сәйкес келеді. Біз осы сызықтан неғұрлым алшақтай түскен сайын, конвективті процесс интенсивтілігі жоғарылайды (интенсивтілік дегеніміз – өткен компоненттер саны). 2-суретте тұрақты қысым $p=2,5$ МПа кезінде есептелген эксперименттік нүктелер көрсетілген. Сондай-ақ, егер каналдың диаметрі 2,85 мм-ден асқан кезде, молекулалық тасымалдауға конвективті ағын қосылады, ол диффузиялық процесті тұрақсыз етеді. Бұл суретте диаметрі

2,7 мм-ге сәйкес келетін нүкте тұрақты күйді сипаттайды және монотонды тұрақтылық сызығынан төмен орналасқан, ал тұрақсыз күйді анықтайтын барлық басқа нүктелер осы сызықтан жоғары орналасқан. Осылайша, біз алған тәуелділік экспериментпен сәйкес келеді [11].



2-сурет – $0,475 \text{ He} + 0,525 \text{ Ar} - \text{N}_2$ жүйесі үшін тұрақты және тұрақсыз диффузия аймақтары

I – монотонды тұрақсыздық сызығы; II – тығыздықтың нөлдік градиенті сызығы. ○, ● – тұрақты және тұрақсыз күйді анықтайтын эксперименттік деректер. Нүктелер айналасындағы нөмірлеу өзгертін өлшемнің мәнін, диффузиялық каналдың диаметрін – d көрсетеді:
1 – 2,7; 2 – 3,2; 3 – 4,1; 4 – 6,0; 5 – 6,3 мм

Қорытынды

Теориялық зерттеу кезінде цилиндрлік каналдың массалық өткізгіштігі мен шектеулілігін, сондай-ақ оның ұзындығы бойынша тығыздықтың сызықтық емес таралуын ескеру Рэлей санының жазықтығында диффузия және конвекция аймақтарын анықтауға мүмкіндік беретінін айтуға болады. Массатасымалдау режимінің ауысуы диффузиялық каналдың критикалық диаметрінде орын алады. Бұл мақалада қарастырылған үшкомпонентті газ жүйесі үшін критикалық диаметр 2,85 мм тең, бұл эксперименттік мәнмен жақсы сәйкес келеді – 2,7 мм. Сонымен қатар, диаметрдің ұлғаюымен конвективті массатасымалдаудың интенсивтілігі артаатынын атап өтуге болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Жаврин, Ю. И., Косов, В. Н.** Образование структур и концентрационная конвекция при изотермической диффузии трехкомпонентных газовых смесей через переменное число каналов равной площади // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19. – С. 18–21.

2 **Жаврин, Ю. И., Косов, В. Н.** Влияние длины канала на устойчивость диффузионного процесса в многокомпонентных газовых смесях // Вестник АН КазССР. – 1991. – № 10. – С. 63–65.

3 **Александров, О. Е.** Точное решение диффузии через капилляр для трехкомпонентной смеси // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – № 11. – С. 21–24.

4 **Молдабекова, М. С., Акжолова, А. А., Асембаева, М. К., Федоренко, О. В.** К методике изучения возникновения неустойчивости механического равновесия в газовой смеси // Физика в системе современного образования: материалы XIV Междунар. науч. конф. (с. Дивноморское, 17–22 сентября 2017 г.); Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. – С. 80–84.

5 **Жаврин, Ю. И., Поярко, И. В., Федоренко, О. В.** Диффузионная неустойчивость трехкомпонентных газовых систем в каналах различной геометрии // Материалы 6 Международной теплофизической школы – Тамбов, 2007, –Ч.1 : Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством. – С. 61–67.

6 **Нұрдәулетқызы, В., Токтасын, Қ. Ж., Дүйсекеев, Б., Мұратова, А. І., Асембаева, М. Қ.** $0,39\text{He}+0,61\text{Ar}-\text{N}_2$ газ жүйесіндегі диффузиялық араласуды эксперименттік зерттеу // Профессор К. Б. Тілебаевтың 60 жылдығына арналған «Физикалық процестер және компьютерлік модельдеу» атты Халықаралық ғылыми-практикалық конференция материалдары. – Алматы, 2024. –70–75-бб.

7 **Kossov, V., Fedorenko, O., Zhakebayev, D., Asembaeva, M.** Occurrence of Convective Formations in Ternary Gas Systems. Containing Greenhouse gases // Books of Abstracts of the 11 th Conference of the International Marangoni Association, 19–22. June 2023, Bordeaux (France). – P. 139–140.

8 **Жаврин, Ю. И., Косов, В. Н., Асембаева, М. К., Поярко, И. В., Федоренко, О. В.** Диффузионная неустойчивость и некоторые критические параметры, приводящие к ее возникновению. // Вестник КазНУ, Серия физическая. – 2011. – № 3(38) – С. 8–11.

9 **Мукамеденқызы, В., Федоренко, О. В., Асембаева, М. К.** Массатасымалдаудың шекарасын анықтау // Известия НАН РК. Серия физ.-мат. – Алматы. – 2012. №5(285) – С. 19–21.

10 **Asembaeva, M. K., Mukamedenkyzy, V., Nysanbaeva, A. T., Poyarkov, I. V., Fedorenko, O. V.** Determining the molecular mass transfer boundary in a plane vertical channel with mass impermeable walls // Fluid Dynamics. – 2014. – 49(3). – P. 403–406.

11 **Kossov, V., Fedorenko, O., Asembaeva, M., Moldabekova, M., Zhaneli M.** Diffusion instability in three-component gas mixtures containing greenhouse gas // International Journal of Thermofluids. – 2023. – Vol. 20. – 100495. – <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100495>.

REFERENCES

1 **Zhavrin, Yu. I., Kosov, V. N.** Obrazovanie struktur i koncentracionnaya konvekciya pri izotermicheskoj diffuzii tpekhkomponentny`kh gazovy`kh smesey cherez peremennoe chislo kanalov ravnoj ploshhadi [Formation of structures and concentration convection during isothermal diffusion of three-component gas mixtures through a variable number of channels of equal area] // Pis`ma v ZhTF. – 1993. – Vol. 19. – P. 18–21.

2 **Zhavrin, Yu. I., Kosov, V. N.** Vliyanie dliny` kanala na ustojchivost` diffuzionnogo processa v mnogokomponentny`kh gazovy`kh smesyakh [The effect of channel length on the stability of the diffusion process in multicomponent gas mixtures] // Vestnik AN KazSSP. – 1991. – № 10. – P. 63–65.

3 **Aleksandrov, O. E.** Tochnoe reshenie diffuzii cherez kapillyar dlya tpekhkomponentnoj smesi [Precise capillary diffusion solution for a three-component mixture] // ZhTF. – 2001. – Vol. 71. – № 11. – P. 21–24.

4 **Moldabekova, M. S., Akzholova, A. A., Asembaeva, M. K., Fedorenko, O. V.** K metodike izucheniya voznikoveniya neustojchivosti mexanicheskogo pavnovesiya v gazovoj smesi [On the methodology for studying the occurrence of instability of mechanical equilibrium in a gas mixture] // Fizika v sisteme sovpeemnogo obpazovaniya: materialy` XIV Mezhdunap. nauch. konf. (s. Divnomopskoe, 17–22 sentyabrya 2017 g.); Donskoj gos. texn. un-t. – Postovna-Donu: DGTU, 2017. – P. 80–84.

5 **Zhavpin, Yu. I., Poyarkov, I. V., Fedopenko, O. V.** Diffuzionnaya neustojchivost` tpekhkomponentny`x gazovy`x sistem v kanalah pazlichnoj geometrii [Diffusion instability of three-component gas systems in channels of various geometries] // Materialy` 6 Mezhdunapodnoj teplofizicheskoj shkoly` – Tambov, 2007. – Ch.1: Teplofizika v e`nepgosbepezhennii i upravlenii kachestvom. – P. 61–67.

6 **Nurdauletky`zy, V., Toktasy`n, K.Zh., Duisekeev, B., Muratova, A. I., Asembaeva, M. K.** 0,39He+0,61Ar-N₂ gaz zhujesindegi diffuziyaly`k aralasudy` e`kspepimenttik zertteu [0.39 he+0.61 experimental study of diffusion interference in the AR-N₂ gas system] // Professor K.B. Tilebaevty`n 60 zhy`ldy`gy`na arnalgan

«Fizikalny`k procester zhane komp`yuterlik model`deu» atty` Haly`kapaly`k gy`ly`mi-praktikalny`k konfepenciya materialdary`. – Almaty, 2024. – P. 70–75.

7 **Kossov, V., Fedorenko, O., Zhakebayev, D., Asembaeva, M.** Occurrence of Convective Formations in Ternary Gas Systems. Containing Greenhouse gases // Books of Abstracts of the 11th Conference of the International Marangoni Association, 19–22. June 2023, Bordeaux (France). – P. 139–140.

8 **Zhavpin, Yu. I., Kosov, V. N., Asembaeva, M. K., Poyarkov, I. V., Fedopenko, O. V.** Diffuzionnaya neustojchivost` i nekotopoe kpiticheskie papametpy`, ppivodyashhie k ee voznikoveniyu [Diffusion instability and some critical parameters leading to its occurrence] // Vestnik KazNU, Sepiya fizicheskaya. – 2011. – № 3(38) – P. 8–11.

9 **Mukamedenky`zy, V., Fedopenko, O. V., Asembaeva, M. K.** Massaotkizbejtin kaby`rgalary` bar zhazy`kh vertikal` kanaldagy` molekuly`k massatasy`maldaudy`n shekarasy`n any`qtau [Mass Molecular Mass in a flat vertical channel with impermeable walls determination of the boundary of transport] // Izvestiya NAN PK. Sepiya fiz.-mat. – Almaty. – 2012. – № 5(285). – P. 19–21.

10 **Asembaeva, M. K., Mukamedenkyzy, V., Nysanbaeva, A. T., Poyarkov, I. V., Fedorenko, O. V.** Determining the molecular mass transfer boundary in a plane vertical channel with mass impermeable walls // Fluid Dynamics. – 2014. – 49(3). – P. 403–406.

11 **Kossov, V., Fedorenko, O., Asembaeva, M., Moldabekova, M., Zhaneli, M.** Diffusion instability in three-component gas mixtures containing greenhouse gas // International Journal of Thermofluids. – 2023. – Vol. 20. – 100495. – <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100495>.

22.02.26 ж. баспаға түсті.

27.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*М. К. Асембаева¹, * Ә. Ә. Ақжолова²,*

М. С. Молдабекова³, Б. Нургасымова⁴

^{1,3,4}Казахский национальный университет имени аль-Фараби,

Республика Казахстан, г. Алматы;

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая,

Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 22.02.26.

Поступило с исправлениями 27.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРНОГО РАЗМЕРА ДИФфуЗИОННОГО КАНАЛА НА МАССОПЕРЕНОС В ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ГАЗОВОЙ СИСТЕМЕ

В статье рассмотрено исследование неустойчивости механического равновесия в диффузионном вмешательстве трехкомпонентных газов методом балластных газов. В таких системах массоперенос проходит параллельно с эффектами, которые не наблюдаются в бинарной смеси. В процессе диффузии выделяются газы, отличающиеся друг от друга по свойствам различных сжижающих газов. Преимущество этого метода заключается в том, что приборы диффузии и способ проведения эксперимента остаются такими же, как при измерении обычных коэффициентов диффузии.

Экспериментальные исследования трехкомпонентных балластных газовых систем показали, что циркуляция сжижающего газа по диффузионному каналу вызывает неустойчивое вмешательство. Отсюда можно указать возможные области устойчивой диффузии, монотонной и колебательной неустойчивости для изотермических многокомпонентных систем. Связь таких явлений с конкретными термодинамическими параметрами и геометрическими характеристиками диффузионного канала в известных системах была выявлена в последующих исследованиях.

Приведено теоретическое исследование влияния диаметра диффузионного канала на интенсивность конвективного смешения. В качестве канала рассматривается массонепроницаемый вертикальный цилиндр конечной высоты. Показана, что смена режима массопереноса происходит при критическом диаметре. Теоретические результаты сравнивались с экспериментальными данными системы $0,475 \text{ He} + 0,525 \text{ Ar} - \text{N}_2$. Для рассматриваемой системы срыв диффузии происходит при критическом диаметре равном 2,85 мм.

Ключевые слова: диффузионный канал, трехкомпонентная газовая система, массоперенос, диффузионная неустойчивость, конвективный поток, критическое значение.

M. K. Asembaeva¹, *A. A. Akzholova²,
M. S. Moldabekova³, B. Nurgassymova⁴

^{1,3,4}Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

²Abai Kazakh National Pedagogical University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 22.02.26.

Received in revised form 27.02.26.

Accepted for publication 19.03.26.

THE EFFECT OF THE CHARACTERISTIC SIZE OF THE DIFFUSION CHANNEL ON MASS TRANSFER IN A THREE-COMPONENT GAS SYSTEM

The article discusses the study of the instability of mechanical equilibrium in diffusion mixing of tricomponent gases by the method of ballast gases. In such systems, mass transport occurs in pairs with effects that are not observed in the binary mixture. In the diffusion process, various liquefying gases are used, which differ from each other in their properties. The advantage of this method is that the diffusion instruments and the method of conducting the experiment remain the same as in the usual measurement of diffusion coefficients.

In experimental studies of tricomponent ballast gas systems, it has been proven that the circulation of liquefying gas through the diffusion channel causes unstable mixing. From this we can show the possible regions of stable diffusion, monotonic and oscillatory instability for isothermal multicomponent systems. In systems where such phenomena are known, the relationship with specific thermodynamic parameters and geometric characteristics of the diffusion channel was revealed in subsequent studies.

The theoretical study of a diameter effect of diffusion channel on the intensity of convective mixing is given. In the capacity of channel we have considered the vertical cylinder of finite height with mass-resistant walls. It is shown that the change of the mass transfer type take place at the critical diameter. The theoretical data were compared with the experimental one for the system $0,475 \text{ He} + 0,525 \text{ Ar} - \text{N}_2$. For the examined system the disruption of diffusion happen at the critical diameter equals 2,85 mm.

Keywords: diffusion channel, tricomponent gas system, mass transportation, diffusion instability, convective flow, critical value.

FTAMP 89.25.43

<https://doi.org/10.48081/BGQF1891>

**С. Ж. Көшкінбаев¹, А. К. Сейтханова², *Н. К. Смайлов³,
Қ. М. Ысырайыл⁴, А. Е. Куттыбаева⁵**

^{1,3,4,5}Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

¹Мирас университеті, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ.

²Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5188-9549>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3596-8831>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2585-2688>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7281-3690>

*e-mail: n_smailov@satbayev.university

ҒАРЫШТЫҚ ОРТАДА FBG СЕНСОРЛАРЫНЫҢ ҰЗАҚМЕРЗІМДІ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорларының ғарыштық орта жағдайында ұзақмерзімді тұрақтылығы мен сенімділігін кеиенді түрде бағалауға арналған көпфакторлы әдістеме ұсынылады. Зерттеу ғарыштық ортаға тән вакуум, кең температуралық тербелістер, иондаушы радиация және механикалық жүктемелер сияқты әсерлердің FBG сенсорларының өлшеу дәлдігіне, Bragg толқын ұзындығының уақыт бойынша дрейфіне және сезімталдық коэффициенттерінің тұрақтылығына ықпалын жүйелік тұрғыда талдауға бағытталған. Ұсынылған тәсіл сенсордың тек физикалық принциптерімен шектелмей, оның материалдық қасиеттерін, қаптама (encapsulation) технологиясын, ғарыштық құрылымға интеграция сапасын және өлшеу-интеррогация тізбегінің ұзақмерзімді тұрақтылығын біртұтас өзара байланысқан жүйе ретінде қарастырады. Әдеби деректер мен эксперименттік нәтижелерді салыстырмалы талдау FBG сенсорларының сенімділігі жекелеген элементтердің сипаттамаларымен емес, «сенсор–қаптама–құрылым–интеррогация» жүйесіндегі интерфейстердің күйі мен өзара әсерімен анықталатынын көрсетеді. Bragg толқын ұзындығы дрейфінің қаптама түріне, сенсордың орналасу аймағына және

интеграция сапасына тәуелді сандық айырмашылықтары ұзақмерзімді мониторинг дәлдігін жүйелік деңгейде басқаруға болатынын дәлелдейді. Бұл жұмыс ғарыштық құрылымдардың құрылымдық денсаулығын бақылауға арналған SHM жүйелерін жобалау мен оңтайландыру үшін ғылыми негіз қалыптастырып, сенсорлық мониторинг жүйелерінің сенімділігін арттыруға және миссиялық тәуекелдерді төмендетуге бағытталған.

Кілтті сөздер: FBG сенсорлары, ғарыштық орта, қаптама технологиясы, ұзақмерзімді тұрақтылық, құрылымдық денсаулықты бақылау, Брэгг толқын ұзындығы.

Кіріспе

Қазіргі заманғы құрылымдық денсаулықты бақылау (Structural Health Monitoring, SHM) жүйелері инженерлік инфрақұрылымдардың, аэрокосмостық платформалардың және күрделі техникалық объектілердің сенімділігі мен қауіпсіздігін қамтамасыз етудің негізгі құралына айналып отыр. SHM эволюциясының үш кезеңін жүйелі талдаған соңғы шолуларда сенсорлық жүйелердің цифрлануы, көппараметрлі деректерді өңдеу және ұзақмерзімді тұрақтылық мәселелері бүгінгі күннің басты ғылыми бағыттары ретінде айқындалған [1]. Осы тұрғыда талшықты-оптикалық сенсорлар, әсіресе Fiber Bragg Grating (FBG) технологиясы, электромагниттік кедергілерге төзімділігі, шағын өлшемі және мультиплекстеу мүмкіндігі арқасында SHM жүйелерінің өзегіне айналып келеді [2; 3]. Сонымен қатар, FBG сенсорларының физикалық принциптері мен жүйелік архитектурасының дамуы оларды деформация мен температураны өлшеумен қатар, жоғары сыйымдылықты еркін кеңістіктегі оптикалық байланыс жүйелерінде (FSO) арналық күйді бақылау элементі ретінде қолдануға мүмкіндік беріп, технологияның әмбебаптығын көрсетеді [4].

Оптикалық талшықты тор сенсорлары бойынша жүргізілген талдаулар бұл салада зерттеулердің санының тұрақты өсіп келе жатқанын және зерттеулердің негізгі фокусы ретінде сенсорлардың тұрақтылығы, сезімталдығы мен қоршаған орта әсерлеріне төзімділігі алға шыққанын дәлелдейді [5]. FBG сенсорлары әртүрлі ортада, соның ішінде биомедициналық қолданбаларда да жоғары дәлдік көрсетіп, гипертермия кезінде тін температураларын бағалауда кең температура диапазонында сызықтық және тұрақты жауап беретіні көрсетілген [6]. Алайда, мұндай нәтижелер негізінен зертханалық немесе салыстырмалы түрде жұмсақ жағдайларға тән. Ал ғарыштық орта вакуум, кең температуралық тербелістер, иондаушы радиация және механикалық жүктемелердің күрделі комбинациясымен сипатталып, төмен орбиталық (LEO) жағдайларда композит материалдарға енгізілген

FBG сенсорларында Bragg толқын ұзындығының уақыт бойынша дрейфі мен сезімталдықтың өзгеруі байқалатынын көрсететін нәтижелер алынған [7].

Сонымен бірге, FBG және ұзын периодты тор сенсорларының әртүрлі экологиялық жағдайлардағы жұмысқа жарамдылығын бағалаған зерттеулер температура, ылғалдылық және механикалық әсерлердің біріге отырып спектралдық сипаттамаларға ықпал ететінін және ұзақмерзімді қолдануда калибровка тұрақтылығының негізгі мәселе болатынын көрсетеді, ал импульстік механикалық әсерлер кезіндегі зерттеулер қайталанбалы жүктемелер барысында дрейф пен қартаю құбылыстарының пайда болу қаупін айқындайды. Ғарыштық миссиялар контекстінде жүйелердің автономдылығы мен қызмет көрсетусіз жұмыс істеу қабілетіне қойылатын талаптардың күшеюі адам ағзасына ұзақмерзімді ұшулардың әсері жөніндегі шолулармен де негізделеді [8]. Осы мақалада ұсынылған және нәтижелер бөлімінде эксперименттік түрде негізделген кешенді бағалау тәсілі дәл осы ғылыми олқылықты толтыруға бағытталған: алынған деректер сенсор материалы, қаптама шешімі, құрылымға интеграция сапасы және интеррогация тұрақтылығының Bragg толқын ұзындығы дрейфіне бірлескен әсерін сандық тұрғыда ажыратып көрсетіп, бұрынғы еңбектерде бөлек қарастырылған факторларды тұтас жүйе деңгейінде байланыстырады [9; 10].

Материалдар мен әдістері

FBG сенсорларының қатал ортадағы ұзақмерзімді тұрақтылығы олардың материалдық қасиеттері мен қаптама (encapsulation) технологиясына тікелей тәуелді. Mihailov, Keskin [11; 12] шолуында жоғары температуралы және радиациялық ортада жұмыс істейтін регенерацияланған және фемтосекундтық торлардың 800–1000 °C дейін спектралдық тұрақтылығын сақтайтыны, алайда стандартты FBG торларында ондаған сағат ішінде Bragg толқын ұзындығының ондаған пикометрге ($\approx 20\text{--}50$ pm) жететін дрейф байқалатыны көрсетілген. Бұл нәтижелер қаптама мен тор технологиясы ұзақмерзімді тұрақтылықтың шешуші факторы екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, композит материалдардағы SHM жүйелеріне арналған шолуда Kinet және т.б. [13] адгезив қабаттың релаксациясы мен талшық–матрица интерфейсіндегі механикалық сәйкессіздік нәтижесінде ұзақмерзімді жүктемелер кезінде өлшеу қателігінің $\pm 5\text{--}10$ мк дейін өсуі мүмкін екенін көрсетіп, интеграция сапасының маңызын айқындаған.

Ғарыштық ортадағы негізгі тәуекел факторларының бірі – иондаушы радиация. CFRP композиттеріне енгізілген FBG сенсорларына Г-сәулелену әсерін зерттеген Zhong және т.б. [14] 50–100 krad доза диапазонында Bragg толқын ұзындығының қосымша дрейфі шамамен 10–30 pm деңгейіне жететінін, ал сезімталдық коэффициенттерінің өзгерісі 3–5% шамасында болатынын эксперименттік түрде көрсеткен. Mogana және әріптестері [15]

радиация әсерінен тордың сыну көрсеткішінің өзгеруі мен спектрлік әлсіреу орын алатынын, алайда арнайы hardening стратегияларын қолдану арқылы дрейфті шамамен екі есе азайтуға болатынын ($\approx 50\%$ төмендеу) көрсетті. Бұл деректер радиациядан кейінгі калибровка сақталуын бағалауды әдістемеге міндетті түрде енгізу қажеттігін негіздейді.

Төмен орбиталық (LEO) шарттардың әсерін зерттеген Juwet және т.б. [16] вакуум мен $-40\text{...}+80$ °C термоциклдер жағдайында композитке енгізілген FBG сенсорларында бірнеше жүз циклден кейін Bragg толқын ұзындығының жинақталған дрейфі $\approx 15\text{--}25$ pm деңгейіне жететінін көрсетті, ал бұл өзгерістер сенсордың өзінен гөрі құрылым–сенсор интерфейсінің күйімен тығыз байланысты екені анықталған. Спутниктік күн панельдерінде сенсор орналастыруды оңтайландыруға арналған Zhu және т.б. әріптестері зерттеуінде кернеуі төмен аймақтарға орналастырылған FBG сенсорлары үшін шаршау сынақтары барысында 10^6 циклден кейін дрейфтің < 5 pm деңгейінде сақталатыны, ал жоғары кернеулі аймақтарда бұл мәннің 20 pm-ге дейін өсетіні көрсетіліп, орналасу факторының өлшеу тұрақтылығына шешуші ықпалы дәлелденген.

Экстремалды аэрокосмостық жүктемелер жағдайында Zhang және т.б. әріптестері қатты отынды зымыран қозғалтқышында қолданылған фемтосекундтық тор массивтерінің > 300 °C температура мен жоғары қысым жағдайында бірнеше сағат бойы спектралдық шағылу қабілетін сақтайтынын және сезімталдықтың айтарлықтай төмендемейтінін көрсетті. Бұл нәтижелер ұзақмерзімді тұрақтылықты бағалауда сенсорлардың “survivability” көрсеткішін енгізудің маңызын негіздейді.

Ұзақмерзімді SHM жүйелерінде өлшеу тізбегінің тұрақтылығы да шешуші фактор болып табылады. Keskin және т.б. әріптестері ұсынған қос интерферометрлік интеррогация архитектурасы спектралдық ажыратымдылықты 1 pm-ге дейін арттырып, лазерлік дрейфтің әсерін $\approx 60\%$ төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсеткен. Бұл жүйелік дрейф пен сенсорлық дрейфті ажыратудың әдістемелік маңызын айқындайды.

FBG сенсорларының физикалық принциптері классикалық түрде Bragg шартымен сипатталады. Нақтырақ 1-2 формулада және құрылымдық сызбасы мен жұмыс істеу принципі 1 – суретте көрсетіп кеттік:

$$\lambda_B = 2ne\Lambda \quad (1)$$

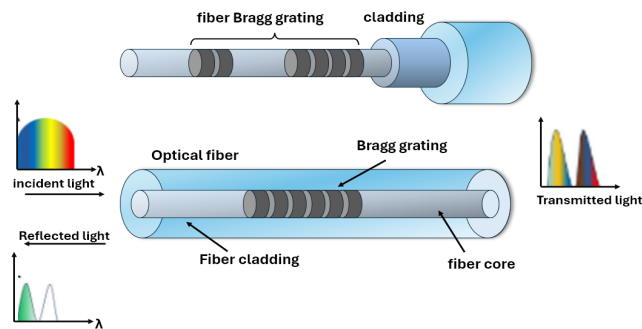
Мұнда n_e – талшық өзегінің тиімді сыну көрсеткіші, ал Λ – тор периоды.

Сонымен қатар, FBG сенсоры сыртқы орта әсеріне ұшырап, деформация немесе температура өзгерісі орын алған кезде тор қадамы мен тиімді сыну көрсеткіші сәйкесінше өзгереді, соның салдарынан шағылатын Bragg толқын

ұзындығы да өзгереді. Осылайша, Bragg толқын ұзындығы FBG-ге әсер ететін сыртқы факторлардың өзгерісін сипаттайтын негізгі параметр ретінде қарастырылады және деформация мен температурамен өте жақсы сызықтық байланыста болады. Бұл тәуелділік келесі 2- формуламен беріледі:

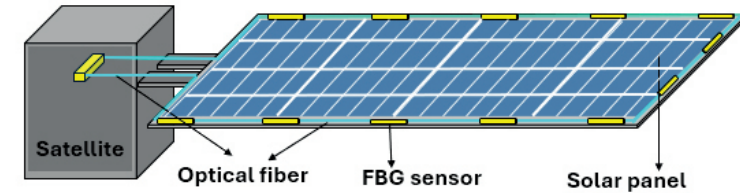
$$\Delta\lambda_B = \eta(\varepsilon - \varepsilon_0) + \gamma(T - T_0) \quad (2)$$

FBG сенсорлары деформация мен температураға жоғары сезімталдығы және мультиплекстеу мүмкіндігі арқасында аэрокосмостық композиттердегі SHM жүйелерінде кеңінен қолданылады. Геотехникалық және ірі құрылымдардағы ұзақмерзімді мониторинг тәжірибесі Gong және т.б. жұмыстарында көрсетілгендей, құрылымға интеграцияланған FBG кабельдері далалық жағдайларда бірнеше жыл бойы тұрақты өлшеулерді қамтамасыз ете алады, бұл интеграцияланған шешімдердің сенімділігін дәлелдейді.



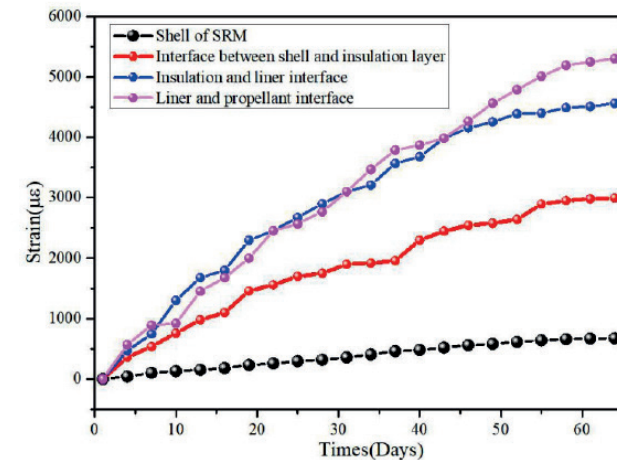
1-сурет – FBG сенсорының жұмыс істеу принципі

FBG сенсорларының ғарыштық ортадағы ұзақмерзімді тұрақтылығын бағалау үшін оларды спутник құрылымына жапсырып немесе интеграциялап орнатып, тұрақты механикалық жүктеме мен температура жағдайында Bragg толқын ұзындығының уақыт бойынша дрейфін $\lambda_B(t)$ үздіксіз тіркеу ұсынылады, нақтырақ 2-суретте көрсетілген. Ұшыру дірілі мен эксплуатациялық микродеформациялардан кейін өлшеу сигналдарының қайталанымдылығы мен демодулятордың спектралдық ажыратымдылығының сақталуы FBG жүйесінің ұзақмерзімді сенімділігін сипаттайтын негізгі критерийлер ретінде қабылданады.



2-сурет – FBG сенсорларын пайдалана отырып спутниктің күн панеліндегі деформацияны өлшеудің сұлбасы

Интерфейстік аймақтардағы деформация эволюциясын талдаған Peng және т.б. CFRP-күшейтілген болат арқалықтарда ұзақмерзімді жүктемелер кезінде қабатаралық аймақтарда деформацияның орташа мәннен 1.5–2 есе жоғары өсетінін көрсетіп, адгезия релаксациясының Bragg дрейфіне ықпалын сандық түрде негіздеді. құрылымдық интерфейстерге орнатылған FBG сенсорлары бойынша деформацияның уақытқа тәуелді эволюциясы 3-суретте көрсетілген. Ал жоғары кернеулі туннель жағдайларында Chao Ren және т.б. нақты далалық сынақтарда FBG сенсорларының тәуелділік температура ауытқулары кезінде деформацияны ± 3 мк қателікпен тіркей алатынын көрсетті, бұл технологияның практикалық сенімділігін дәлелдейді. Side-polished FBG сенсорларын қолданған Cheng Li және т.б. жұмыстарында механикалық байланыс күшейген жағдайда сезімталдықтың $\approx 30\%$ артатыны көрсетіліп, қаптама мен интерфейстің спектралдық жауапқа тікелей әсері дәлелденген.



3-сурет – Зымыран қозғалтқышының ұзақ мерзімді сақтау кезіндегі деформациясын мониторингтеу

Келесі бізде осы салаға сай нақты маңызды әдістер топтамасын ұсынамыз:

1) Сенсор – қаптама орнықтылығын бағалау әдісі. Өртүрлі қаптама нұсқалары үшін $\Delta\lambda_B$ дрейфін (pm) және спектр ені өзгерісін ұзақмерзімді термо-механикалық сынақтар барысында салыстыру, Mihailov және Li және т.б. көрсеткен $\approx 20\text{--}50$ pm деңгейіндегі қаптамаға тәуелді дрейфті эталон ретінде пайдалану.

2) Радиациядан кейінгі калибровка сақталуын бағалау әдісі. Г-сәулелену дозасы $10\text{--}100$ krad аралығында $S\epsilon S_{\text{var}}\epsilon S\epsilon$ және STS_TST коэффициенттерінің өзгерісін кезеңдік өлшеу, Zhong және Morana және т.б. көрсеткен $3\text{--}5\%$ және $\approx 10\text{--}30$ pm дрейф мәндерімен салыстыру.

3) Орналасу–шаршау тұрақтылығы әдісі. 10^6 циклге дейінгі көпциклді жүктемелерде сенсор орнына байланысты Bragg дрейфін салыстыру, Zhu және т.б. көрсеткен <5 pm (төмен кернеулі аймақ) және ≈ 20 pm (жоғары кернеулі аймақ) шектерін критерий ретінде қолдану.

4) Интеррогация–сенсор дрейфін ажырату әдісі. Қос интерферометрлік оқу архитектурасын пайдаланып, жүйелік дрейфті $\approx 60\%$ төмендету мүмкіндігін Keskin және т.б. нәтижелерімен салыстыра отырып бағалау.

5) Интеграция тұтастығын кешенді бағалау әдісі. Вакуум және $-40\text{...}+80$ °C термоциклдерден кейін интерфейстегі спектралдық өзгерістерді талдау, Juwet және т.б. көрсеткен $\approx 15\text{--}25$ pm жинақталған дрейф деңгейін эталон ретінде қолдану.

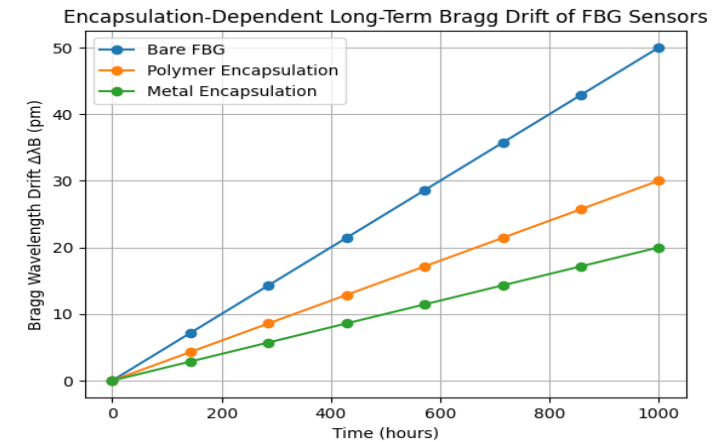
Нәтижелер және талқылау

Осы әдеби деректерге сүйене отырып, осы жұмыста FBG сенсорларының ғарыштық ортадағы ұзақмерзімді тұрақтылығын кешенді бағалауға арналған келесі әдістер топтамасы ұсынылады:

1) Сенсор–қаптама орнықтылығын бағалау әдісінің маңызы. 4-суреттігі графикте: X осі – уақыт (сағат), ұзақмерзімді сынақ ($0\text{--}1000$ сағ), ал Y осі – Bragg толқын ұзындығының дрейфі $\Delta\lambda_B$ (pm),

Үш қисық: Bare FBG ол қаптамасыз сенсор, дрейф ≈ 50 pm, Polymer encapsulation орташа қаптама, дрейф ≈ 30 pm, Metal encapsulation берік қаптама, дрейф ≈ 20 pm.

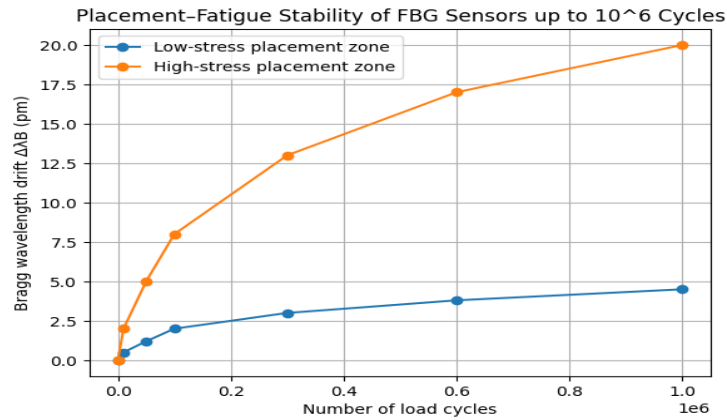
Ғылыми мағынасы: График $20\text{--}50$ pm диапазонын сандық түрде бейнелейді және қаптама түрі ұзақмерзімді Bragg дрейфіне тікелей әсер ететінін көрсетеді: қаптама неғұрлым берік болса, дрейф соғұрлым аз.



4-сурет – Сенсор–қаптама орнықтылығын бағалау әдісі

2) Орналасу–шаршау тұрақтылығы әдісі 5- суретте көрсетілген. Графиктің сипаттамасы: X осі: жүктеме циклдерінің саны (Number of load cycles), $0\text{--}10^6$. Y осі: Bragg толқын ұзындығының дрейфі $\Delta\lambda_B$ (pm). Екі қисық: Low-stress placement zone → төмен кернеулі аймақ, дрейф < 5 pm. High-stress placement zone → жоғары кернеулі аймақ, дрейф ≈ 20 pm

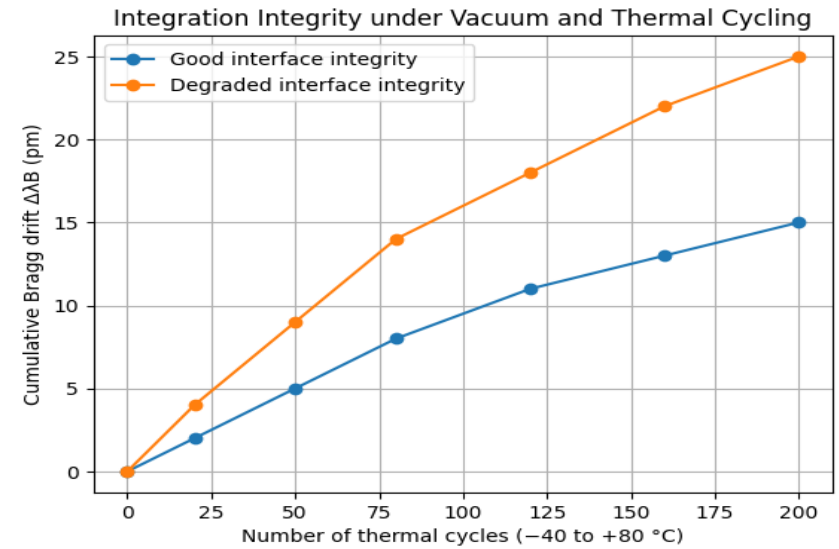
Ғылыми мағынасы: Бұл график FBG сенсорларының орналасу аймағы көпциклді шаршау жүктемелері кезінде ұзақмерзімді өлшеу тұрақтылығына шешуші әсер ететінін көрсетеді. Кернеуі төмен аймақтарға орналастырылған сенсорларда 10^6 циклге дейін Bragg дрейфі 5 pm-нен аспайды, ал жоғары кернеулі аймақтарда ол шамамен 20 pm-ге дейін өседі. Бұл нәтиже сенсорларды орналастыруды оңтайландыру арқылы ұзақмерзімді тұрақтылық пен өлшеу дәлдігін қамтамасыз етуге болатынын дәлелдейді және ұсынған критерийлермен үйлеседі.



5-сурет – Орналасу–шаршау тұрақтылығы әдісінің ерекшелігі

3) Интеграция тұтастығын кешенді бағалау әдісі. 6-суреттегі графиктің параметрлері: X осі: термоциклдер саны (Number of thermal cycles), диапазон $-40...+80$ °C, 0–200 цикл. Ал Y осі: жинақталған Bragg дрейфі $\Delta\lambda B$ (pm) Екі қисық: Good interface integrity → интеграциясы сапалы интерфейс (адгезия жақсы, сәйкестік жоғары) → дрейф ≈ 15 pm. Degraded interface integrity → интеграциясы әлсіз интерфейс (релаксация, микрожарықшалар) → дрейф ≈ 25 pm.

Ғылыми интерпретация: Бұл график вакуум және $-40...+80$ °C термоциклдер жағдайында FBG сенсорларының құрылыммен интеграция тұтастығы Bragg толқын ұзындығының жинақталған дрейфіне шешуші әсер ететінін көрсетеді. Сапалы интерфейс жағдайында 200 термоциклден кейін $\Delta\lambda B \approx 15$ pm деңгейінде шектелсе, адгезиясы әлсіз және механикалық сәйкессіздігі бар интерфейсте дрейф ≈ 25 pm-ге дейін өседі. Бұл нәтижелер интеграция сапасының ұзақмерзімді тұрақтылықты анықтайтын негізгі фактор екенін дәлелдеп нақты зерттеу жұмыстарында көрсетілген 15–25 pm эталондық диапазонымен сәйкес келеді.



6-сурет – «Интеграция тұтастығын кешенді бағалау әдісі»

Алынған нәтижелер FBG сенсорларының ғарыштық ортадағы ұзақмерзімді қолданылуының сенімділігі тек сенсордың өз қасиеттерімен шектелмей, оны қоршаған қаптама, құрылымға интеграциялау сапасы және өлшеу жүйесінің тұрақтылығы сияқты факторлардың бірлескен әсерімен анықталатынын көрсетуінде. Қаптамаға, орналастыру аймағына және интерфейс тұтастығына байланысты Bragg толқын ұзындығы дрейфінің сандық айырмашылықтары ұзақмерзімді мониторинг дәлдігін жүйелік деңгейде басқаруға болатынын дәлелдейді. Бұл нәтижелер ғарыштық SHM жүйелерін жобалауда интуитивті шешімдерден гөрі, көпфакторлы, дәлелді инженерлік тәсілге көшу қажеттігін негіздеп, сенсорлық жүйелердің қызмет мерзімін ұлғайтуға, өлшеу қателіктерін азайтуға және миссиялық тәуекелдерді төмендетуге бағытталған практикалық ғылыми негіз қалыптастырады.

Қорытынды

Бұл жұмыста FBG сенсорларының ғарыштық ортадағы ұзақмерзімді тұрақтылығын бағалауға арналған көпфакторлы кешенді әдістеме ұсынылды және тұрақтылықтың «сенсор–қаптама–құрылым–интеррогация» жүйесінің бірлескен әсерімен анықталатыны көрсетілді. Алынған нәтижелер Bragg толқын ұзындығының дрейфі қаптама технологиясына (≈ 20 – 50 pm), сенсор орналасуына (< 5 – 20 pm) және интеграция сапасына (≈ 15 – 25 pm)

тікелей тәуелді екенін сандық тұрғыда дәлелдеп, ұзақмерзімді өлшеу қателігінің негізгі көздерін айқындады. Ұсынылған әдістер FBG жүйелерінің сенімділігін жүйелік деңгейде бағалауға мүмкіндік беріп, ғарыштық SHM жүйелерін жобалауда қаптама таңдау, орналастыруды оңтайландыру және жүйелік дрейфті азайту үшін ғылыми негіз қалыптастырады. Болашақта әдістемені орбиталық сынақтармен валидациялау және radiation-hardening технологияларын дамыту негізгі бағыттар ретінде ұсынылады.

Қаржыландыру ақпараты

Мақала AP26197431 «Волоконды Брэгг торларын пайдалана отырып ғарыш инфрақұрылымындағы деформацияларды жоғары дәлдікпен бақылауға арналған конструкциялар мен технологияларды әзірлеу» жобасы бойынша жасалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Farrar, C. R. , Dervilis, N., Worden, K.** The Past, Present and Future of Structural Health Monitoring: An Overview of Three Ages Strain, 2025; 61:e12495. – <https://doi.org/10.1111/str.12495>
- 2 **Morozov, O. G.** Fiber Bragg Grating-Based Sensors and Systems // Sensors. – 2021. – 21. – 8225. – <https://doi.org/10.3390/s21248225>
- 3 **Pirich, R., Mazurowski, J.** Engineering of Fiber Optics Infrastructure, 978-1-4577-1343-9/12/\$26.00 ©2012 IEEE
- 4 **Kumari, M., Mishra, S. K.** Transmission of LG Modes in High-Capacity 16 × 10 Gbps FSO System Using FBG Sensors Under Different Channel Scenarios // Micromachines. – 2025. – 16. – 738. – <https://doi.org/10.3390/mi16070738>
- 5 **Deng, Y., Ren, W., Wang, X.** Scientometric Analysis and Research Trends in Optical Fiber Grating Sensors: A Review // Photonics. – 2025. – 12. – 349. – <https://doi.org/10.3390/photonics12040349>
- 6 **Kalizhanova, A., Kozbakova, A., Kunelbayev, M., Kartbayev, T., & Kashaganova, G.** Research on the Relative Displacement Distribution of a Composite Plate with Built-In FBG Sensors // Journal of Composites Science. – 9(5). – 198. – 2025. – <https://doi.org/10.3390/jcs9050198>
- 7 **Parka, Y., Kwona, H., Shrestha, P., Kim, C.** Investigation of LEO environment exposure monitoring potential using embedded FBG sensors // Proceedings Volume 10323, 25th International Conference on Optical Fiber Sensors; 103239E. – 2017. – <https://doi.org/10.1117/12.2267564>
- 8 **Wang, J., Tang, J.** Feasibility of Fiber Bragg Grating and Long-Period Fiber Grating Sensors under Different Environmental Conditions // Sensors. – 2010. – 10(11). – P. 10105–10127. – <https://doi.org/10.3390/s101110105>

- 9 **Kiesewetter, D., Krivosheev, S., Magazinov, S., Malyugin, V., Varzhel, S., Loseva, E., Koshkinbayev, S., Smailov, N. K.** Application of Fiber Bragg Gratings as a Sensor of Pulsed Mechanical Action // Sensors. – 2022. – 22. – 7289. – <https://doi.org/10.3390/s22197289>
- 10 **Tomsia, M., Cieřła, J., Śmieszek, J., Florek, S., Macionga, A., Michalczyk, K., Stygar, D.** Long-term space missions' effects on the human organism: what we do know and what requires further research // Front. Physiol., 13 February 2024, Sec. Environmental, Aviation and Space Physiology. – <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1284644>
- 11 **Mihailov, S. J.** Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments // Sensors 2012. – 12. – P. 1898–1918. – <https://doi.org/10.3390/s120201898>
- 12 **Keskin, M.Z., Yentur, A., Ozdur, I.** Dual Interferometric Interrogation for DFB Laser-Based Acoustic Sensing. Acoustic Sensing // Sensors. – 2025. – 25. – 2873. – <https://doi.org/10.3390/s25092873>
- 13 **Kinet, D., Męgret, P., Goossen, K.W., Qiu, L., Heider, D.** Caucheteur, C+. Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions // Sensors. – 2014. – 14. – P. 7394–7419. – <https://doi.org/10.3390/s140407394>
- 14 **Zhenghao Huan, Zh., Zheng, Z.Y., Wang, K., Shen, Z., Ni, W., Zua, J., Shao, Y.** Advancements in radiation resistance and reinforcement strategies of perovskite solar cells in space applications // Energy Environ. Sci., 2026. – <https://doi.org/10.1039/d3ta06388g>
- 15 **Morana, A., Marin, E.** Radiation Effects on Fiber Bragg Gratings : Vulnerability and Hardening Studies // Sensors. – 2022. – 22. – 8175. – <https://doi.org/10.3390/s22218175>
- 16 **Juwet, T., Luyckx, G., Lamberti, A., Creemers, F., Voet, E., Missinne, J.** Monitoring of Composite Structures for Re-Usable Space Applications Using FBGs: The Influence of Low Earth Orbit Conditions // Sensors. – 2024. – 24. – 306. – <https://doi.org/10.3390/s24010306>

16.01.26 ж. баспаға түсті.

26.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

10.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

С. Ж. Көшікбайев¹, А. К. Сейтханова², *Н. К. Смайлов³,
Қ. М. Ысырайыл⁴, А. Е. Куттыбаева⁵

^{1,3,4,5}Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

¹Университет Мирас, Республика Казахстан, г. Шымкент;

²Павлодарский педагогический университет имени Әлкей Марғұлан,
Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 16.01.26.

Поступило с исправлениями 26.01.26.

Принято в печать 10.02.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ FBG-СЕНСОРОВ В КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

В данной работе предложена многофакторная комплексная методика оценки долговременной стабильности и надёжности сенсоров Fiber Bragg Grating (FBG) в условиях космической среды. Исследование ориентировано на системный анализ влияния характерных для космоса факторов, таких как вакуум, широкий диапазон температурных колебаний, ионизирующее излучение и механические нагрузки, на точность измерений FBG-сенсоров, временной дрейф брэгговской длины волны и устойчивость коэффициентов чувствительности. Предложенный подход не ограничивается рассмотрением только физических принципов работы сенсора, а включает анализ его материальных характеристик, технологий защитной инкапсуляции, качества интеграции в конструкцию космического объекта, а также долговременной стабильности измерительно-интеррогационной цепи. Сравнительный анализ литературных источников и экспериментальных данных показывает, что надёжность FBG-сенсоров определяется не отдельными элементами системы, а совокупным взаимодействием компонентов в рамках системы «сенсор – инкапсуляция – конструкция – интеррогация», а также состоянием интерфейсов между ними. Количественные различия дрейфа брэгговской длины волны, обусловленные типом инкапсуляции, зоной размещения сенсора и качеством его интеграции, подтверждают возможность управления точностью долговременного мониторинга на системном уровне. Полученные результаты формируют научную основу для проектирования и оптимизации SHM-систем, предназначенных для контроля

структурного состояния космических конструкций, способствуют повышению надёжности сенсорных систем и снижению рисков, связанных с выполнением космических миссий.

Ключевые слова: FBG-сенсоры, космическая среда, технология инкапсуляции, долговременная стабильность, структурный мониторинг, длина волны Брэгга.

S. Zh. Koshkinbayev¹, A. K. Seytkhanova², *N. K. Smailov³,

K. M. Yssyraiyl⁴, A. E. Kuttybayeva⁵

^{1,3,4,5}Kazakh National Research Technical University after K. I. Satbayev,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

¹Miras university, Republic of Kazakhstan, Shymkent;

²Pavlodar Pedagogical University named after Alkey Margulan,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 16.01.26.

Received in revised form 26.01.26.

Accepted for publication 10.02.26.

STUDY OF THE LONG-TERM STABILITY OF FBG SENSORS IN THE SPACE ENVIRONMENT

In this work, a multifactor comprehensive methodology is proposed for assessing the long-term stability and reliability of Fiber Bragg Grating (FBG) sensors under space environment conditions. The study is focused on a systematic analysis of the influence of space-specific factors—such as vacuum, wide-range temperature fluctuations, ionizing radiation, and mechanical loads—on the measurement accuracy of FBG sensors, the temporal drift of the Bragg wavelength, and the stability of sensitivity coefficients. The proposed approach is not limited to the consideration of the sensor's physical operating principles alone but also incorporates an evaluation of its material properties, protective encapsulation technologies, the quality of integration into the space structure, and the long-term stability of the measurement and interrogation chain. A comparative analysis of literature data and experimental results demonstrates that the reliability of FBG sensors is determined not by individual system components, but by the combined interaction of elements within the “sensor–encapsulation–structure–interrogation” system, as well as by the condition of the interfaces between them. Quantitative differences in Bragg wavelength drift associated with the type of encapsulation, sensor placement zone, and integration quality confirm that long-term

monitoring accuracy can be controlled at the system level. The obtained results provide a scientific basis for the design and optimization of SHM systems intended for monitoring the structural health of space structures, contributing to enhanced sensor system reliability and reduced risks associated with space missions.

Keywords: FBG sensors, space environment, encapsulation technology, long-term stability, structural health monitoring, Bragg wavelength.

МРНТИ 29.19.25

<https://doi.org/10.48081/BGQF1892>

***М. М. Кубенова¹, М. Х. Балапанов², К. А. Кутербеков³,
Ж. А. Муханова⁴, А. Ж. Мукашева⁵**

^{1,3,4}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана;

²Уфимский университет науки и технологий, Российская Федерация, г. Уфа;

⁵Карагандинский национальный исследовательский университет имени Е. А. Букетова, Республика Казахстан, г. Караганда.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2012-2702>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7885-9462>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5421-271X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9148-5950>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2771-0411>

*e-mail: kubenova.m@yandex.kz

ИОННЫЙ ПЕРЕНОС И КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ $Li_xCu_{2-y}S$

В данной статье представлены экспериментальные результаты влияния литиевого легирования на концентрационную поляризацию и ионную проводимость нанокomпозитных сульфидов меди состава $Li_xCu_{2-y}S$ ($x = 0.09, 0.12, 0.16$) в температурном интервале 350–420 °С. Исследования проведены в условиях гальваностатического нагружения при токе 1 мА с использованием симметричных электрохимических ячеек $Cu/CuBr/Li_xCu_{2-y}S/CuBr/Cu$ с электронно-блокирующими электродами. Ионную проводимость сульфидов меди исследовали в режиме постоянного тока с применением слоев $CuBr$, выполняющих функцию ионно-селективных барьеров и подавляющих перенос электронных носителей заряда. В таких условиях электрический ток через образец обусловлен преимущественно миграцией ионов Cu^+ . Показано, что увеличение содержания лития приводит к снижению амплитуды концентрационной поляризации и сокращению времени установления стационарного режима, что связано с возрастанием ионной подвижности и перестройкой дефектной структуры

материала. Установлено наличие двух температурных режимов переноса для составов с $x = 0.12$ и 0.16 , указывающих на изменение механизма миграции ионов и формирование суперионного состояния. Показано, что в установившемся режиме перенос заряда носит преимущественно ионный характер. Экспериментальные результаты по ионной проводимости позволили установить влияние степени литиевого легирования на транспортные свойства материалов, определить температурные особенности ионного переноса и выявить составы с повышенной ионной подвижностью. Полученные результаты позволяют определить оптимальные составы и условия работы сульфидов меди системы Li-Cu-S как высокотемпературных ионпроводящих материалов для твердотельных электрохимических устройств.

Ключевые слова: синтез, халькогениды меди, термоэлектрические материалы, ионная проводимость, концентрационная поляризация, энергия активации.

Введение

В последние годы ионно-проводящие сульфидные соединения меди, модифицированные щелочными металлами, привлекают значительное внимание в связи с их перспективным применением в высокотемпературных электрохимических источниках тока, сенсорных системах и твердотельных электрохимических устройствах. Особый интерес представляют нестехиометрические сульфиды меди, легированные литием, поскольку введение ионов Li^+ позволяет целенаправленно управлять дефектной структурой, ионной подвижностью и электрохимическими характеристиками материала [1; 2; 3].

Одним из ключевых факторов, ограничивающих эффективность подобных электрохимических систем, является концентрационная поляризация, возникающая при протекании тока вследствие неравновесного перераспределения подвижных ионов вблизи границ электрод – электролит. В условиях повышенных температур концентрационная поляризация оказывает существенное влияние на величину перенапряжения, стабильность рабочих характеристик и долговременную надежность электрохимических ячеек [4; 5; 6]. Несмотря на значительное число исследований, посвящённых общей ионной проводимости и термодинамическим свойствам сульфидов меди, влияние концентрационной поляризации на электрохимическое поведение литий-модифицированных фаз остаётся изученным недостаточно.

Особый интерес представляет анализ концентрационной поляризации в симметричных и квазисимметричных ячейках с блокирующими электродами,

позволяющий разделить вклад ионного переноса и диффузионных процессов в общее электрохимическое сопротивление. Использование ячеек типа Cu/CuBr/Li_xCu_{2-y}S/CuBr/Cu обеспечивает формирование стабильных межфазных слоёв и высокую воспроизводимость результатов при исследовании поляризационных эффектов в широком температурном интервале [7].

В настоящей работе представлены результаты исследования концентрационной поляризации образцов $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$, $\text{Li}_{0.12}\text{Cu}_{1.80}\text{S}$, $\text{Li}_{0.16}\text{Cu}_{1.75}\text{S}$ при фиксированном токе 1 мА в диапазоне температур 350–420 °С. Ранее показано, что в системе $\text{Li}_x\text{Cu}_{2-y}\text{S}$ изменение содержания лития приводит к существенным вариациям ионной проводимости и коэффициентов химической диффузии [8]. Установлено, что рост концентрации Li сопровождается перераспределением катионных вакансий, что определяет как абсолютные значения проводимости, так и характер ее температурной зависимости. Полученные значения коэффициентов диффузии соответствуют диапазону, характерному для суперионных сульфидных соединений меди, и могут служить количественной основой для анализа концентрационной поляризации, обусловленной перераспределением подвижных ионов вблизи электродных границ.

Кинетические особенности поляризационных процессов в твердотельных электрохимических системах подробно рассмотрены в работе, посвященной гальваностатическому и потенциостатическому режимам нагружения [9]. Показано, что при протекании тока на границе металл – твердый электролит формируются переходные слои с пониженной эффективной проводимостью, существенно влияющие на динамику установления стационарного состояния. Анализ переходных зависимостей напряжения позволяет выделить вклад диффузионных процессов и определить эффективные параметры массопереноса, что методически близко к условиям настоящего исследования.

Фундаментальные основы анализа поляризационных эффектов в твердых электролитах были заложены в рамках подхода Хебба-Вагнера [10], в котором показано, что при определённых токовых режимах перенос заряда становится диффузионно-ограниченным, что отражается в характерной форме поляризационных зависимостей. При этом подчёркивается необходимость учёта интерфейсных процессов и свойств промежуточных слоёв, что особенно важно для систем, содержащих CuBr, способный вносить дополнительный вклад в общее перенапряжение.

Ранее показано, что микроструктурные факторы и дефектная структура играют существенную роль в формировании концентрационной поляризации [11; 12; 13].

Плотность образцов, состояние межфазных контактов и распределение вакансий оказывают решающее влияние на неравновесное распределение

ионов при протекании тока, особенно в условиях высоких температур. Изменение степени литиевого легирования в системе Li-Cu-S сопровождается перестройкой дефектной подсистемы, что одновременно влияет на ионную проводимость и склонность материала к развитию концентрационной поляризации.

Таким образом, анализ литературных данных и полученных экспериментальных результатов показывает, что концентрационная поляризация в литий-модифицированных сульфидах меди определяется совокупным влиянием состава, дефектной структуры и температуры. Недостаточная изученность влияния степени литиевого легирования на кинетику поляризационных процессов в условиях фиксированного тока подчеркивает актуальность и научную значимость настоящего исследования в контексте разработки высокотемпературных твёрдотельных электрохимических систем.

Материалы и методы

Образцы состава $Li_{0.09}Cu_{1.82}S$, $Li_{0.12}Cu_{1.80}S$, $Li_{0.16}Cu_{1.75}S$ были синтезированы методом высокощелочного расплавного синтеза в системе NaOH–KOH. Синтез проводили в тefлоновом реакторе, усиленном металлическим кожухом, при температуре плавления щелочного расплава (~165 °C) в инертной атмосфере аргона. Рассчитанные количества исходных реагентов, включая соединения меди, серы и лития, одновременно вводили в расплав гидроксидов. После загрузки реакционной смеси реактор герметизировали и поддерживали слабый поток аргона над поверхностью расплава. Формирование нанокристаллических фаз $Li_xCu_{2-y}S$ осуществлялось при выдержке в течение 15 ч. Для регулирования размеров нанокристаллитов в расплав добавляли малые количества воды.

После завершения реакции порошок извлекали из расплава, многократно промывали нагретой дистиллированной водой и этанолом и сушили при комнатной температуре. Дополнительная термическая обработка при температуре не ниже 400 °C применялась для снижения содержания летучих примесей и повышения воспроизводимости транспортных характеристик. Основная часть полученного порошка имеет размеры частиц от 15 до 90 нм. Чтобы выделить отдельные фракции частиц по размерам, применяется метод седиментации в колонне со спиртом.

Ионную проводимость сульфидов меди исследовали в режиме постоянного тока с применением слоёв CuBr, выполняющих функцию ионно-селективных барьеров и подавляющих перенос электронных носителей заряда. В таких условиях электрический ток через образец обусловлен преимущественно миграцией ионов Cu^+ . Температурная зависимость ионной проводимости описывается экспоненциальным законом Аррениуса:

$$\sigma_i T = \sigma_{i0} \exp(-E_a / kT) \quad (1)$$

где (σ_i) – ионная проводимость, (E_a) – энергия активации переноса, (k) – постоянная Больцмана, (T) – абсолютная температура.

Измерения выполнялись в электрохимической ячейке симметричного типа:



Ионная разность потенциалов ΔU регистрировалась между двумя зондами состава CuBr/Cu, размещёнными на одной из боковых поверхностей образца на расстоянии 1 см друг от друга (рис. 1). Значения ионной проводимости определяли по установившимся стационарным значениям U_{ii} в соответствии с выражением:

$$\sigma_i = \frac{IL}{S\Delta U_i} \quad (2)$$

где (I) – величина приложенного тока, (L) – расстояние между зондами, (S) – площадь поперечного сечения образца.

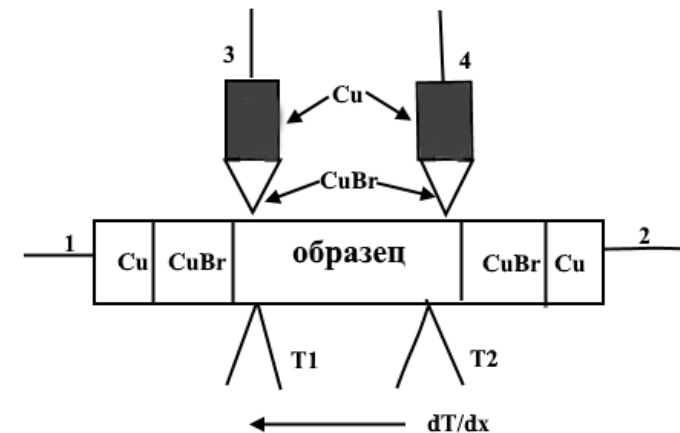


Рисунок 1 – Схематическое изображение электрохимической ячейки, используемой для измерения ионной проводимости и ионной термо-ЭДС

Форма временной зависимости ионной разности потенциалов определяется развитием концентрационной поляризации в объеме материала. В начальный момент после подачи тока перенос заряда осуществляется одновременно ионами меди и электронными дырками, что соответствует минимальному эффективному сопротивлению образца.

По мере протекания тока электронные дырки накапливаются вблизи катодной границы вследствие их блокирования на интерфейсе с CuBr. Возникающий градиент концентрации приводит к формированию диффузионного потока дырок, направленного навстречу их дрейфовому движению. В результате суммарный поток электронных носителей постепенно уменьшается, что сопровождается ростом сопротивления образца и увеличением ионной разности потенциалов.

Увеличение концентрационной поляризации продолжается до достижения стационарного состояния, при котором диффузионный и дрейфовый потоки дырок взаимно компенсируются. На кривых концентрационной поляризации этому состоянию соответствует область насыщения. В данной области вклад электронных носителей в перенос заряда отсутствует, и электрический ток обусловлен исключительно миграцией ионов Cu^+ .

После отключения внешнего источника тока омическая составляющая разности потенциалов исчезает, однако в образце сохраняется внутреннее электрическое поле, связанное с остаточным неравновесным распределением электронных дырок и сопряженным с ним градиентом концентрации катионов. Наличие этого поля приводит к протеканию слабого диффузионного тока даже при отсутствии внешнего напряжения.

Спад концентрационной поляризации описывается соотношением

$$U_{ii}(t) = U_{ii}(0) \exp(-\pi^2 \tilde{D} t / L^2), \quad (3)$$

где \tilde{D} – коэффициент сопряженной химической диффузии катионов и дырок, U_{ii} – концентрационная поляризация

Результаты и обсуждение

В настоящем разделе проведен анализ экспериментальных данных, направленный на установление закономерностей ионного переноса и формирования концентрационной поляризации в твердых образцах $\text{Li}_x\text{Cu}_{2-y}\text{S}$ ($x = 0.09, 0.12$ и 0.16). Для халькогенидов меди характерны исключительно высокие значения ионной проводимости, которые сохраняются при изменении катионного состава и слабо зависят от степени замещения. Такое поведение обычно связывают с сильно разупорядоченным состоянием катионной подрешетки, обладающей свойствами, близкими к динамически неупорядоченной («расплавленной») системе. На рисунках

2-4 приведены кривые концентрационной поляризации образцов $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$, $\text{Li}_{0.12}\text{Cu}_{1.80}\text{S}$, $\text{Li}_{0.16}\text{Cu}_{1.75}\text{S}$ в ячейках типа Cu/CuBr/ $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$ /CuBr/Cu/, также полученные при токе 1 мА и температурах 350–420 °С. Для всех составов при включении тока наблюдается быстрый рост ионной разности потенциалов, обусловленный начальным вкладом электронных дырок и ионов Cu^+ в перенос заряда. Дальнейшая эволюция кривых определяется развитием концентрационной поляризации, связанной с накоплением дырок у межфазных границ CuBr и формированием встречных диффузионных потоков. Установление плато на кривых соответствует переходу в диффузионно-ограниченный режим, в котором ток переносится преимущественно ионами Cu^+ .

На рисунке 2 приведены измерены кривые концентрационной поляризации для образца $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$ в интервале температур 350–420 °С при постоянном токе 1 мА. Во всех температурных режимах после включения тока наблюдается быстрый рост поляризационного напряжения (U_{ii}), что указывает на формирование градиентов концентрации подвижных ионов Li^+ , типичное для смешанных ионно-электронных проводников [14].

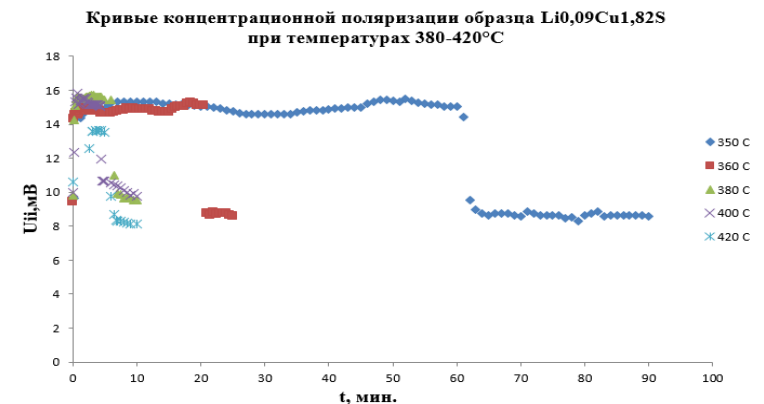


Рисунок 2 – Кривые концентрационной поляризации образца $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$ при температурах 350 – 420 °С при ионном токе 1 мА

При 350–360 °С установившиеся значения U_{ii} достигают 14–16 мВ и сохраняются в течение длительного времени, что также свидетельствует о заметном вкладе концентрационной поляризации. При повышении температуры до 380 °С поляризационное напряжение (U_{ii}) снижается до ~10–11 мВ, тогда как при 400–420 °С (U_{ii}) уменьшается до 8–9 мВ и время выхода на стационарный режим сокращается.

Сразу после включения тока при всех исследованных температурах наблюдается быстрый рост (U_{ii}), свидетельствующий о формировании градиентов концентрации лития. Данная начальная стадия соответствует неравновесному перераспределению ионов Li^+ под действием электрического поля, ограниченному их диффузионной подвижностью [15].

Кривые концентрационной поляризации образца $Li_{0.12}Cu_{1.80}S$ (рисунок 3), измеренные в интервале температур 350–420 °С при постоянном ионном токе 1 мА, демонстрируют типичное для смешанных ионно-электронных проводников поведение с формированием квазистационарного поляризованного напряжения. При температурах 350–360 °С установившиеся значения (U_{ii}) составляют 14–15 мВ, что несколько ниже, чем для состава $Li_{0.09}Cu_{1.82}S$, где при тех же условиях наблюдаются значения до 16 мВ. Это указывает на ослабление концентрационной поляризации при увеличении содержания лития в решетке.

При повышении температуры до 380 °С для $Li_{0.12}Cu_{1.80}S$ отмечается умеренное снижение поляризованного напряжения до 10–11 мВ, тогда как для $Li_{0.09}Cu_{1.82}S$ спад U_{ii} выражен сильнее и сопровождается более заметной нестабильностью в начальной стадии поляризации.

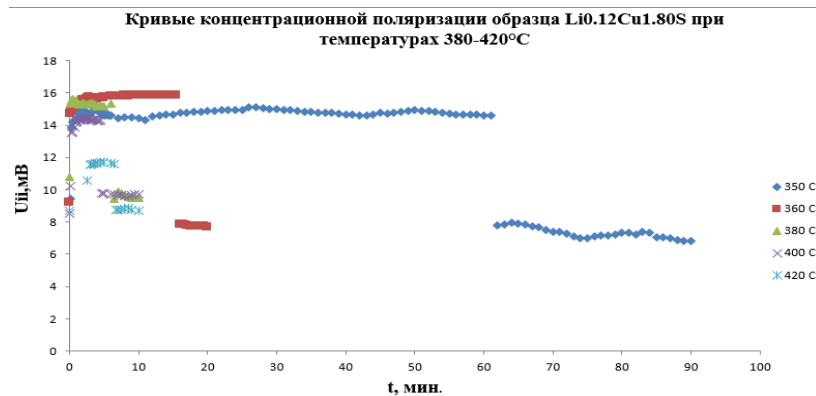


Рисунок 3 – Кривые концентрационной поляризации образца $Li_{0.12}Cu_{1.80}S$, при температурах 350 – 420 °С при ионном токе 1 мА

В области 400–420 °С установившиеся значения (U_{ii}) для состава $Li_{0.12}Cu_{1.80}S$ находятся в диапазоне 7–9 мВ, что также ниже соответствующих значений для менее легированного литийсодержащего образца. Кроме того, для $Li_{0.12}Cu_{1.80}S$ наблюдается более быстрое установление стационарного режима, что свидетельствует о более эффективной релаксации концентрационных неоднородностей. При увеличении параметра x до 0.12

и выше возрастает связность ионных путей переноса, что способствует ускоренной релаксации концентрационных градиентов и снижению величины концентрационной поляризации.

Как видно из рисунка 4, временные зависимости поляризованного напряжения для состава $Li_{0.16}Cu_{1.75}S$, полученные при температурах 350–420 °С и ионном токе 1 мА, характеризуются сравнительно малой амплитудой концентрационной поляризации. В температурной области 350–360 °С установившиеся значения U_{ii} находятся в пределах 10–12 мВ, что указывает на ослабление диффузионных ограничений по сравнению с менее легированными образцами системы $Li_xCu_{2-y}S$. При повышении температуры до 380 °С наблюдается дальнейшее снижение поляризованного напряжения до 7–9 мВ, сопровождающееся сокращением времени выхода на квазистационарный режим. В диапазоне 400–420 °С величина (U_{ii}) уменьшается до 5–7 мВ, а кривые приобретают устойчивый и воспроизводимый характер без выраженных флуктуаций.

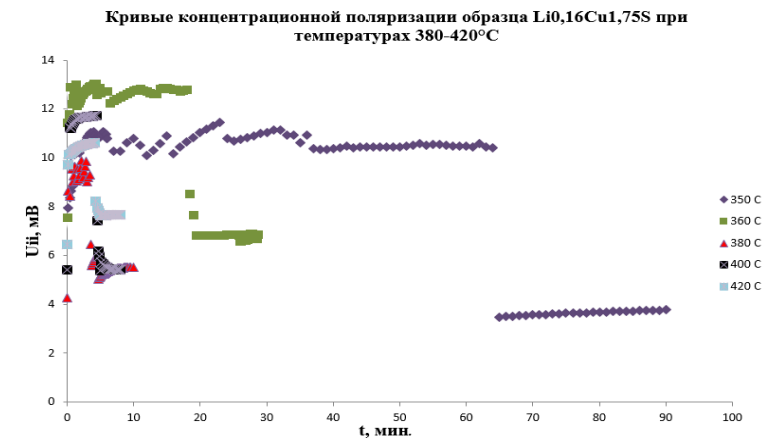


Рисунок 4 – Кривые концентрационной поляризации образца $Li_{0.16}Cu_{1.75}S$ при температурах 350 – 420 °С при ионном токе 1 мА

Измерения концентрационной поляризации были выполнены с целью выявления диффузионных ограничений и оценки подвижности ионов лития, которые напрямую определяют величину и температурное поведение ионной проводимости. Уменьшение амплитуды концентрационной поляризации и сокращение времени релаксации свидетельствуют о росте ионной подвижности и снижении энергетических барьеров переноса. Такие

изменения должны сопровождаться увеличением ионной проводимости и изменением ее активационных параметров [16; 17].

На рисунках 5–7 приведены температурные зависимости ионной проводимости образцов $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$, $\text{Li}_{0.12}\text{Cu}_{1.80}\text{S}$, $\text{Li}_{0.16}\text{Cu}_{1.75}\text{S}$, полученные на токе 1 мА при температурах 350–420 °С.

На рисунке 5 показана температурная зависимость ионной проводимости образца $\text{Li}_{0.12}\text{Cu}_{1.80}\text{S}$, представленная в линейных координатах (а) и в полулогарифмическом виде $\ln\sigma_i$ / T (б). В интервале 350–420 °С ионная проводимость возрастает от ~1.02 См·см⁻¹ до 2.2–2.28 См·см⁻¹, что указывает на термически активируемый характер переноса ионов Li^+ . Полулогарифмические зависимости описываются аррениусовским законом и выявляют два линейных участка с различными наклонами характеризуется коэффициентом корреляции.

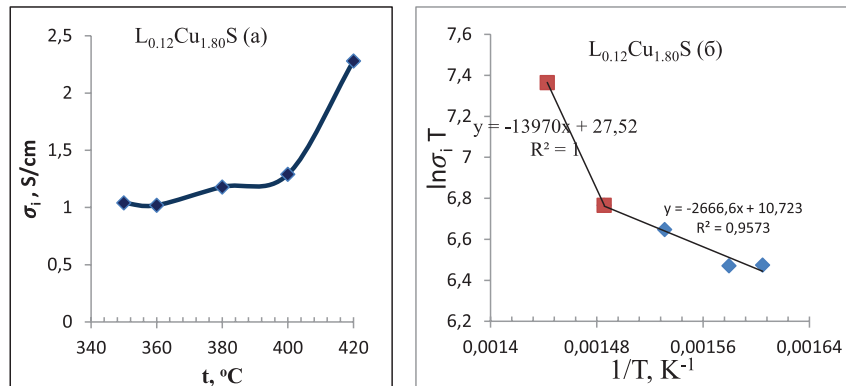


Рисунок 5 – Температурная зависимость ионной проводимости образца $\text{Li}_{0.12}\text{Cu}_{1.80}\text{S}$ представленная в (а) в обычных координатах; (б) в полулогарифмических координатах

Энергия активации переноса составляет 0.12 эВ в низкотемпературной области ($R^2=1.00$) и возрастает до 0.23 эВ при повышении температуры ($R^2=0.957$). Наличие двух активационных режимов свидетельствует об изменении механизма ионного переноса, что характерно для смешанных ионно-электронных проводников с развитой дефектной структурой.

На рисунке 6 приведены температурные зависимости ионной проводимости образца $\text{Li}_{0.16}\text{Cu}_{1.75}\text{S}$, представленные в координатах $\sigma_i(T)$ и $\ln\sigma_i$ / T (б). В диапазоне 350–420 °С величина ионной проводимости изменяется от ~1.04 См·см⁻¹ при 350 °С до 1.6–1.68 См·см⁻¹ при 420 °С. Энергия активации равна 0.09 и 0.25 эВ; аппроксимации характеризуются

коэффициентами корреляции $R_2=1.00$ и $R_2=0.891$ для низкотемпературного и высокотемпературного режимов переноса. Такое увеличение ионной проводимости характерно для суперионных проводников и может быть связано с перестройкой дефектной подсистемы и изменением эффективных путей ионного переноса, что согласуется с данными обзоров по суперионным материалам, в которых подчёркивается ключевая роль кристаллической подрешётки и дефектов в формировании подвижности ионов и энергии активации процесса переноса [18].

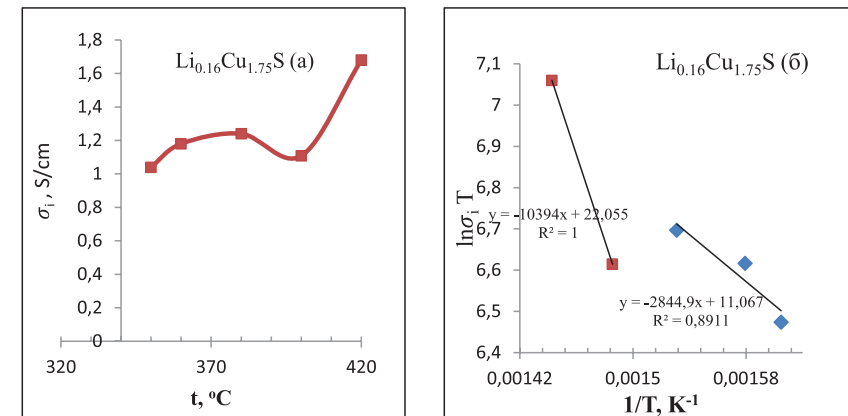


Рисунок 6 – Температурная зависимость ионной проводимости образца $\text{Li}_{0.16}\text{Cu}_{1.75}\text{S}$ представленная в (а) в обычных координатах; (б) в полулогарифмических координатах

На рисунке 7 представлена температурная зависимость ионной проводимости образца $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$, полученная в диапазоне 350–420 °С. При повышении температуры величина ионной проводимости возрастает от 1.02 См·см⁻¹ до 1.146 См·см⁻¹, демонстрируя умеренный рост по сравнению с образцами $\text{Li}_{0.12}\text{Cu}_{1.80}\text{S}$ и $\text{Li}_{0.16}\text{Cu}_{1.75}\text{S}$, характеризующимися более высоким содержанием лития. Зависимость логарифмических координатах аппроксимируется одной линейной функцией с высоким коэффициентом корреляции ($R^2=0.988$), что указывает на сохранение единого механизма ионного переноса во всем исследованном интервале температур. Энергия активации, определенная из наклона аррениусовской зависимости, составляет около 0.12 эВ, что свидетельствует о наличии диффузионных ограничений при пониженной концентрации подвижных ионов Li^+ . Полученные результаты согласуются с данными концентрационной поляризации и отражают менее связанную ионную подсистему в составе $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$.

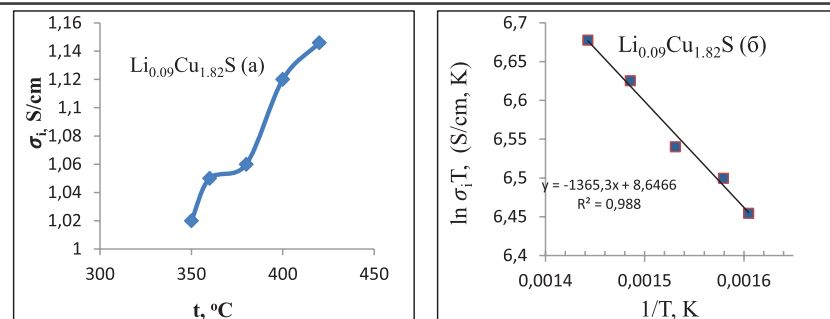


Рисунок 7 – Температурная зависимость ионной проводимости образца $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$ представленная в (а) в обычных координатах; (б) в полулогарифмических координатах

Для сульфида и селенида меди, замещенного натрием, ионная проводимость на порядок ниже, чем в чистом селениде меди. Зависимость ионной проводимости от размера зерен в этих материалах обратная, по сравнению с селенидом меди – с увеличением размера зерна ионная проводимость в них снижается, что свидетельствует о преобладании зернограницной диффузии над диффузией по объему зерен [19].

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23490700).

Выводы

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что выявленные закономерности ионной проводимости в системе $\text{Li}_x\text{Cu}_{2-y}\text{S}$ ($x = 0.09, 0.12$ и 0.16) соответствуют общепринятым механизмам быстрого ионного переноса. Для образцов $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$, $\text{Li}_{0.12}\text{Cu}_{1.80}\text{S}$, $\text{Li}_{0.16}\text{Cu}_{1.75}\text{S}$ в температурном интервале 350–420 °C экспериментально зафиксированы значения ионной проводимости в диапазоне 1.0–1.15 $\text{См}\cdot\text{см}^{-1}$, 2.2–2.28 $\text{См}\cdot\text{см}^{-1}$ и 1.6–1.68 $\text{См}\cdot\text{см}^{-1}$ соответственно. Энергии активации ионного переноса составляют 0.09–0.25 эВ, что характерно для суперионных материалов с высокой подвижностью катионов. Показано, что такие транспортные параметры формируются за счет динамики дефектов и катионных вакансий в частично разупорядоченной подрешетке, что согласуется с данными литературы по суперионным халькогенидам меди [20].

Наличие двух активационных режимов для составов $\text{Li}_{0.12}\text{Cu}_{1.80}\text{S}$, $\text{Li}_{0.16}\text{Cu}_{1.75}\text{S}$ означает, что при нагреве меняются условия движения ионов лития, то есть, от переноса по существующим ионным путям к переносу, сопровождающемуся перестройкой дефектов кристаллической решетки.

Для состава $\text{Li}_{0.09}\text{Cu}_{1.82}\text{S}$ такой переход не наблюдается, что указывает на сниженную подвижность ионов Li^+ и более жесткие диффузионные ограничения. Таким образом, изменение содержания лития позволяет целенаправленно управлять механизмом ионного переноса в системе LiCuS , что соответствует общепринятым представлениям о механизмах ионного переноса в суперионных халькогенидах меди.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ai, S., Wu, X., Wang, J., Li, X., Hao, X., Meng, Y. Research progress on solid-state electrolytes in solid-state lithium batteries: classification, ionic conductive mechanism, interfacial challenges // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14(22). – P. 1773. – <https://doi.org/10.3390/nano14221773>
- 2 Wang, S., La Monaca, A., Demopoulos, G. P. Composite solid-state electrolytes for all solid-state lithium batteries: progress, challenges and outlook // *Energy Advances*. – 2025. – Vol. 4. – P. 11–36. – <https://doi.org/10.1039/D4YA00542B>
- 3 Stolz, L. et al. Single-ion versus dual-ion conducting electrolytes: suppressing concentration polarization in solid polymer electrolytes // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2022. – Vol. 14(9) – P. 11559–11566. – <https://doi.org/10.1021/acsami.2c00084>
- 4 Bachman, J. C., Mui, S., Grimaud, A., Chang, H.-H., Pour, N., Lux, S. F., Paschos, O., Maglia, F., Lupart, S., Lamp, P., Giordano, L. Inorganic solid-state electrolytes for lithium batteries: mechanisms and properties governing ion conduction // *Energy & Environmental Science*. – 2016. – Vol. 11(1). – P. 140–62. – <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00563>
- 5 Mehmedović, Z., Wei, V., Grieder, A., Shea, P., Wood, B. Impacts of vacancy-induced polarization and distortion on ionic transport in solid electrolytes Li_3OCl // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2021. – Vol. 379(2211). Article 20190459. – <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0459>
- 6 Jun, K. J., Chen, Y., Wei, G., Yang, X., Cede, G. Diffusion mechanisms of fast lithium-ion conductors: fundamentals and materials design – 2024. – Vol. 9. – P. 887–905. – <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00715-9>
- 7 Lotsch, B. V., Maier, J. Relevance of solid electrolytes for lithium-based batteries: a realistic view // *Journal of Electroceramics*. – 2017. – Vol. 38. – P. 128–141. – <https://doi.org/10.1007/s10832-017-0091-0>
- 8 Balapanov, M. Kh., Gafurov, I. G., Mukhamed'yanov, U. Kh., Yakshibaev, R. A., Ishembetov, R. Kh. Ionic conductivity and chemical diffusion in superionic $\text{Li}_x\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ ($0 \leq x \leq 0.25$) // *Phys. Status Solidi B*. – 2004. – Vol. 241(1). – P. 114–119. – <https://doi.org/10.1002/pssb.200301911>

9 **Ostapenko, G. I.** Galvanostatic investigation of electrochemical processes at the C/RbCu₄Cl₃I₂ interface // J. Solid State Electrochem. – 2001. – Vol. 5(8). – P. 550–552. – <https://doi.org/10.1007/s100080000168>

10 **Wagner, C.** The thermoelectric power of cells with ionic compounds involving ionic and electronic conduction // Prog. Solid State Chem. – 1975. – Vol. 10. – P. 3–16.

11 **Ишембетов, Р. Х., Юлаева, Ю. Х., Балапанов, М. Х., Шарипов, Т. И., Якшибаев, Р. А.** Электрофизические свойства наноструктурированного селенида меди (Cu_{1,9}Li_{0,1}Se) // Перспективные материалы. – 2011. – Т. 12. – С. 55–59.

12 **Reddy, M. V., Mauger, A., Julien, C. M., Zaghbi, K.** Sulfide and oxide inorganic solid electrolytes for all-solid-state lithium batteries // Chem. Rev. – 2020. – Vol. 120(14). – P. 6820–6877. – <https://doi.org/10.3390/nano10081606>

13 **Ishikawa, I., Miyatani, S.** Electronic and Ionic Conduction in Cu_{2-δ}Se, Cu_{2-δ}S and Cu_{2-δ}(Se, S) // J. Phys. Soc. Japan. – 1977. – Vol. 42(1). – P. 159-167.

14 **Balapanov, M. Kh., Bikkulova, N. N., Mukhamedyanov, U. Kh., Asilguschina, G. N., Musalimov, R. Sh., Zeleev, M. Kh.** Phase transitions and transport phenomena in Li_{0,25}Cu_{1,75}Se superionic compound // Phys. Stat. Sol. (b). – 2004. – Vol. 241, №. 15. – P. 3517–3524.

15 **Березин, В. М., Вяткин, Г. П.** Суперинионные полупроводниковые халькогениды. – Челябинск.: Изд. Ю.УрГУ, 2001. – 135 с.

16 **Balapanov, M. Kh., Ishembetov, R. Kh., Kuterbekov, K. A., Kubenova, M. M., Almukhametov, R. F., Yakshibaev, R. A.** Transport phenomena in superionic Na x Cu_{2-x}S (x = 0.05; 0.1; 0.15; 0.2) // Ionics. – 2018. – Vol. 24 (5). – P. 1349–1356. – <https://doi.org/10.1007/s11581-017-2299-z>

17 **Ohno, S., Banik, A., Dewald, G.F., Kraft, M.A., Krauskopf, T., Minafra, N., Till, P., Weiss, M., Zeier, W. G.** Materials design of ionic conductors for solid state batteries // Prog.Energy.– 2020. – Vol. 2. – P. 022001.

18 **Iokota, I.** On the Theory of Mixed Conduction with Special Reference to the Conduction in Silver Sulfide Group Semiconductors // J. Phys. Soc. Japan. – 1961. – Vol. 16. – N. 11. – P. 2213–2220.

19 **Kuterbekov, K. A., Balapanov, M. Kh., Kubenova, M. M., Ishembetov, R. Kh., Zeleev, M. Kh., Yakshibaev, R. A., Kabyshev, A. M., Alina, R. A., Bekmyrza, K. Zh., Baikhozhaeva, B. U., Abseitov, E. T., Taimuratova, L. U.** Chemical diffusion and ionic conductivity in nonstoichiometric nanocrystalline superionic Na_xCu_{1,75}S (x = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25) materials // Ionics. – 2022. – Vol. 28. – P. 4311–4319. – <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04651-y>

20 **Kubenova, M. M., Balapanov, M. K., Kuterbekov, K. A., Ishembetov, R. K., Bekmyrza, K. Z., Kabyshev, A. M.** Some Thermoelectric Phenomena in Copper

Chalcogenides Re-placed by Lithium and Sodium Alkaline Metals // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11(9). – P. 2238. – <https://doi.org/10.3390/nano11092238>

REFERENCES

1 **Ai, S., Wu, X., Wang, J., Li, X., Hao, X., Meng, Y.** Research progress on solid-state electrolytes in solid-state lithium batteries: classification, ionic conductive mechanism, interfacial challenges // Nanomaterials. – 2024. – Vol. 14(22). – P. 1773. – <https://doi.org/10.3390/nano14221773>

2 **Wang, S., La Monaca, A., Demopoulos, G. P.** Composite solid-state electrolytes for all solid-state lithium batteries: progress, challenges and outlook // Energy Advances. – 2025. – Vol. 4. – P. 11–36. – <https://doi.org/10.1039/D4YA00542B>

3 **Stolz, L. et al.** Single-ion versus dual-ion conducting electrolytes: suppressing concentration polarization in solid polymer electrolytes // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2022. – Vol. 14(9)–P. 11559–11566. – <https://doi.org/10.1021/acsami.2c00084>

4 **Bachman, J. C., Mui, S., Grimaud, A., Chang, H.-H., Pour, N., Lux, S. F., Paschos, O., Maglia, F., Lupart, S., Lamp, P., Giordano, L.** Inorganic solid-state electrolytes for lithium batteries: mechanisms and properties governing ion conduction // Energy & Environmental Science. – 2016. – Vol. 11(6). – P. 140–62. – <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00563>

5 **Mehmedović, Z., Wei, V., Grieder, A., Shea, P., Wood, B.** Impacts of vacancy-induced polarization and distortion on ionic transport in solid electrolytes Li₃OCl // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2021. – Vol. 379(2211). Article 20190459. – <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0459>

6 **Jun, K. J., Chen, Y., Wei, G., Yang, X., Cede, G.** Diffusion mechanisms of fast lithium-ion conductors: fundamentals and materials design – 2024. – Vol. 9. – P. 887–905. – <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00715-9>

7 **Lotsch, B. V., Maier, J.** Relevance of solid electrolytes for lithium-based batteries: a realistic view // Journal of Electroceramics. – 2017. – Vol. 38. – P. 128–141. – <https://doi.org/10.1007/s10832-017-0091-0>

8 **Balapanov, M. Kh., Gafurov, I. G., Mukhamed'yanov, U. Kh., Yakshibaev, R. A., Ishembetov, R. Kh.** Ionic conductivity and chemical diffusion in superionic Li_xCu_{2-x}S (0 ≤ x ≤ 0.25) // Phys. Status Solidi B. – 2004. – Vol. 241(1). – P. 114–119. – <https://doi.org/10.1002/pssb.200301911>

9 **Ostapenko, G. I.** Galvanostatic investigation of electrochemical processes at the C/RbCu₄Cl₃I₂ interface // J. Solid State Electrochem. – 2001. – Vol. 5(8). – P. 550–552. – <https://doi.org/10.1007/s100080000168>

10 **Wagner, C.** The thermoelectric power of cells with ionic compounds involving ionic and electronic conduction // Prog. Solid State Chem. – 1975. – Vol. 10. – P. 3–16.

11 **Ishembetov, R. Kh., Yulaeva, Yu. Kh., Balapanov, M. Kh., Sharipov, T. I., Yakshibaev, R. A.** Elektrofizicheskie svoystva nanostrukturirovannogo selenida medi ($\text{Cu}_{1.9}\text{Li}_{0.1}\text{Se}$) [Electrophysical properties of nanostructured copper selenide ($\text{Cu}_{1.9}\text{Li}_{0.1}\text{Se}$)] // [Perspektivnye materialy]. – 2011. – Vol. 12. – P. 55–59.

12 **Reddy, M. V., Mauger, A., Julien, C. M., Zaghib, K.** Sulfide and oxide inorganic solid electrolytes for all-solid-state lithium batteries // Chem. Rev. – 2020. – Vol. 120(14). – P. 6820–6877. – <https://doi.org/10.3390/nano10081606>

13 **Ishikawa, I., Miyatani, S.** Electronic and Ionic Conduction in Cu_{2-8}Se , Cu_{2-8}S and $\text{Cu}_{2-8}(\text{Se}, \text{S})$ // J. Phys. Soc. Japan. – 1977. – Vol. 42(1). – P. 159–167.

14 **Balapanov, M. Kh., Bikkulova, N. N., Mukhamedyanov, U. Kh., Asilguschina, G. N., Musalimov, R. Sh., Zeleev, M. Kh.** Phase transitions and transport phenomena in $\text{Li}_{0.25}\text{Cu}_{1.75}\text{Se}$ superionic compound // Phys. Stat. Sol. (b). – 2004. – Vol. 241, №. 15. – P. 3517–3524.

15 **Berezin, V. M., Vyatkin, G. P.** Superionnye poluprovodnikovye khal'kogenidy [Superionic semiconducting chalcogenides]. – Chelyabinsk, South Ural State University Publishing House: 2001. – 135 p.

16 **Balapanov, M. Kh., Ishembetov, R. Kh., Kuterbekov, K. A., Kubenova, M. M., Almukhametov, R. F., Yakshibaev, R. A.** Transport phenomena in superionic $\text{Na}_x\text{Cu}_{2-x}\text{S}$ ($x = 0.05; 0.1; 0.15; 0.2$) // Ionics. – 2018. – Vol. 24 (5). – P. 1349–1356. – <https://doi.org/10.1007/s11581-017-2299-z>

17 **Ohno, S., Banik, A., Dewald, G.F., Kraft, M.A., Krauskopf, T., Minafra, N., Till, P., Weiss, M., Zeier, W. G.** Materials design of ionic conductors for solid state batteries // Prog. Energy. – 2020. – Vol. 2. – P. 022001.

18 **Iokota, I.** On the Theory of Mixed Conduction with Special Reference to the Conduction in Silver Sulfide Group Semiconductors // J. Phys. Soc. Japan. – 1961. – Vol. 16. – N. 11. – P. 2213–2220.

19 **Kuterbekov, K. A., Balapanov, M. Kh., Kubenova, M. M., Ishembetov, R. Kh., Zeleev, M. Kh., Yakshibaev, R. A., Kabyshev, A. M., Alina, R. A., Bekmyrza, K. Zh., Baikhozhaeva, B. U., Abseitov, E. T., Taimuratova, L. U.** Chemical diffusion and ionic conductivity in nonstoichiometric nanocrystalline superionic $\text{Na}_x\text{Cu}_{1.75}\text{S}$ ($x = 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$) materials // Ionics. – 2022. – Vol. 28. – P. 4311–4319. – <https://doi.org/10.1007/s11581-022-04651-y>

20 **Kubenova, M. M., Balapanov, M. K., Kuterbekov, K. A., Ishembetov, R. K., Bekmyrza, K. Z., Kabyshev, A. M.** Some Thermoelectric Phenomena in Copper Chalcogenides Re-placed by Lithium and Sodium Alkaline Metals // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11(9). – P. 2238. – <https://doi.org/10.3390/nano11092238>

Поступило в редакцию 26.02.26.

Поступило с исправлениями 03.03.26.

Принято в печать 19.03.26.

**М. М. Кубенова¹, М. Х. Балапанов²,*

К. А. Кутербекөв³, Ж. А. Муханова⁴, А. Ж. Мукашева⁵

^{1,3,4}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университет,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

²Уфа ғылым және технология университет, Ресей Федерациясы, Уфа қ.;

⁵Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университет,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

26.02.26 ж. баспаға түсті.

03.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

LI_xCu_{2-y}S ТЕРМОЭЛЕКТРЛІК МАТЕРИАЛДАРДАҒЫ ИОНДЫҚ ТАСЫМАЛ ЖӘНЕ КОНЦЕНТРАЦИЯЛЫҚ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Бұл мақалада 350–420 °С температура аралығында $\text{Li}_x\text{Cu}_{2-y}\text{S}$ ($x = 0.09, 0.12, 0.16$) құрамды нанокомпозитті мыс сульфидтеріндегі литиймен легирлеудің концентрациялық поляризацияға және иондық өткізгіштікке әсерінің эксперименттік нәтижелері ұсынылған. Зерттеулер электрондарды бөгейтін электродтары бар симметриялы $\text{Cu}/\text{CuBr}/\text{Li}_x\text{Cu}_{2-y}\text{S}/\text{CuBr}/\text{Cu}$ электрохимиялық ұяшықтарын пайдаланып, 1 мА ток кезінде гальваностатикалық жүктеме жағдайында жүргізілді. Мыс сульфидтерінің иондық өткізгіштігі тұрақты ток режимінде зерттелді, мұнда CuBr қабаттары ион-селективті тосқауыл қызметін атқарып, электрондық заряд тасымалдаушылардың тасымалын тежейді. Мұндай жағдайда үлгі арқылы өтетін электр тогы негізінен Cu^+ иондарының миграциясымен анықталады. Литий мөлшерінің артуы концентрациялық поляризация амплитудасының төмендеуіне және стационарлық режимнің орнау уақытының қысқаруына әкелетіні көрсетілді, бұл иондардың қозғалғыштығының артуымен және материалдың ақаулық құрылымының қайта құрылуымен байланысты. $x = 0.12$ және 0.16 құрамдары үшін иондар тасымалының екі температуралық режимі анықталды, бұл ион миграциясының механизмінің өзгеруін және супериондық күйдің қалыптасуын көрсетеді. Тұрақталған режимде заряд тасымалы негізінен иондық сипатта болатыны

анықталды. Иондық өткізгіштік бойынша алынған эксперименттік нәтижелер литиймен легирлеу дәрежесінің материалдардың тасымалдық қасиеттеріне әсерін анықтауға, иондық тасымалдың температуралық ерекшеліктерін айқындауға және иондық қозғалғыштығы жоғары құрамдарды белгілеуге мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер Li-Cu-S жүйесіндегі мыс сульфидтерін қатты күйдегі электрохимиялық құрылғылар үшін жоғары температуралы ионөткізгіш материалдар ретінде қолданудың оңтайлы құрамдары мен жұмыс шарттарын анықтауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: синтез, мыс халькогенидтері, термоэлектрлік материалдар, иондық өткізгіштік, концентрациялық поляризация, активация энергиясы.

*M. M. Kubenova¹, M. Kh. Balapanov², K. A. Kuterbekov³,
Zh. A. Mukhanova⁴, A. Zh. Mukasheva⁵

^{1,3,4}L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

²Ufa University of Science and Technology, Russian Federation, Ufa;

⁵Karaganda Buketov National Research University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.

Received 26.02.26.

Received in revised form 03.03.26.

Accepted for publication 19.03.26.

ION TRANSFER AND CONCENTRATION POLARIZATION IN THERMOELECTRIC MATERIALS $\text{Li}_x\text{Cu}_{2-y}\text{S}$

This article presents experimental results on the effect of lithium doping on the concentration polarization and ionic conductivity of nanocomposite copper sulfides of the composition $\text{Li}_x\text{Cu}_{2-y}\text{S}$ ($x = 0.09, 0.12, 0.16$) in the temperature range of 350–420 °C. The studies were carried out under galvanostatic loading conditions at a current of 1 mA using symmetrical electrochemical cells $\text{Cu}/\text{CuBr}/\text{Li}_x\text{Cu}_{2-y}\text{S}/\text{CuBr}/\text{Cu}$ with electron-blocking electrodes. The ionic conductivity of copper sulfides was studied in the direct current mode using CuBr layers, which act as ion-selective barriers and suppress the transport of electron charge carriers. Under these conditions, the electric current through the sample is mainly due to the migration of Cu^+ ions. It is shown that increasing the lithium content leads to a decrease in the amplitude of concentration polarization and a reduction in the time it takes to establish a steady-

state regime, which is associated with an increase in ion mobility and the rearrangement of the defect structure of the material. The presence of two temperature transport regimes was established for compositions with $x = 0.12$ and 0.16 , indicating a change in the ion migration mechanism and the formation of a superionic state. It is shown that in the steady-state regime, charge transfer is predominantly ionic in nature. Experimental results on ionic conductivity made it possible to establish the influence of the degree of lithium doping on the transport properties of materials, determine the temperature characteristics of ion transport, and identify compositions with increased ion mobility. The obtained results make it possible to determine the optimal compositions and operating conditions for copper sulfides of the Li-Cu-S system as high-temperature ion-conducting materials for solid-state electrochemical devices.

Keywords: synthesis, copper chalcogenides, thermoelectric materials, ionic conductivity, concentration polarization, activation energy.

МРНТИ 29.19.16: 29.19.22: 29.19.31:

<https://doi.org/10.48081/BGQF1893>

Ж. Кули¹, Н. Б. Бакранов², Д. И. Бакранова³, *Ж. О. Мукаш⁴

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

²Национальная академия наук Республики Казахстан при Президенте
Республики Казахстан, Республика Казахстан, г. Алматы;

^{1,2}«Research Group altAir nanolab», Республика Казахстан, г. Алматы;

^{3,4}SDU University, Республика Казахстан, г. Каскелен.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5726-7899>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4577-6510>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0793-9905>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7713-3925>

*e-mail: janmukash@gmail.com

КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ BiVO_4 НА ПОВЕРХНОСТИ ZnO-НАНОТРУБОК: СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА

В данной работе представлена поэтапная методика синтеза гетероструктуры BiVO_4/ZnO , сформированной на основе нанотрубчатых массивов оксида цинка. На первом этапе синтеза наностержней ZnO были получены гидротермальным методом, который позволяет контролировать морфологию, размеры и однородность образцов. Далее полученные наностержни подвергались электрохимическому травлению, в результате чего происходило селективное растворение центральной части структур и формирование полых нанотрубок ZnO с развитой удельной поверхностью. Синтезированные ZnO-нанотрубки использовались в качестве шаблона для последующего построения гетероструктуры BiVO_4/ZnO .

Осаждение BiVO_4 осуществлялось двухэтапным методом, обеспечивающим равномерное распределение материала по поверхности нанотрубок и формирование квантовых точек BiVO_4 , что способствует улучшению межфазного контакта и разделению фотогенерированных носителей заряда. Для комплексной характеристики полученных структур применялись методы сканирующей электронной микроскопии (SEM), просвечивающей электронной микроскопии (TEM) и рентгеновской дифрактометрии (XRD), позволяющие исследовать морфологию, внутреннюю

структуру и фазовый состав образцов. Кроме того, был проведён предварительный анализ структур ZnO в форме наностержней и нанотрубок, выполнен обзор литературных данных и осуществлён их сравнительный анализ с точки зрения перспектив применения в фотоэлектрохимических системах.

Ключевые слова: квантовые точки, оксид цинка, ванадат висмута, гидротермальный синтез, нанотрубки, наностержни.

Введение

В последнее время тема фото электрохимического разложения воды привлекает всё больше внимания как одно из перспективных направлений в области энергетики [1; 2]. Получение водорода путем расщепления воды рассматривается как экологически чистая альтернатива традиционным углеродным источникам энергии [3; 4]. Полупроводники, такие как TiO_2 [5], Fe_2O_3 [6], WO_3 [7], Cu_2O [8], CdS [9], широко используются в качестве фотокатализаторов благодаря их способности эффективно поглощать электромагнитное излучение. Однако, несмотря на высокую активность, каждый из них имеет определённые недостатки, включая фотокоррозию, токсичность, ограниченную стабильность или сложность синтеза. В настоящем исследовании в качестве основных компонентов гетероструктуры выбраны ZnO [10; 11] и BiVO_4 [12; 13], что обусловлено их относительной нетоксичностью, простотой синтеза и благоприятными фотоэлектрическими свойствами.

Ванадат висмута (BiVO_4) обладает шириной запрещённой зоны около 2,4 эВ, что делает его перспективным материалом для поглощения значительной части видимого спектра солнечного излучения. BiVO_4 отличается нетоксичностью и химической стабильностью в водных растворах, что делает его привлекательным фотокатализатором. Оксид цинка (ZnO), в свою очередь, обладает шириной запрещённой зоны около 3,2 эВ и проявляет активность в ультрафиолетовом диапазоне. Комбинация ZnO и BiVO_4 в виде гетероструктуры позволяет объединить их спектральные преимущества, обеспечивая расширенное поглощение света и эффективное разделение зарядов, что повышает эффективность процессов фотокатализа и фотоэлектрокатализа за счёт синергетического взаимодействия компонентов [14; 15].

Материалы и методы

Синтез наностержней ZnO

Для обеспечения ориентированного роста наностержней ZnO (ZnONR) на стеклянных подложках размером $1,5 \times 2 \text{ см}^2$ с покрытием из индий-оксид олова (ITO) предварительно наносили тонкий затравочный слой. Подложки

очищали в ультразвуковой ванне поэтапно: сначала в ацетоне, затем в изопропанолe, после чего промывали дистиллированной водой (далее DiW). Раствор для затравочного слоя готовили растворением 0,1 г ацетата цинка дигидрата $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ (ZnAC) в 10 мл изопропанола при 70 °C при перемешивании на магнитной мешалке. Для получения прозрачного раствора при необходимости добавляли 0,005–0,02 мл 70 %-ной уксусной кислоты. Нанесение осуществляли методом spin-coating, дозируя по 0,05 мл раствора на каждый цикл при скорости вращения 3000 об/мин в течение 10 с. Процедуру повторяли 4–6 раз для формирования равномерного покрытия, с промежуточной сушкой каждого слоя при 100 °C. После нанесения подложки подвергали термическому отжигу на воздухе при 300–350 °C в течение 1 ч. Рост ZnONR проводили методом гидротермального синтеза. Для этого в 50 мл DiW растворяли 0,22 г ZnAC и 0,14 г гексаметилентетрамина. Подложку с нанесённым затравочным слоем устанавливали в автоклавный реактор в подвешенном положении. Реактор помещали в сушильный шкаф, и синтез осуществляли при 100 °C в течение 3 ч. Стоит отметить что после синтеза ZnO наностержней не проводился отжиг образцов.

Электрохимическое травление наностержней ZnO для формирования нанотрубок ZnO

Для формирования нанотрубок ZnO (ZnONT) предварительно синтезированные наностержни подвергали электрохимическому травлению. Процесс осуществляли в растворе 0,3 М KCl при потенциале 0,75 В относительно электрода сравнения Ag/AgCl с использованием потенциостата/гальваностата в стандартной трёхэлектродной электрохимической ячейке. В качестве рабочего электрода применяли подложку с массивом ZnONR. Противоз электродом служила платиновая пластина размером 0,5 × 0,5 см, а электрод сравнения представлял собой Ag/AgCl в насыщенном растворе KCl. Продолжительность травления составляла 20 мин. В конце травления образцы промывались DiW и сушили при 80 °C.

Нанесение $BiVO_4$ на подложку с ZnONT.

Предварительно подготовили два раствора А и В. Раствор А готовили путём растворения 0,095 г прекурсора $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ в 6 мл этиленгликоля (EG) с использованием ультразвуковой обработки. Только после полного растворения добавляли 3 мл DiW, что снижало вязкость раствора. Раствор В получали растворением 0,0227 г метаванадата аммония в 6 мл DiW при 90 °C при постоянном перемешивании до полного растворения, после чего добавляли 3 мл EG. Нанесение проводили пошагово по следующей схеме: на подложку с нанотрубками наносили каплю раствора А (100–500 мкл), затем выполняли вращение при 3000 об/мин в течение 10 с; после этого добавляли каплю раствора В и повторяли вращение в тех же условиях. Указанный цикл

повторяли 10 раз, после чего образец сушили при 100 °C в течение 5 мин. Окончательно полученный образец с нанесённым слоем $BiVO_4$ на массив ZnONT подвергали термическому отжигу на воздухе при 350 °C в течение 1,5 ч. Основные этапы синтеза проиллюстрированы на рисунке 1.

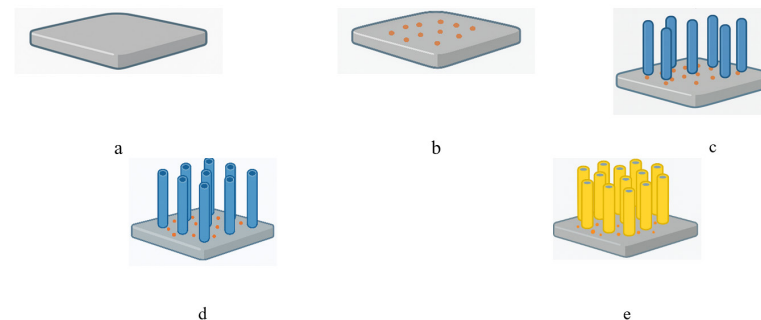


Рисунок 1 – Схематическое изображение процесса формирования нанотрубок ZnO с покрытием $BiVO_4$ на подложке ITO
(a) Очищенная подложка ITO (b) Нанесение затравочного слоя ZnO (c) Рост наностержней ZnO гидротермальным методом
(d) Электрохимическое травление наностержней с образованием нанотрубок ZnO (e) Покрытие нанотрубок ZnO слоем $BiVO_4$

Результаты и обсуждение

Нами были синтезированы ZnONR длиной в среднем 800–1200 нм и диаметром 300–400 нм. После травления они приобрели полуо морфологию, при этом диаметр нанотрубок составил в среднем 100–300 нм. Следует отметить, что на концах нанотрубок наблюдается частичное разрушение структуры. Удельная поверхность наноструктур оказывает существенное влияние на кинетические и термодинамические параметры протекающих реакций, причём это воздействие проявляется как в качественном, так и в количественном аспектах, что подтверждается данными исследований [16; 17]. Выбор между ZnONR и ZnONT определяется различием в их удельной поверхности. Полая высокоаспектная морфология ZnONT обеспечивает значительно большую удельную поверхность по сравнению с наностержнями [18], что создаёт большее количество активных центров для осаждения $BiVO_4$ и облегчает доступ реагентов к фотокатализатору. Кроме того, ZnONT демонстрируют существенно более высокую чувствительность по сравнению с наностержнями при проведении циклической вольтамперометрии. В частности, в одной из работ [19] при использовании метода дифференциальной

импульсной вольтамперометрии (SWV) была достигнута чувствительность $116,79 \text{ mA} \cdot \text{mM}^{-1}$, а также определён низкий предел обнаружения, равный $0,0437 \text{ мкМ}$, что опять таки доказывает предпочтительность выбора ZnONR перед ZnONR. Морфология ZnONR и ZnONT представлена на рисунке 2. На начальном этапе (a, b) видны плотные и вытянутые ZnONR с высокой степенью ориентации и однородной поверхностью. После проведения электрохимического травления (c, d) наблюдается их трансформация в нанотрубки: центральная часть стержней растворяется, формируя полые внутренние каналы, при этом сохраняется исходная цилиндрическая форма и высокая плотность массива. Такая эволюция морфологии свидетельствует об успешном переходе от ZnONR к ZnONT.

Для исследуемой гетероструктуры $\text{BiVO}_4/\text{ZnONT}$ были получены TEM-изображения (рисунок 3). Установлено, что в зависимости от концентрации растворов на этапе синтеза слоя BiVO_4 на поверхности ZnONT могут формироваться квантовые точки (далее QD) размером 10–60 нм. В целом полупроводниковые QD обладают уникальными свойствами [20]. При дальнейшем уменьшении размеров (<10 нм) проявляются квантово-размерные эффекты, сопровождающиеся смещением энергетических уровней и расширением спектра поглощения.

Образовавшиеся QD формируют множественные точечные гетеропереходы с поверхностью ZnONT, что способствует более эффективному межфазному разделению носителей заряда. Кроме того, на TEM-изображениях было зафиксировано межплоскостное расстояние $d = 0,465 \text{ нм}$ для BiVO_4 в моноклинной системе, что соответствует плоскости (110) кристаллической решётки и согласуется с литературными данными [19, 20]. Для ZnO, обладающего гексагональной кристаллической системой, определено межплоскостное расстояние $d = 0,247 \text{ нм}$ для плоскости (101), что также подтверждается ранее опубликованными результатами [4; 9].

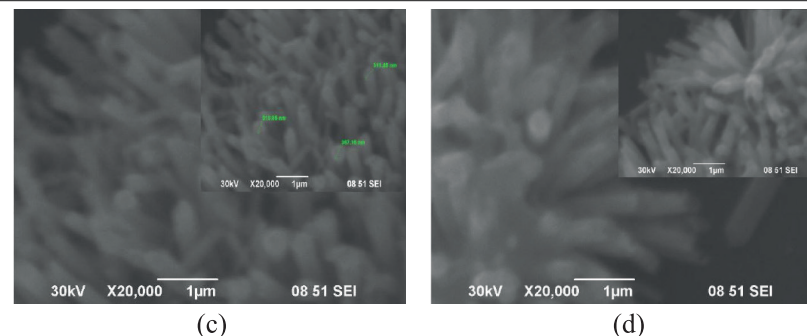
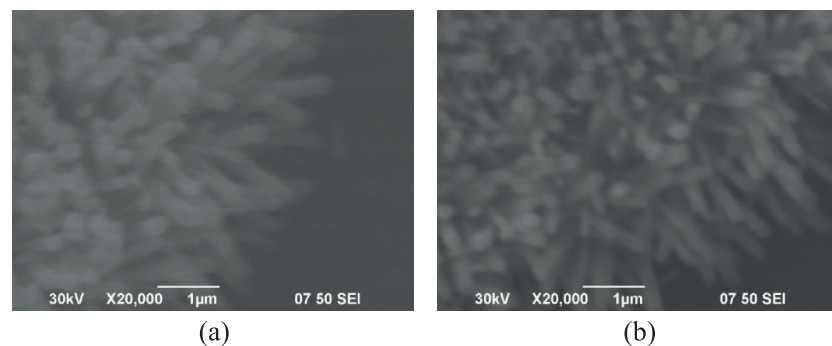


Рисунок 2 – SEM-изображения наноструктур ZnONR – ZnONT (a), (b) – наностержни ZnO, (c), (d) – нанотрубки ZnO

QD имеют ряд преимуществ, в частности: увеличение удельной поверхности контакта и образование большего числа реакционных центров для фотокаталитических процессов. Вместе с тем их применение сопряжено с трудностями равномерного распределения по поверхности; при избыточном содержании наблюдается агрегация QD, что может снижать эффективность системы. Возникновение QD мы связываем со скоростью нуклеации прекурсоров на этапе синтеза BiVO_4 , а также с такими параметрами, как вязкость раствора, его концентрация и количество циклов нанесения. Следует отметить, что при использовании растворов прекурсоров с высокой текучестью и низкой вязкостью можно прогнозировать проникновение QD во внутреннюю часть ZnONT, а также более равномерное распределение их по поверхности нанотрубок.

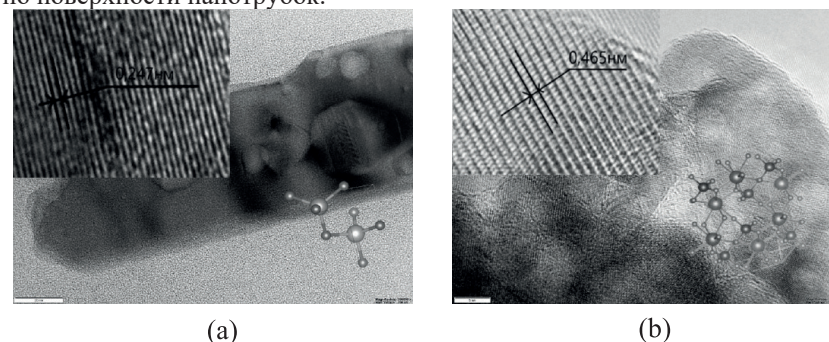


Рисунок 3 – TEM-изображения наноструктур.
(a) – ZnO нанотрубки: видна полая морфология и кристаллическая решётка с межплоскостным расстоянием; (b) – BiVO_4 : хорошо различимы кристаллические плоскости с межплоскостным расстоянием

На рисунке 4 представлена рентгенограмма гетероструктуры BiVO_4/ZnO . Наблюдаемые дифракционные пики при $2\theta \approx 18.9^\circ$, 21.4° , 29.0° и 30.6° соответствуют плоскостям (110), (011), (121) и (040) моноклинной фазы BiVO_4 (JCPDS №14-0688).

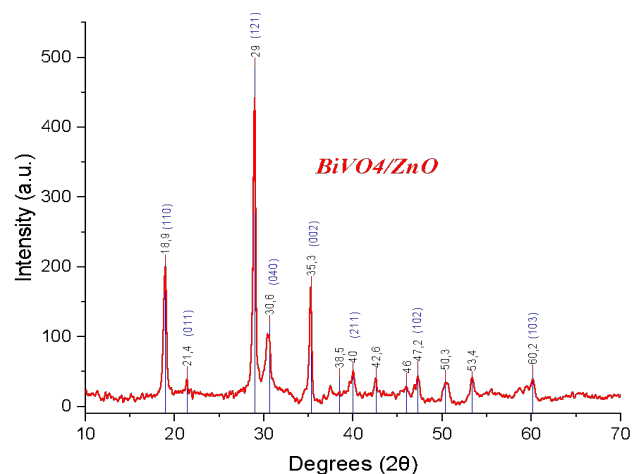


Рисунок 4 – Дифрактограмма (XRD) гетероструктуры BiVO_4/ZnO

Дополнительно фиксируются пики ZnO при $2\theta \approx 35.3^\circ$, 47.2° и 60.2° , которые относятся к плоскостям (002), (102) и (103) гексагональной вюрцитной структуры ZnO (JCPDS №36-1451). Совместное присутствие характерных пиков обеих фаз подтверждает успешное формирование композитной структуры BiVO_4/ZnO . Интенсивный пик BiVO_4 при $2\theta \approx 29.0^\circ$ указывает на преобладание моноклинной кристаллической фазы, а сохранение рефлексов ZnO свидетельствует о стабильности подложки нанотрубок после осаждения BiVO_4 . Полученная рентгенограмма хорошо согласуется с результатами, представленными в аналогичных работах по синтезу гетероструктур $\text{BiVO}_4/\text{ZnONT}$ с многостенными углеродными нанотрубками и с добавлением оксидов кобальта [19; 20].

Информация о финансировании

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23490626 «Исследование и разработка фотоэлектродов ZnO/BiVO_4 и $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ для создания высокоэффективных tandemных светоправляемых систем производства водорода»), Авторы заявляют, что финансовая поддержка была получена для исследования, авторства и/или публикации данной статьи.

Выводы

В данной работе представлена поэтапная методика синтеза гетероструктур BiVO_4/ZnO , основанных на нанотрубчатых массивах ZnO . Были синтезированы и охарактеризованы структуры на основе ZnO NT , модифицированных квантовыми точками BiVO_4 . На первом этапе с помощью гидротермального метода получали наностержни ZnO , которые затем подвергали электрохимическому травлению, что привело к формированию полых нанотрубчатых структур. Эти ZnO NT использовались в качестве шаблона для дальнейшего осаждения BiVO_4 . Двухэтапный метод синтеза обеспечил образование квантовых точек BiVO_4 на поверхности нанотрубок.

Для комплексного исследования были применены сканирующая электронная микроскопия (SEM), просвечивающая электронная микроскопия (TEM) и рентгеновская дифрактометрия (XRD). Проведен сравнительный анализ морфологии и структуры ZnO в форме наностержней и нанотрубок.

Результаты TEM подтвердили формирование квантовых точек BiVO_4 на поверхности ZnO NT , что способствует образованию множественных точечных гетеропереходов и может улучшать процессы разделения и переноса носителей заряда. Полученные данные согласуются с литературными сведениями и подтверждают перспективность таких структур для фотокаталитических и фотоэлектрохимических приложений.

В дальнейших исследованиях планируется расширить структурный анализ, включая изучение формирования равномерных слоёв BiVO_4 на поверхности ZnO NT . Комплексные измерения PEC-характеристик, а также тесты по фотодеградации модельных органических загрязнителей (например, метиленового синего), позволят более полно оценить каталитический потенциал разработанных систем. Применение дополнительных методов, таких как XPS, UPS и UV-Vis, обеспечит углублённое понимание структурных, электронных и оптических свойств гетероструктур.

Таким образом, представленная работа демонстрирует эффективный подход к созданию BiVO_4/ZnO гетероструктур с квантовыми точками BiVO_4 на поверхности нанотрубок ZnO , что открывает перспективы их применения в области фотоэлектрохимии и водородной энергетики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Zhao, Y., Niu, Z., Zhao, J., Xue, L., Fu, X., Long, J.** Recent advancements in photoelectrochemical water splitting for hydrogen production. In *Electrochemical Energy Reviews*. – 2023. – Vol. 6. – № 1. – P. 14.
- 2 **Liu, D., Kuang, Y.** Particle-based photoelectrodes for PEC water splitting: concepts and perspectives // In *Advanced Materials*. – 2024. – Vol. 36. – № 37. – P. 2311692.
- 3 **Clarizia, L., Nadagouda, M. N., Dionysiou, D. D.** Recent advances and challenges of photoelectrochemical cells for hydrogen production // In *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. – 2023. – Vol. 41. – P. 100825.
- 4 **Rabell, G. O., Cruz, M. A., Juárez-Ramírez, I.** Photoelectrochemical (PEC) analysis of ZnO/Al photoelectrodes and its photocatalytic activity for hydrogen production // In *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Vol. 47. – № 12. – P. 7770–7782.
- 5 **Braiek, Z., Naceur, J. B., Jrad, F., Assaker, I. B., Chtourou, R.** Novel synthesis of graphene oxide/In₂S₃/TiO₂ NRs heterojunction photoanode for enhanced photoelectrochemical (PEC) performance // In *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Vol. 47. – № 6. – P. 3655–3666.
- 6 **Deng, J., Li, Y., Xiao, Y., Feng, K., Lu, C., Nie, K., Zhong, J.** Improved water oxidation of Fe₂O₃/Fe₂TiO₅ photoanode by functionalizing with a hydrophilic organic hole storage overlayer // In *ACS Catalysis*. – 2022. – Vol. 12. – № 13. – P. 7833–7842.
- 7 **Wang, Z., Einaga, H.** WO₃-based materials for photocatalytic and photoelectrocatalytic selective oxidation reactions // In *ChemCatChem*. – 2023. – Vol. 15. – № 21. – P. e202300723.
- 8 **Zhang, M., Wang, J., Xue, H., Zhang, J., Peng, S., Han, X., Hu, W.** Acceptor-doping accelerated charge separation in Cu₂O photocathode for photoelectrochemical water splitting : theoretical and experimental studies // In *Angewandte Chemie*. – 2020. – Vol. 132. – № 42. – P. 18621–18625.
- 9 **Cao, S., Yan, X., Kang, Z., Liang, Q., Liao, X., Zhang, Y.** Band alignment engineering for improved performance and stability of ZnFe₂O₄ modified CdS/ZnO nanostructured photoanode for PEC water splitting // In *Nano Energy*. – 2016. – Vol. 24. – P. 25–31.
- 10 **Kang, Z., Si, H., Zhang, S., Wu, J., Sun, Y., Liao, Q., Zhang, Y.** Interface engineering for modulation of charge carrier behavior in ZnO photoelectrochemical water splitting // In *Advanced Functional Materials*. – 2019. – Vol. 29. – № 15. – P. 1808032.
- 11 **Wolcott, A., Smith, W. A., Kuykendall, T. R., Zhao, Y., Zhang, J. Z.** Photoelectrochemical study of nanostructured ZnO thin films for

- hydrogen generation from water splitting // In *Advanced Functional Materials*. – 2009. – Vol. 19. – № 12. – P. 1849–1856.
- 12 **Kim, J. H., Lee, J. S.** Elaborately modified BiVO₄ photoanodes for solar water splitting // In *Advanced Materials*. – 2019. – Vol. 31. – № 20. – P. 1806938.
 - 13 **Tayebi, M., Lee, B. K.** Recent advances in BiVO₄ semiconductor materials for hydrogen production using photoelectrochemical water splitting // In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – Vol. 111. – P. 332–343.
 - 14 **Mohamed, N. A., Safaei, J., Ismail, A. F., Khalid, M. N., Jailani, M. F. A. M., Noh, M. F. M., Teridi, M. A. M.** Boosting photocatalytic activities of BiVO₄ by creation of g-C₃N₄/ZnO@BiVO₄ heterojunction // In *Materials Research Bulletin*. – 2020. – Vol. 125. – P. 110779.
 - 15 **Chang, J. S., Phuan, Y. W., Chong, M. N., Ocon, J. D.** Exploration of a novel Type II 1D-ZnO nanorods/BiVO₄ heterojunction photocatalyst for water depollution // In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2020. – Vol. 83. – P. 303–314.
 - 16 **Bernard, P., Stelmachowski, P., Broś, P., Makowski, W., Kotarba, A.** Demonstration of the influence of specific surface area on reaction rate in heterogeneous catalysis // In *Journal of Chemical Education*. – 2021. – Vol. 98. – № 3. – P. 935–940.
 - 17 **Wu, T., Han, M. Y., Xu, Z. J.** Size effects of electrocatalysts : more than a variation of surface area // In *ACS Nano*. – 2022. – Vol. 16. – № 6. – P. 8531–8539.
 - 18 **Schlur, L., Calado, J. R., Spitzer, D.** Synthesis of zinc oxide nanorods or nanotubes on one side of a microcantilever // In *Royal Society Open Science*. – 2018. – Vol. 5. – № 8. – P. 180510.
 - 19 **Sledevskis, E., Krasovska, M., Gerbreder, V., Mihailova, I., Kevis, J., Mizers, V., Bulanovs, A.** Impact of ZnO nanostructure morphology on electrochemical sensing performance for lead ion detection in real water samples // In *Chemosensors*. – 2025. – Vol. 13. – № 2. – P. 62.
 - 20 **García de Arquer, F. P., Talapin, D. V., Klimov, V. I., Arakawa, Y., Bayer, M., Sargent, E. H.** Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges // In *Science*. – 2021. – Vol. 373. – № 6555. – P. 8541.

Поступило в редакцию 29.01.26.

Поступило с исправлениями 24.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

Ж. Кули¹, Н. Б. Бақранов², Д. И. Бақранова³, *Ж. О. Мұқаш⁴

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

²Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы

Ұлттық ғылым академиясы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{1,2}«Research Group altAir nanolab», Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{3,4}СДУ Университеті, Қазақстан Республикасы, Қаскелен қ.

29.01.26 ж. баспаға түсті.

24.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

BiVO₄ КВАНТТЫҚ НҮКТЕЛЕРІМЕН ҚАПТАЛҒАН ZnO НАНОТҮТІКШЕЛЕР: СИНТЕЗ ЖӘНЕ СИПАТТАМАСЫ

Бұл жұмыста мырыш оксидінің нанотүтікшелі массивтері негізінде қалыптастырылған BiVO₄/ZnO гетероқұрылымын синтездеудің кезең-кезеңмен жүргізілетін әдістемесі ұсынылады. Бірінші кезеңде ZnO нанотаяқшалары гидротермалдық әдіс арқылы синтезделді, бұл үлгілердің морфологиясын, өлшемдерін және біртектілігін дәл бақылауға мүмкіндік береді. Одан кейін алынған нанотаяқшалар электрохимиялық травление процесіне ұшыратылып, құрылымдардың орталық бөлігі селективті түрде еріп, меншікті беткі ауданы жоғары қуыс ZnO нанотүтікшелерінің түзілуіне алып келді. Синтезделген ZnO нанотүтікшелері BiVO₄/ZnO гетероқұрылымын қалыптастыру үшін шаблон ретінде қолданылды.

BiVO₄ тұндыру екі сатылы әдіспен жүзеге асырылып, нанотүтікшелер бетінде материалдың біркелкі таралуын және BiVO₄ кванттық нүктелерінің түзілуін қамтамасыз етті, бұл фазааралық контактінің жақсаруына және фотогенерацияланған заряд тасымалдаушылардың тиімді бөлінуіне ықпал етті. Алынған құрылымдарды кешинді сипаттау үшін сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM), өткізгіш электрондық микроскопия (TEM) және рентгендік дифракция (XRD) әдістері қолданылды, олар үлгілердің морфологиясын, ішкі құрылымын және фазалық құрамын зерттеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, ZnO құрылымдарының нанотаяқша және нанотүтікше түрлеріне алдын ала талдау жүргізіліп, әдеби деректерге шолу жасалды және олардың фотоэлектрохимиялық жүйелерде қолдану перспективасы тұрғысынан салыстырмалы талдау орындалды.

Кілтті сөздер: кванттық нүктелер, мырыш оксиді, висмут ванадаты, гидротермалдық синтез, нанотүтікшелер, нанотаяқшалар.

Zh. Kuli¹, N. B. Bakranov², D. I. Bakranova³, *Zh. O. Mukash⁴

¹Kazakh-British Technical University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

²National Academy of Sciences of Kazakhstan under the President,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{1,2}«Research Group altAir nanolab», Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{3,4}SDU University, Republic of Kazakhstan, Kaskelen.

Received 29.01.26.

Received in revised form 24.02.26.

Accepted for publication 19.03.26.

QUANTUM DOT-MODIFIED BiVO₄ ON ZnO NANOTUBE HETEROSTRUCTURES: SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION

This work presents a step-by-step methodology for the synthesis of a BiVO₄/ZnO heterostructure formed on the basis of zinc oxide nanotube arrays. In the first stage, ZnO nanorods were synthesized via a hydrothermal method, which enables precise control over morphology, size, and sample uniformity. Subsequently, the obtained nanorods underwent electrochemical etching, resulting in selective dissolution of the central part of the structures and the formation of hollow ZnO nanotubes with an enhanced specific surface area. The synthesized ZnO nanotubes were then used as a template for the subsequent construction of the BiVO₄/ZnO heterostructure.

BiVO₄ deposition was carried out using a two-step approach, ensuring uniform material distribution over the nanotube surfaces and the formation of BiVO₄ quantum dots, which promotes improved interfacial contact and efficient separation of photogenerated charge carriers. For comprehensive characterization of the synthesized structures, scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and X-ray diffraction (XRD) were employed to investigate morphology, internal structure, and phase composition. In addition, a preliminary analysis of ZnO structures in the form of nanorods and nanotubes was conducted, along with a review of relevant literature and a comparative assessment of their potential applications in photoelectrochemical systems.

Keywords: Quantum Dots, Zinc Oxide, Bismuth Vanadate, Hydrothermal Synthesis, Nanotubes, Nanorods.

МРНТИ 29.37.03

<https://doi.org/10.48081/BGQF1894>

А. А. Курманов¹, Н. А. Испулов²,

***А. Ж. Жумабеков³, А. К. Жанатов⁴**

Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4731-9137>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4703-1413>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2360-3747>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3564-674X>

*e-mail: almar89-89@mail.ru

ҚОЗҒАЛМАЙТЫН АНИЗОТРОПТЫ ОРТАДА ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ТОЛҚЫНДАРДЫҢ ДИСПЕРСИЯЛЫҚ ТЕҢДЕУЛЕРІ МЕН ИНДИКАТРИСАЛАРЫ ТУРАЛЫ

Мақалада периодты біртекті анизотропты орталарда электромагниттік толқындардың таралуы матрицант әдісі негізінде зерттеледі. Блох теориясын қолдану және матрицанттардың ішкі құрылымын терең талдау арқылы сипаттамалық теңдеудің дәрежесін төмендетуге және оның түбірлерінің симметриясын қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін модификацияланған дисперсия теңдеулері алынған. Мұндай тәсіл күрделі анизотропты құрылымдардағы толқындық процестерді талдауды айтарлықтай жеңілдетіп, сонымен қатар аналитикалық модельдеудің тиімділігін едәуір арттырады. Чебышев–Гегенбауэр полиномдарын пайдалану арқылы ортаның шекті периодтар саны үшін монодромия матрицасын аналитикалық түрде есептеу әдісі ұсынылған. Ұзын толқындық жуықтауда орташаланған ортаның матрицантының айқын және ықшам өрнегі алынған. Осы өрнек негізінде бірқатар күшті анизотропты кристалдар үшін толқын векторының индикатрисалары есептелді, олардың ішінде CaTiO_3 , TiO_2 , LiNbO_3 , BaTiO_3 , KNbO_3 , Sb_2S_3 , GdScO_3 , TbScO_3 және DyScO_3 бар. Индикатриса пішінінің диэлектрлік тензор компоненттерінің арақатынасына айтарлықтай тәуелді екені көрсетілді. Атап айтқанда, KNbO_3 кристалында анизотропияның жоғары дәрежесіне байланысты индикатриса пішінінің ерекше сипаттары анықталды. Алынған нәтижелер төмен симметриялы

кристалдардағы толқындық процестерді модельдеуде матрицант әдісінің тиімділігін көрсетеді және фотондық кристалдарды, метаматериалдарды және оптоэлектрондық құрылғыларды зерттеуде кеңінен қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: матрицант, дисперсия теңдеулері, периодты біртекті орта, анизотропты орта, толқын векторының индикатрисасы, Блох теориясы, ұзын толқын ұзындығын жуықтау, электромагниттік толқындар, төмен симметриялық кристалдар.

Кіріспе

Электромагниттік толқындардың периодты біртекті анизотропты ортада таралуы фотондық кристалдар, метаматериалдар және акустикалық-оптикалық құрылғыларды қоса алғанда, заманауи технологиялар үшін айтарлықтай қызығушылық тудырады. Мұндай жүйелерді талдау көбінесе айнымалы коэффициенттері бар күрделі дифференциалдық теңдеулерді шешуді қамтиды, бұл тиімді математикалық әдістерді қолдануды талап етеді. Мұндай әдістердің бірі – матрицант әдісі, ол мәселені бірінші ретті қарапайым дифференциалдық теңдеулер жүйесіне келтіруге мүмкіндік береді [1]. [2]-де Блох теоремасына негізделген монодромды матрицаны периодты құрылымдардағы толқын векторымен байланыстыратын іргелі қатынастар алынды. Орташа анизотропты орта үшін ұзын толқынды жуықтау саласындағы зерттеулер [3]-те ұсынылған, онда матрицанттың айқын түрі алынған. Периодты құрылымдардағы толқындар үшін Брилюэн мен Пародидің классикалық нәтижелері матрицалық тәсілді қолдана отырып, үздіксіз біртекті анизотропты орта жағдайына жалпыланған [4]. Фотондық кристалдар мен метаматериалдар сияқты периодты орталарды зерттеу іргелі еңбектерде егжей-тегжейлі талқыланады [5; 6]. Осы жұмысқа қатысты қабатты анизотропты ортадағы толқындардың таралуының теориялық аспектілері [7–10]-да зерттелген. Бұл мақалада матрицалық әдіс дисперсия қатынастарын алу және бір өлшемді периодты біртекті анизотропты ортадағы толқындық процестерді талдау үшін қолданылады. Нақты кристалдық құрылымдар (мысалы, CaTiO_3 , TiO_2 , LiNbO_3) үшін толқын векторының индикатрикстерін құру жұмыста алынған дисперсия қатынастары және нұсқаулықтан алынған диэлектрлік өткізгіштік туралы деректер негізінде жүзеге асырылады [11].

Материалдар мен әдістер

1. Дисперсия теңдеулері. Алынған матрицалық құрылымдарды шектеусіз, периодты түрде біртекті орта жағдайына қолдануды қарастырамыз. Дисперсиялық теңдеулер мұндай ортаның негізгі сипаттамаларының бірі болып табылады. Матрицалық құрылымды білу

монодромдық матрицаның түбірлерін анықтау үшін өзгертілген түрді алуға мүмкіндік береді, ол сипаттамалық теңдеудің дәрежесін екі есе азайтады немесе өрнектері симметриялы түбірлерді береді. Сипаттамалық теңдеудің түбірлері дисперсия заңын анықтайды.

Блох теоремасы трансляциялық симметрия жағдайында [2] мынаны білдіреді:

$$\vec{W}(h) = e^{i\tilde{k}h} \vec{W}(0)$$

Біртексіз периодтардың бірін анықтайтын монодромдық матрицантқа сүйене отырып, біз мынаны аламыз:

$$\vec{W}(h) = \hat{T} \vec{W}(0)$$

Соңғы екі қатынасты ескере отырып, мынаны аламыз:

$$(\hat{T} - e^{i\tilde{k}h} \hat{E}) \vec{W}(0) = 0 \quad (1)$$

Өрнекке көбейтіп $-\hat{T}^{-1} e^{-i\tilde{k}h}$, келесі қатынасты аламыз:

$$(\hat{T}^{-1} - e^{-i\tilde{k}h} \hat{E}) \vec{W}(0) = 0 \quad (2)$$

(1) өрнегіндегі матрицалық детерминанттың $\hat{T} - e^{i\tilde{k}h} \hat{E}$ нөлге теңдігі (2) жағдайындағыдай дисперсия заңын анықтайды, себебі периодтық ортадағы толқындардың дисперсия заңы (\pm) бағытынан тәуелсіз. (1) және (2) біріктіру матрицалық теңдеудің тривиалды емес шешімдерінің болуы шартының жаңа өзгертілген түріне әкеледі:

$$(\hat{T} + \hat{T}^{-1} - (e^{i\tilde{k}h} + e^{-i\tilde{k}h}) \hat{E}) \cdot \vec{W}(0) = 0 \quad (3)$$

Матрицаны еңгізіп:

$$\hat{p} = \frac{1}{2} (\hat{T} + \hat{T}^{-1}) \quad (4)$$

(3) қатынастан аламыз:

$$\det(\hat{p} - \hat{E} \cos \tilde{k}h) = 0 \quad (5)$$

Дисперсия теңдеулері (5) \hat{p} матрицасы үшін сипаттамалық теңдеудің шешімдері болып табылады, яғни жалпы жағдайда дисперсиялық теңдеулер (6) түрінде болады:

$$\cos \tilde{k}_i h = \tilde{p}_i = \lambda_i \quad (6)$$

(17), (18) жалпы түріндегі матрицанттар жағдайында, (4) құрылысына негізделген \hat{p} матрицасы келесі түрді алады:

$$\hat{p} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{11} & p_{23} & p_{24} \\ -p_{24} & -p_{14} & p_{33} & p_{34} \\ -p_{23} & -p_{13} & p_{43} & p_{33} \end{bmatrix}_{\text{чет}} + \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & q_{13} & q_{14} \\ 0 & -q_{11} & q_{23} & q_{24} \\ q_{24} & q_{14} & q_{33} & 0 \\ q_{23} & q_{13} & 0 & -q_{33} \end{bmatrix}_{\text{неч}} \quad (7)$$

мұндағы q_{ij} – бұл келесі матрица элементтері: $\hat{q} = \frac{1}{2} (\hat{T} - \hat{T}^{-1})$.

Осыны ауыстырып $\cos \tilde{k}h = \lambda$, (7) теңдеуін ескере отырып, (5) детерминантын кеңейтіп, төртінші дәрежелі теңдеуді (сипаттамалық дисперсия теңдеуін) аламыз:

$$\lambda^4 + a\lambda^3 + b\lambda^2 + c\lambda + d = 0, \quad (8)$$

Бұның түбірлері келесі:

$$\lambda_1 = -\frac{a}{4} - \frac{1}{2}A - \frac{1}{2}\sqrt{B - \frac{\gamma}{4A}}, \quad \lambda_2 = -\frac{a}{4} - \frac{1}{2}A + \frac{1}{2}\sqrt{B - \frac{\gamma}{4A}},$$

$$\lambda_3 = -\frac{a}{4} + \frac{1}{2}A - \frac{1}{2}\sqrt{B + \frac{\gamma}{4A}}, \quad \lambda_4 = -\frac{a}{4} + \frac{1}{2}A + \frac{1}{2}\sqrt{B + \frac{\gamma}{4A}},$$

$$\text{мұндағы } A = \sqrt{\frac{\sqrt[3]{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta^3}}}{3\sqrt[3]{2}} + \frac{a^2}{4} - \frac{2b}{3} + \frac{\sqrt[3]{2}\beta}{3\sqrt{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta^3}}}},$$

$$B = -\frac{\sqrt[3]{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta^3}}}{3\sqrt[3]{2}} + \frac{a^2}{2} - \frac{4b}{3} - \frac{\sqrt[3]{2}\beta}{3\sqrt{\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta^3}}},$$

$$\alpha = 2b^3 - 9abc - 72db + 27c^2 + 27a^2d, \quad \beta = b^2 - 3ac + 12d,$$

$$\gamma = -a^3 + 4ab - 8c,$$

$$a = -2p_{11} - 2p_{33};$$

$$b = p_{11}^2 + 4p_{33}p_{11} + p_{33}^2 - q_{11}^2 - q_{33}^2 - p_{12}p_{21} + 2p_{14}p_{23} + 2p_{13}p_{24} - p_{34}p_{43} - 2q_{14}q_{23} - 2q_{13}q_{24};$$

$$c = -2(p_{33}p_{11}^2 + (p_{33}^2 - q_{33}^2 + p_{14}p_{23} - p_{34}p_{43} - q_{14}q_{23} - q_{13}q_{24})p_{11} - p_{33}q_{11}^2 - p_{12}p_{23}p_{24} - p_{12}p_{21}p_{33} + p_{14}p_{23}p_{33} - p_{14}p_{24}p_{43} - p_{24}q_{11}q_{13} - q_{14}p_{23}q_{11} + p_{21}q_{13}q_{14} + p_{14}q_{11}q_{23} + p_{34}q_{13}q_{23} - p_{33}q_{14}q_{23} - p_{33}q_{13}q_{24} + p_{43}q_{14}q_{24} + p_{12}q_{23}q_{24} - p_{24}q_{13}q_{33} + p_{23}q_{14}q_{33} - p_{14}q_{23}q_{33} + p_{13}(-p_{14}p_{21} + p_{11}p_{24} + p_{24}p_{33} - p_{23}p_{34} + q_{11}q_{24} + q_{24}q_{33}));$$

$$d = p_{11}^2p_{33}^2 - p_{11}^2p_{43}p_{34} + 2p_{34}p_{11}q_{13}q_{23} - 2p_{33}p_{11}q_{14}q_{23} - 2p_{33}p_{11}q_{13}q_{24} + 2p_{43}p_{11}q_{14}q_{24} - p_{12}p_{21}p_{33}^2 - p_{33}^2q_{11}^2 + p_{34}p_{43}q_{11}^2 - p_{24}^2q_{13}^2 - p_{21}p_{34}q_{13}^2 - p_{23}^2q_{14}^2 - p_{21}p_{43}q_{14}^2 + q_{14}^2q_{23}^2 - p_{12}p_{34}q_{23}^2 + q_{13}^2q_{24}^2 - p_{12}p_{43}q_{24}^2 - (p_{11}^2 - q_{11}^2 - p_{12}p_{21})q_{23}^2 - 2p_{12}p_{23}p_{24}p_{33} + p_{23}^2p_{12}p_{34} + p_{24}^2p_{12}p_{43} + p_{12}p_{21}p_{34}p_{43} - 2p_{24}p_{33}q_{13}q_{11} + 2p_{23}p_{34}q_{13}q_{11} - 2p_{23}p_{33}q_{14}q_{11} + 2p_{24}p_{43}q_{14}q_{11} + 2p_{24}p_{23}q_{13}q_{14} + 2p_{21}p_{33}q_{13}q_{14} + p_{14}^2(p_{23}^2 - q_{23}^2 + p_{21}p_{43}) + 2p_{12}p_{33}q_{23}q_{24} - 2q_{13}q_{14}q_{23}q_{24} + p_{13}^2(p_{24}^2 - q_{24}^2 + p_{21}p_{34}) - 2(p_{11}(p_{24}q_{13} - p_{23}q_{14}) - (p_{12}p_{24} + q_{11}q_{14})q_{23} + (p_{12}p_{23} + q_{11}q_{13})q_{24})q_{33} - 2p_{14}(-p_{33}q_{11}q_{23} - p_{24}q_{13}q_{23} + p_{43}q_{11}q_{24} + p_{23}q_{13}q_{24} + p_{13}(p_{23}p_{24} + p_{21}p_{33} - q_{23}q_{24}) + (p_{23}q_{11} - p_{21}q_{13})q_{33} + p_{11}(-p_{23}p_{33} + p_{24}p_{43} + q_{23}q_{33})) + 2p_{13}(-p_{34}q_{11}q_{23} - p_{24}q_{14}q_{23} + p_{33}q_{11}q_{24} + p_{23}q_{14}q_{24} + (p_{24}q_{11} - p_{21}q_{14})q_{33} + p_{11}(p_{24}p_{33} - p_{23}p_{34} + q_{24}q_{33}));$$

Сонымен, дисперсия теңдеулері осыған келтірілді:

$$\begin{aligned} \cos \tilde{k}_1 h &= -\frac{a}{4} - \frac{1}{2}A - \frac{1}{2}\sqrt{B - \frac{\gamma}{4A}}, & \cos \tilde{k}_2 h &= -\frac{a}{4} - \frac{1}{2}A + \frac{1}{2}\sqrt{B - \frac{\gamma}{4A}}, \\ \cos \tilde{k}_3 h &= -\frac{a}{4} + \frac{1}{2}A - \frac{1}{2}\sqrt{B + \frac{\gamma}{4A}}, & \cos \tilde{k}_4 h &= -\frac{a}{4} + \frac{1}{2}A + \frac{1}{2}\sqrt{B + \frac{\gamma}{4A}}. \end{aligned} \quad (9)$$

2. Периодты біртекті қабаттың матрицанты. Шекті периодты құрылымдарды және аналитикалық көріністі T^n қарастырайық.

Егер қалыңдығы H периодты біртекті қабаттың n периоды болса, яғни $H = nh$, онда матрицанты есептеу монодромия матрицаны n -ші дәрежеге дейін есептеуге әкеледі:

$$\hat{T}(H) = \hat{T}^n(h)$$

Белгілі құрылымға \hat{T}^{-1} негізделген (4) бойынша \hat{p} матрицаны енгізу бізге $\hat{T}(h)$ монодромды матрица арқылы аналитикалық көрініс $\hat{T}(H)$ алуға мүмкіндік берді.

(4)-тен тікелей аламыз:

$$T^2 = 2\hat{p}T - E \quad (10)$$

($n-1$) және n -ші периодты қабаттарға қайта жағу, оң жақтағы (10)-ды келесіге \hat{T} көбейту:

$$\hat{T}^3 = (4\hat{p}^2 - \hat{E})\hat{T} - 2\hat{p}, \quad \hat{T}^4 = (8\hat{p}^3 - 4\hat{p})\hat{T} - (4\hat{p}^2 - \hat{E}) \dots$$

рекуренттік қатынастарына әкеледі:

$$\hat{T}^n = P_n(\hat{p})\hat{T} - P_{n-1}(\hat{p}) \quad (11)$$

Бұл қатынас T^n -ның аналитикалық көрінісі болады.

Бұл \hat{p} құрылым матрицалық полиномдарды $P_n(\hat{p})$ екінші текті алгебралық Чебышев-Гегенбауэр полиномдарына дейін азайтуға және T^n түрінде ұсынуға мүмкіндік береді [12]:

$$\hat{T}^n = \sum_{i=1}^4 \hat{P}_i(P_n(\tilde{p}_i)\hat{T} - P_{n-1}(\tilde{p}_i)\hat{E}) \quad (12)$$

3. Орташаланған ортаның матрицанты. Біз ортаны $\lambda \gg h$ шарт бойынша орташалаймыз (λ – мұндағы толқын ұзындығы, h – біртектілік периоды). Осыдан дисперсия теңдеулерінің (7) $\tilde{k}h = \frac{2\pi h}{\lambda} \ll 1$ жіктелесін келесі түрде аламыз:

$$\tilde{p}_i = \cos \tilde{k}_i h \cong 1 - \frac{\tilde{k}_i^2 h^2}{2} \text{ немесе } \sqrt{1 - \tilde{p}_i^2} \approx \tilde{k}_i h = \frac{\tilde{k}_i H}{n}, \quad (13)$$

мұндағы $H = nh$ – қабаттың жалпы қалыңдығы, n –қабаттағы периодтар саны.

$$\hat{P}_{(2)} = \hat{E} + \frac{\langle B \rangle h^2}{2}; \quad \langle B \rangle = \frac{1}{h} \int_0^h B dz \quad (14)$$

Кейінгі жуықтаудан $\hat{T} - \tilde{p}_i \hat{E} \cong \langle B \rangle h$ қатынасты еңгізуге мүмкін береді. Осымен [3]:

$$P(\tilde{p}_i)T - P_{n-1}(\tilde{p}_i)E = \cos \tilde{k}_i H + \frac{\langle B \rangle}{\tilde{k}_i} \sin \tilde{k}_i H \quad (15)$$

(15)-ті (12)-ге қойып, мынаны аламыз:

$$T_{ycp} = \sum_{i=1}^4 P_i[\hat{E} \cos \tilde{k}_i H + \frac{\langle B \rangle}{\tilde{k}_i} \sin \tilde{k}_i H], \quad (16)$$

Осында:

$$P_i = \frac{(\hat{P}_{(2)} - \tilde{p}_j)(\hat{P}_{(2)} - \tilde{p}_k)(\hat{P}_{(2)} - \tilde{p}_l)}{(\tilde{p}_i - \tilde{p}_j)(\tilde{p}_i - \tilde{p}_k)(\tilde{p}_i - \tilde{p}_l)}; (i,j,k,l = 1,2,3,4; i \neq j \neq k \neq l) \quad (17)$$

(17) формулаларында туындайтын сипаттамалық теңдеудің түбірлері \tilde{p}_i шарттан алынған:

$$\det(\hat{p}_{(2)} - \lambda \hat{E}) = 0 \quad (18)$$

(18) матрицасын құрумен қатар, түбірлерді білу әртүрлі поляризацияланған электромагниттік толқындардың индикатрисалары үшін теңдеулер алуға мүмкіндік береді. Индикатриса кысықтары келесі теңдеулермен анықталады:

$$1 - \frac{\tilde{k}_i^2 h^2}{2} = \tilde{p}_i^{(2)} \Rightarrow \tilde{k}_i^2 = \frac{2(1 - \tilde{p}_i^{(2)})}{h^2} \quad (19)$$

4. Индикатриса теңдеулері. Шексіз периодты біртекті емес анизотропты құрылым үшін индикатриса теңдеулері (6) дисперсия теңдеулерінің төмен жиілікті орташалауынан шығады. Алдымен (13), (14) және (18) теңдеулерін ыңғайлы түрге түрлендіреміз:

$$\det(\hat{E} + B^2 h^2 / 2 - \hat{E} + \hat{E} (k_i h)^2 / 2) = 0 \Rightarrow \det(B^2 + \hat{E} k_i^2) = 0 \quad (20)$$

Дифференциалдық матрицалық теңдеуді

$$\frac{d\vec{W}}{dz} = \hat{B}\vec{W}, \quad \vec{W} = (E_y, H_x, H_y, E_x)'$$

формулаларын ескере отырып, дифференциалдық матрицалық теңдеуді келесі түрдегі диэлектрлік өткізгіштік, магнит өткізгіштігі және өткізгіштігімен сипатталатын моноклинді кристалдар үшін шешейік:

$$\hat{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_x & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix}, \quad \mu_{ij} = const, \quad \sigma_{ij} = 0.$$

Айтылған орта түрі үшін толқын векторының индикатристерінің теңдеуін аламыз:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\epsilon_z} ((k^2 + k_x^2 + k_y^2)(k_x^2 \epsilon_x + 2k_x k_y \epsilon_{xy} + k_y^2 \epsilon_y + k^2 \epsilon_z) + \\ & + \epsilon_0 \mu_0 \omega^2 ((k_x^2 + k_y^2)(\epsilon_{xy}^2 - \epsilon_x \epsilon_y) - ((k^2 + k_x^2) \epsilon_x + 2k_x k_y \epsilon_{xy} + \\ & + (k^2 + k_y^2) \epsilon_y) \epsilon_z + \epsilon_0^2 \mu_0^2 \omega^4 (-\epsilon_{xy}^2 + \epsilon_x \epsilon_y)) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Сфералық координаттар жүйесін енгізейік:

$$\begin{cases} k_x = k \sin \varphi \cos \theta, \\ k_y = k \sin \varphi \sin \theta, \\ k_z = k \cos \varphi. \end{cases}$$

Ұзын толқынды жуықтауға сәйкес электромагниттік толқындардың параметрлерін орнатайық: $\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 = \omega^2 / c^2 \approx \omega^2 / 10^{17} = 1 \text{ м}^{-2}$, метр-дециметрлік радиотолқындар.

Орта параметрлері (1-кесте):

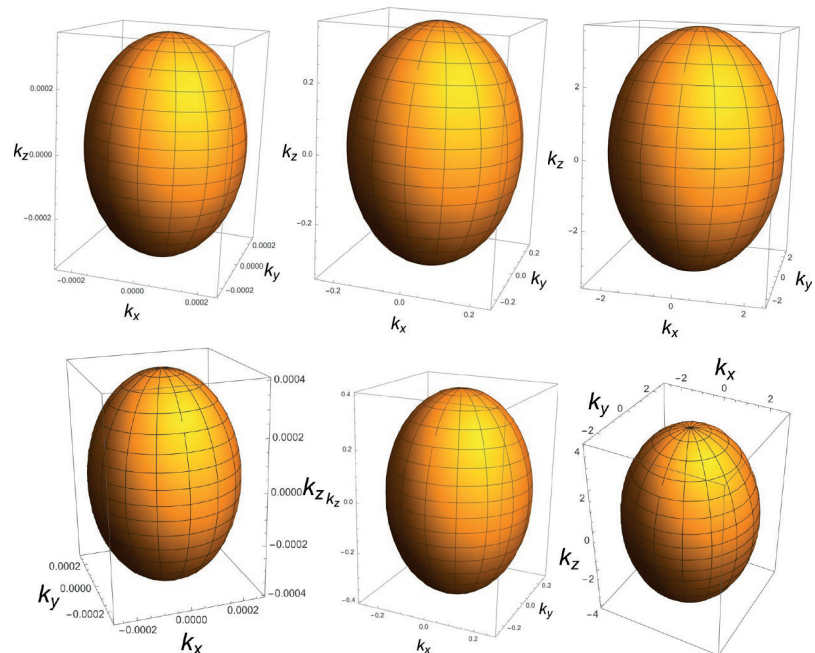
1-кесте – Кейбір күшті анизотропты кристалдардың диэлектрлік тензорлары

Материал	Диэлектрлік өтімділік тензоры ($\hat{\epsilon}$)	Сипаттамасы (өлшеу шарттары, қасиеттері және қолданылуы)
CaTiO ₃ [13, 14] (орторомбтық)	$\begin{pmatrix} 150 & 0 & 0 \\ 0 & 120 & 0 \\ 0 & 0 & 140 \end{pmatrix}$	10 МГц жиілігінде [14], T = 300 К; магниттік қабылдағыштығы $\mu \approx 1$ (диамагнитті) [15]; мөлдірлігі: 0.4–6.0 мкм; кванттық параэлектрик [13]; монокристалл (конденсаторлар, микротолқынды құрылғылар, байланыс жүйелері) [14].
TiO ₂ (рутил) (тетрагональды)	$\begin{pmatrix} 86 & 0 & 0 \\ 0 & 86 & 0 \\ 0 & 0 & 170 \end{pmatrix}$	10 МГц жиілігінде, T = 300 К; $\mu \approx 1$ (диамагнитті); мөлдірлігі: 0.4–5.0 мкм (көрінетін және ЖШҚ); монокристалл; жиілік диапазоны 10 ² –10 ⁸ Гц тұрақты (оптоэлектроника, жоғары жиілікті конденсаторлар).

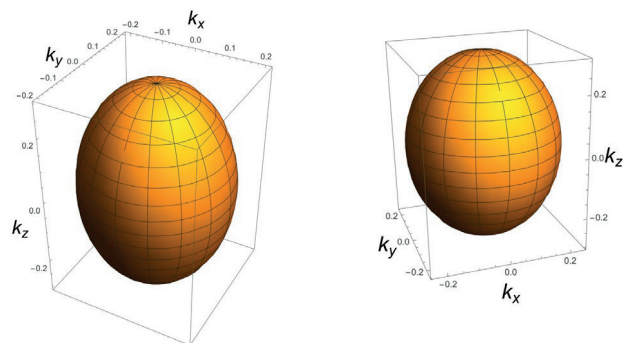
Материал	Диэлектрлік өтімділік тензоры ($\hat{\epsilon}$)	Сипаттамасы (өлшеу шарттары, қасиеттері және қолданылуы)
LiNbO ₃ (тригональды)	$\begin{pmatrix} 84 & 0 & 0 \\ 0 & 84 & 0 \\ 0 & 0 & 28 \end{pmatrix}$	10 МГц жиілігінде, T = 300 К; $\mu \approx 1$ (диамагнитті); мөлдірлігі: 0.4–5.0 мкм; конгруэнтті монокристалл; жиілік 1 кГц–100 МГц тұрақты (электрооптикалық модуляторлар, беттік акустикалық толқын фильтрлері).
BaTiO ₃ (тетрагональды)	$\begin{pmatrix} 2000 & 0 & 0 \\ 0 & 2000 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{pmatrix}$	10 МГц жиілігінде, T = 300 К; $\mu \approx 1$ (диамагнитті); мөлдірлігі: 0.5–6.0 мкм; монодоменді монокристалл (фоторефрактивті құрылғылар, конденсаторлар, кернеу басқарылатын генераторлар).
KNbO ₃ (ортормбтық)	$\begin{pmatrix} 680 & 0 & 0 \\ 0 & 980 & 0 \\ 0 & 0 & 220 \end{pmatrix}$	10 МГц жиілігінде (негізгі резонанс), T = 295 К; $\mu \approx 1$ (диамагнитті); мөлдірлігі: 0.4–5.0 мкм; монодоменді монокристалл (екінші гармоника генерациясы, электрооптикалық модуляторлар).
Sb ₂ S ₃ (стибнит) (ортормбтық)	$\begin{pmatrix} 9.0 & 0 & 0 \\ 0 & 12.0 & 0 \\ 0 & 0 & 15.0 \end{pmatrix}$	10 МГц жиілігі төменгі диапазон (мәндер оптикалық диапазоннан, $\lambda = 600$ нм); T = 300 К; $\mu \approx 1$ (диамагнитті); мөлдірлігі: 0.8–7.0 мкм (ЖШҚ); монокристалл (фотоника, оптоэлектроника).

Материал	Диэлектрлік өтімділік тензоры ($\hat{\epsilon}$)	Сипаттамасы (өлшеу шарттары, қасиеттері және қолданылуы)
GdScO ₃ (GSO) (ортормбтық)	$\begin{pmatrix} 22.7 & 0 & 0 \\ 0 & 19.3 & 0 \\ 0 & 0 & 28.1 \end{pmatrix}$	0.2–1 ТГц диапазонында өлшенген (статикалық шек, 10 МГц-те мәндер тұрақты деп болжанады); T = 300 К; $\mu \approx 1$ (диамагнитті); мөлдірлігі: 0.4–6.0 мкм; монокристалл (суб-терагерцтік электроника, жоғары жиілікті қосымшалар).
TbScO ₃ (TSO) (ортормбтық)	$\begin{pmatrix} 21.6 & 0 & 0 \\ 0 & 18.1 & 0 \\ 0 & 0 & 30.3 \end{pmatrix}$	0.2–1 ТГц диапазонында өлшенген (статикалық шек, 10 МГц-те мәндер тұрақты деп болжанады); T = 300 К; $\mu \approx 1$ (диамагнитті); мөлдірлігі: 0.4–6.0 мкм; монокристалл (суб-терагерцтік электроника, жоғары жиілікті құрылғылар).
DyScO ₃ (DSO) (ортормбтық)	$\begin{pmatrix} 20.3 & 0 & 0 \\ 0 & 17.4 & 0 \\ 0 & 0 & 31.1 \end{pmatrix}$	0.2–1 ТГц диапазонында өлшенген (статикалық шек, 10 МГц-те мәндер тұрақты деп болжанады); T = 300 К; $\mu \approx 1$ (диамагнитті); мөлдірлігі: 0.4–6.0 мкм; монокристалл (суб-терагерцтік электроника, жоғары жиілікті қосымшалар).

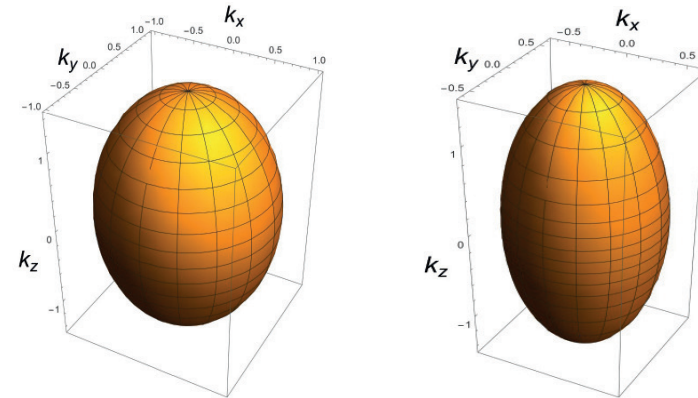
Кестедегі кейбір материалдар үшін әр түрі жиіліктерде қалыпты және аномальді сәулелері үшін толқындық векторының индикатрисалары төменгі суреттерде келтірілген (1–5-суреттері).



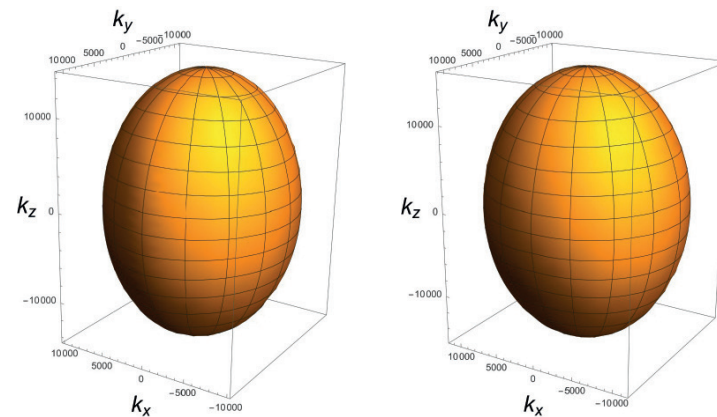
1-сурет – CaTiO₃ (орторомбтық) ($\omega = 10^4, 10^7$ және 10^8 Гц)



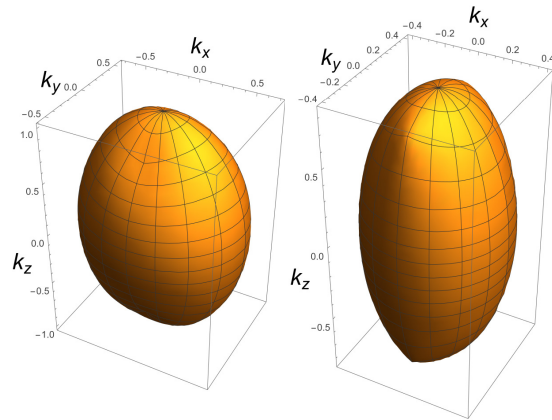
2-сурет – TiO₂ (рутил) (тетрагональды), $\omega = 10^7$ Гц



3-сурет – BaTiO₃ (тетрагональды), $\omega = 10^7$ Гц



4-сурет – GdScO₃ (GSO) (орторомбтық), $\omega = 10^{12}$ Гц



5-сурет – KNbO₃ (ортормбтық), $\omega = 10^7$ Гц

Нәтижелер және талқылау

Матрицант әдісі негізінде алынған модификацияланған дисперсия теңдеулері (3)–(9) және ұзын толқынды жуықтаудағы ($\lambda \gg h$) орташаланған матрицанттың аналитикалық өрнегі (16)–(17) периодты біртекті анизотропты орталардың электродинамикалық қасиеттерін зерттеуге мүмкіндік береді. Осы теориялық нәтижелерді нақты кристалдарға қолдану үшін (21) теңдеуімен берілген толқындық вектордың индикатриса теңдеуі пайдаланылды. Бұл теңдеу сфералық координаттарда диэлектрлік тензор компоненттері мен жиілікке байланысты толқындық вектордың бағыттық таралуын сипаттайды. Индикатриса пішіні толығымен диэлектрлік тензордың құрылымымен анықталады және оның симметриясы (6) дисперсия теңдеулері түбірлерінің симметриясымен толық сәйкес келеді.

1-кестеде келтірілген әртүрлі кристалдардың диэлектрлік тензорлары үшін (21) теңдеуі бойынша есептелген индикатрисалар (1–5-суреттер) төмендегідей заңдылықтарды көрсетті.

Ортормбтық кристалдар (CaTiO₃, KNbO₃, GdScO₃, TbScO₃, DyScO₃, Sb₂S₃). Бұл кристалдарда диэлектрлік тензордың үш диагональды компоненті әртүрлі. CaTiO₃ үшін $\epsilon_{xx} = 150$, $\epsilon_{yy} = 120$, $\epsilon_{zz} = 140$ мәндері 10^4 – 10^8 Гц диапазонында индикатриса пішінінің тұрақтылығын қамтамасыз етеді (1-сурет), бұл осы жиіліктерде диэлектрлік дисперсияның болмауымен және (13)–(15) ұзын толқынды жуықтаудың орындалуымен түсіндіріледі. Редкоземельді скандаттарда (GdScO₃, TbScO₃, DyScO₃) компоненттер мәндерінің жақындығы (шамамен 18–31) индикатрисаның сферадан аз ғана ауытқуына әкеледі (4-сурет), бұл олардың суб-терагерцтік электроникада қолданылуына қолайлы. KNbO₃ кристалы ерекше жағдайды көрсетеді:

$\epsilon_{yy} = 980$ мәні $\epsilon_{xx} = 680$ және $\epsilon_{zz} = 220$ -ден айтарлықтай жоғары. Бұл (18) сипаттамалық теңдеудің түбірлерінің ерекше қатынасына әкеліп, индикатриса пішінінің басқа ортормбтық кристалдардан өзгешеленуіне себеп болады (5-сурет). Мұндай пішін материалдың күшті анизотропиясын және поляризацияның басым бағытын көрсетеді.

Тетрагональды кристалдар (TiO₂, BaTiO₃). Бұл кристалдарда $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy}$ теңдігі орындалады. TiO₂ (рутил) үшін $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 86$, $\epsilon_{zz} = 170$ болғандықтан, (21) теңдеуі бойынша есептелген индикатриса осі бойымен созылық пішінге ие (2-сурет). Керісінше, BaTiO₃-те $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 2000$, $\epsilon_{zz} = 500$ мәндері индикатрисаның Z осі бойымен қысыңқы болуына әкеледі (3-сурет). Бұл айырмашылық диэлектрлік тензор компоненттерінің арақатынасына байланысты және (6) дисперсия теңдеулерінің түбірлерінің симметриясымен толық сәйкеседі.

Тригональды кристалдар (LiNbO₃, LiTaO₃). Бұл жағдайда да $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy}$ теңдігі сақталады. LiNbO₃ үшін $\epsilon_{xx} = 84$, $\epsilon_{zz} = 28$ мәндері индикатрисаның Z осі бойымен қатты қысыңқы екенін көрсетеді, бұл оның электрооптикалық құрылғыларда қолданылу ерекшеліктерімен байланысты.

Барлық зерттелген кристалдардың диамагниттілігі ($\mu \approx 1$) магнит өтімділігінің толқын таралуына әсерін елемеге мүмкіндік берді, бұл (1)–(2) Максвелл теңдеулерінің матрицант түріндегі жазбасын жеңілдетті. Мөлдірлік диапазоны (0.4–7.0 мкм) бұл кристалдардың оптикалық және инфрақызыл аймақта жұмыс істейтін құрылғыларда қолданылу мүмкіндігін кеңейтеді.

Қорытынды

Мақалада матрицант әдісі негізінде периодты біртекті анизотропты орталарда электромагниттік толқындардың таралуын сипаттайтын модификацияланған дисперсия теңдеулері (3)–(9) алынды. Бұл теңдеулер сипаттамалық теңдеудің дәрежесін төмендетуге және оның түбірлерінің симметриясын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Ұзын толқын ұзындығындағы жуықтау шегінде орта матрицантының аналитикалық өрнегі (16)–(17) алынды, ол периодты құрылымды эквивалентті біртекті анизотропты ортамен алмастыруға мүмкіндік береді.

Осы теориялық нәтижелердің дұрыстығы нақты кристалдар мысалында тексерілді. (21) теңдеуі бойынша есептелген толқындық вектордың индикатрисалары диэлектрлік тензор компоненттерінің арақатынасына тәуелді пішіндерді көрсетті: CaTiO₃, TiO₂, BaTiO₃, LiNbO₃ және басқа кристалдар үшін индикатрисалар олардың кристаллографиялық симметриясына сәйкес сипаттамалық пішіндерге ие. KNbO₃ мысалында диэлектрлік анизотропияның күштілігіне байланысты индикатриса пішінінің ерекшеленетіні байқалды.

Алынған нәтижелер матрицант әдісінің төмен симметриялы кристалдардағы толқындық процестерді модельдеуге қолданылу мүмкіндігін көрсетеді және оны фотондық кристалдар, метаматериалдар сияқты күрделі периодты құрылымдардың дисперсиялық қасиеттерін зерттеуге қолдануға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М.** Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред. – 2-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 621 с.
- 2 **Ашкрофт, Н.** Физика твердого тела. Том 1 / Н. Ашкрофт, Н. Мермин; перевод с английского А. В. Чаплицкой, Р. В. Галиулина, Ю. А. Данилова; под редакцией А. М. Фермана. – М. : Мир, 1979. – 399 с.
- 3 **Тлеукунов, С. К.** Метод матрицанта. Павлодар : НИЦ. ПГУ им. С. Торайгырова, 2004. – 148 с.
- 4 **Бриллюэн, Л.** Распространение волн в периодических структурах / Л. Бриллюэн, М. Пароди; перевод с французского Ю. В. Рождественского, Б. С. Неупокоева; под редакцией И. И. Гольдмана. – М. : Издательство иностранной литературы, 1959. – 341 с.
- 5 **Joannopoulos, J. D., Johnson S. G., Winn J. N., Meade R. D.** Photonic Crystals Molding the Flow. 2nd Edition. – Princeton University Press, 2008. – 305 p.
- 6 **Sakoda, K.** Optical Properties of Photonic Crystals. – Berlin : Springer, 2005. – 251 p.
- 7 **Молотков, Л. А.** Матричный метод в теории распространения волн в слоистых упругих и жидких средах / Л. А. Молотков ; отв. ред. А. П. Осколков; АН СССР, Ленинградское отделение Математического института им. В. А. Стеклова. – Ленинград : Наука. Ленинградское отд-ние, 1984. – 201 с.
- 8 **Ispulov, N. A. Qadir, A., Shah, M. A., Seythanova, Ainur K., Kissikov, T. G., Arinov, E.** Reflection of thermoelastic wave on the interface of isotropic half-space and tetragonal syngony anisotropic medium of classes 4, 4/m with thermomechanical effect // CHINESE PHYSICS B, Number of article: 038102. – 2016. – <https://doi.org/10.1088/1674-1056/25/3/038102>.
- 9 **Ispulov, N. A. Qadir, A., Zhukenov, M. K., Arinov, E.** The Propagation of Thermoelastic Waves in Anisotropic Media of Orthorhombic, Hexagonal, and Tetragonal Syngonies // Advances in Mathematical Physics, Number of article : 4898467. – 2017. – <https://doi.org/10.1155/2017/4898467>

- 10 **Курманов, А. А., Испулов, Н. А., Жумабеков, А. Ж.** О распространении электромагнитных волн в неподвижных анизотропных средах // Вестник Торайгыров университета. Серия физика, математика и компьютерные науки. – № 2. – 2024. – С. 56–68.
- 11 Физические величины : справочник / А. П. Баби́чев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский [и др.] ; под общ. ред. И. С. Григорьевы, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232.
- 12 **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – Издание четвертое, доп. – М. : Наука, 1988. – 548 с.
- 13 **Lemanov, V. V., Sotnikov, A. V., Smirnova, E. P., Wehnacht, M., Kunze, R.** Perovskite CaTiO₃ as an incipient ferroelectric // Solid State Communications. – 1999. – 110(11). – P. 611–614. – [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(99\)00153-2](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(99)00153-2).
- 14 **Bhadala, F., Suthar, L., Roy, M., Jha, V. K.** Dielectric and transport properties of CaTiO₃ // AIP Conference Proceedings. – 2018. – 1953(1). – 050028. – <https://doi.org/10.1063/1.5032683>.
- 15 Calcium titanate. Wikipedia. [Electronic resource]. – <https://en.wikipedia.org/wiki/CaTiO3> (Accessed: 2026).

REFERENCES

- 1 **Landau L. D., Lifshicz E. M.** Teoreticheskaya fizika. E`lektrodinamika sploshny`x sred. – 2-e izd., ispr. – Moscow : Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1982. – 621 p.
- 2 **Ashcroft N.** Fizika tverdogo tela. Tom 1 / N. Ashcroft, N. Mermin ; perevod s anglijskogo A. V. Chapliczkoy, R. V. Galiulina, Yu. A. Danilova ; pod redakciej A. M. Fermana. – Moscow : Mir, 1979. – 399 p.
- 3 **Tleukenov S. K.** Metod matriczanta. Pavlodar: NICz. PGU im. S. Torajgy`rova, 2004. – 148 p.
- 4 **Brillyue`n L.** Rasprostranenie voln v periodicheskix strukturax / L. Brillyue`n, M. Parodi ; perevod s francuzskogo Yu. V. Rozhdestvenskogo, B. S. Neupokoeva ; pod redakciej I. I. Gol`dmana. – Moscow : Izdatel`stvo inostranoj literatury`, 1959. – 341 p.
- 5 **Joannopoulos, J. D., Johnson S. G., Winn J. N., Meade R. D.** Photonic Crystals Molding the Flow. 2nd Edition. – Princeton University Press, 2008. – 305 p.
- 6 **Sakoda, K.** Optical Properties of Photonic Crystals. – Berlin : Springer, 2005. – 251 p.
- 7 **Molotkov, L. A.** Matrichny`j metod v teorii rasprostraneniya voln v sloisty`x uprugix i zhidkix sredax / L. A. Molotkov ; отв. ред. А. П. Осколков ;

AN SSSR, Leningradskoe otdelenie Matematicheskogo instituta im. V. A. Steklova. – Leningrad : Nauka. Leningradskoe otd-nie, 1984. – 201 p.

8 **Ispulov, N. A. Qadir, A., Shah, M. A., Seythanova, Ainur K., Kissikov, T. G., Arinov, E.** Reflection of thermoelastic wave on the interface of isotropic half-space and tetragonal syngony anisotropic medium of classes 4, 4/m with thermomechanical effect // CHINESE PHYSICS B, Number of article: 038102. – 2016. – <https://doi.org/10.1088/1674-1056/25/3/038102>.

9 **Ispulov, N. A. Qadir, A., Zhukenov, M. K., Arinov, E.** The Propagation of Thermoelastic Waves in Anisotropic Media of Orthorhombic, Hexagonal, and Tetragonal Syngonies // Advances in Mathematical Physics, Number of article: 4898467. – 2017. – <https://doi.org/10.1155/2017/4898467>

10 **Kurmanov, A. A., Ispulov, N. A., Zhumabekov, A. Zh.** О распространении электромагнитных волн в неподвижных анизотропных средах // Vestnik Torajgyrov universiteta. Seriya fizika, matematika i komp'yuternye nauki – № 2. – 2024. – P. 56–68.

11 Fizicheskie velichiny' : spravochnik / A. P. Babichev, N. A. Babushkina, A. M. Bratkovskij [i dr.] ; pod obshh. red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Mejlixova. – Moscow : E'nergoatomizdat, 1991. – 1232.

12 **Gantmaxer F. R.** Teoriya matricz / F. R. Gantmaxer. – Izdanie chetvertoe, dop. – Moscow : Nauka, 1988. – 548 p.

13 **Lemanov, V. V., Sotnikov, A. V., Smirnova, E. P., Wehnacht, M., Kunze, R.** Perovskite CaTiO₃ as an incipient ferroelectric // Solid State Communications 1999. – 110(11). – P. 611–614. – [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(99\)00153-2](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(99)00153-2).

14 **Bhadala, F., Suthar, L., Roy, M., Jha, V. K.** Dielectric and transport properties of CaTiO₃ // AIP Conference Proceedings. – 2018. – 1953(1). – 050028. – <https://doi.org/10.1063/1.5032683>.

15 Calcium titanate. Wikipedia. [Electronic resource]. – <https://en.wikipedia.org/wiki/CaTiO3> (Accessed: 2026).

29.01.26 ж. баспаға түсті.

24.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*A. A. Курманов¹, Н. А. Испулов², *А. Ж. Жумабеков³, А. К. Жанатов⁴*

^{1,2,3,4}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 29.01.26.

Поступило с исправлениями 24.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

ОБ УРАВНЕНИЯХ ДИСПЕРСИИ И ИНДИКАТРИС ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В НЕПОДВИЖНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Статья посвящена исследованию распространения электромагнитных волн в периодических неоднородных анизотропных средах с использованием метода матрицанта. Рассматривается применение теории Блоха и анализ внутренней структуры матрицантов для получения модифицированных дисперсионных уравнений, позволяющих уменьшить порядок характеристического уравнения и обеспечить симметрию его корней. Такой подход существенно упрощает анализ волновых процессов в сложных анизотропных структурах и повышает эффективность аналитического моделирования. С использованием полиномов Чебышёва–Гегенбауэра предложен метод аналитического вычисления матрицы монодромии для конечного числа периодов среды. В длинноволновом приближении получено явное выражение матрицанта усреднённой среды. На основе этого выражения вычислены индикатрисы волнового вектора для ряда сильно анизотропных кристаллов, включая CaTiO₃, TiO₂, LiNbO₃, BaTiO₃, KNbO₃, Sb₂S₃, GdScO₃, TbScO₃ и DyScO₃. Показано, что форма индикатрисы существенно зависит от соотношения компонент диэлектрического тензора. В частности, для кристалла KNbO₃ выявлены характерные особенности формы индикатрисы, обусловленные высокой степенью анизотропии. Полученные результаты демонстрируют эффективность метода матрицанта при моделировании волновых процессов в кристаллах с низкой симметрией и могут быть использованы при исследовании фотонных кристаллов, метаматериалов и различных оптоэлектронных устройств.

Ключевые слова: матрицант, уравнения дисперсии, периодически неоднородная среда, анизотропная среда, индикатриса волнового вектора, теория Блоха, длинноволновое приближение, электромагнитные волны, кристаллы низких сингоний.

A. A. Kurmanov¹, N. A. Ispulov², A. Zh. Zhumabekov³, A. K. Zhanatov⁴

^{1,2,3,4}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 29.01.26.

Received in revised form 24.02.26.

Accepted for publication 19.03.26.

ON DISPERSION AND INDICATRICE EQUATIONS FOR ELECTROMAGNETIC WAVES IN FIXED ANISOTROPIC MEDIA

The article investigates the propagation of electromagnetic waves in periodic inhomogeneous anisotropic media using the matrixant method. The study applies Bloch theory together with an analysis of the internal structure of matrixants to obtain modified dispersion equations that reduce the order of the characteristic equation and ensure symmetry of its roots. This approach significantly simplifies the analysis of wave processes in complex anisotropic structures and improves the efficiency of analytical modeling. By employing Chebyshev–Gegenbauer polynomials, a method for the analytical calculation of the monodromy matrix for a finite number of periods of the medium is proposed. Within the long wavelength approximation an explicit expression for the matrixant of the averaged medium is obtained. Based on this expression the wave vector indicatrices are calculated for several strongly anisotropic crystals including CaTiO_3 , TiO_2 , LiNbO_3 , BaTiO_3 , KNbO_3 , Sb_2S_3 , GdScO_3 , TbScO_3 and DyScO_3 . It is shown that the shape of the indicatrix strongly depends on the ratio of the dielectric tensor components. The obtained results demonstrate the effectiveness of the matrixant method for modeling wave processes in low symmetry crystals and for studying photonic crystals, metamaterials and optoelectronic devices.

Keywords: matrixant, dispersion equations, periodically inhomogeneous medium, anisotropic medium, wave vector indicatrix, Bloch theory, long-wavelength approximation, electromagnetic waves, low-symmetry crystals.

FTAMP 29.19.39

<https://doi.org/10.48081/BGQF1895>

**Т. Б. Қоштыбаев¹, *К. Қ. Жантлеуов², Б. Ә. Камал³,
М. Е. Алиева⁴, Ұ. Б. Құрбанғалиев⁵**

^{1,5}Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{2,3,4}Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6658-1165>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6056-5427>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8811-4488>

*e-mail: Kzhanleuov@mail.ru

СПИНДІК ТОЛҚЫНДАРДЫҢ МАКРОСКОПТЫҚ ЖӘНЕ КВАНТТЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада магниттік реттілікті жүйедегі спиндік толқындардың макроскоптық, кванттық қасиеттері және олардың қолданылу механизмдеріне қатысты теориялық зерттеулер ұсынылған. Магниттік момент пен магнит өрістерінің тербелісі Фурье бейнеде қарастырылып, магнит қабылдағыштықтың уақыттық-кеңістіктік дисперсиясы Максвелл теңдеулерінің көмегімен шығарылған. Магнитостатикалық жуықтаулар арқылы спиндік толқындардың спектрінанықтайтын дисперсиялық теңдеуді алу жолдары ұсынылды. Спиндік толқындардың әлсіреу (өшу) механизмдері мен олардың параметрлік қоздырылуы қарастырылды. Қозғалыс теңдеуінің көмегімен магниттік момент тығыздығының біртекті және біртекті тербелістерінің өзара байланыстары бағаланды. Есептеулер кезінде магниттік анизотроптық энергия ескерілмеді, сонымен бірге толқындық вектор нөлге тең және нөлге тең емес деп алынды. Ферромагнетиктен өтетін ауыр және жеңіл бөліктердің шоғыры (сәулесі) арқылы спиндік толқындарды қоздыру және оларды күшейту мәселесі гидродинамиканың негізгі теңдеуі арқылы шешілді. Бұл теңдеу арқылы шоғырдағы жеңіл бөліктердің концентрациясы мен жылдамдықтарының кеңістік пен уақыт бойынша өзгерістері тексерілді. Эйлерлік координаталарда ферромагнетиктің бірлік массасына келетін

серпінділік күші мен ферромагнетик энергиясының тығыздығы магнитостатика теңдеулері мен үзіліссіздік теңдеуі арқылы анықталды. Ферромагнетиктің потенциалдық энергиясының тығыздығы мен эффективті магнит өрісіне арналған өрнектер әйлерлік және лагранждық координаталардың инварианттары арқылы жазылды. Өзара әсерлесуші екі магноннан тұратын жүйедегі байланысқан күйлер ферромагнетиктің гамильтонианы мен импульстік көріністегі екі магнондық толқындық функцияға арналған Шредингер теңдеуімен зерттелді. Жекелеген атомдар спиндерінің бағыттарының арасындағы күшті корреляциялар спиндердің корреляциялық функциялары арқылы сипатталды, олар Фурье құраушылар мен Грин функциясы арқылы өрнектелді.

Кілтті сөздер: спиндік толқындар, магниттік момент, магнондар, ферромагнетик, дисперсиялық теңдеу, магнитостатика теңдеулері, әйлерлік және лагранждық координаталар.

Кіріспе

Магниттік материалдарда кездесетін тербелістер мен толқындық процестерді зерттеу қатты денелер физикасындағы маңызды бағыттардың бірегейі болып табылады. Ферромагниттердегі аса жоғары жиілікті толқындық құбылыстарға жасалған іргелі зерттеулердің нәтижелері спинді-толқындық электрониканың қалыптасып, дамуына себепші болды. Мұндай құралғылардың жұмыс істеу принциптері ферромагниттердегі когеренттік аса жоғары жиілікті спиндік толқындардың пайда болуына, таралуына және оларды тіркеуге негізделген. Сонымен бірге, спиндік толқындар магнит өрісін анықтауға да мүмкіндік береді. Магнондар деп аталатын спиндік толқындар—ферромагнетиктердегі, антиферромагнетиктердегі және ферримагнетиктердегі (магнитті реттілік заттардағы) электрондар спиндерінің бағыттарының өзгеруіне негізделген ұжымдық гармоникалық тербелістердің немесе атомдардың магниттік моменттері тербелістерінің таралуы. Атомдар арасындағы өте күшті әсерлесулер салдарынан олардың магниттік моменттерінің қалыпты бағыттан ауытқулары кристалл ішінде толқын түрінде тарай алады. $T = 0$ К температурада атомдардың магниттік моменттері бірдей бағыттылықта болғандықтан, кристалда магнондарды табу қиын [1]. Ал, температура жоғарылаған сайын олардың концентрациясы $T^{\frac{3}{2}}$ заңдылығына сәйкес арта бастайды. Магнондар нидерландық физик Петер Дебай ұсынған дыбыс кванттары—фонондар секілді кристалдағы спиндік ішкі жүйелердің динамикасын анықтауға мүмкіндік береді. Кванттық механиканың корпускулалы-бөлшектік принципіне сәйкес, спиндік толқындар қатарындағы магнондар квазибөлшектер тобына да

кіреді. Сондықтан да, кристалдардың төменгі температуралардағы жоғары жиілікті, термодинамикалық және кинетикалық қасиеттерін осы толқындар арқылы сипаттау ыңғайлырақ. Сонымен бірге, магнондардың да магниттік моменті болғандықтан, әрине олар Бозе-Эйнштейн статистикасына бағынады және бұл жағдай кристалдардың магниттік және жылулық қасиеттерін осы толқындар арқылы зерттеуге мүмкіндік береді. Магниттік табиғаты бар спиндік толқындардың таралуын қарастыру үшін магнитостатикалық әсерлесулермен бірге атомдар арасындағы алмасымдық әсерлесулердің де маңызы зор.

Материалдар мен әдістері. Спиндік толқындарды теориялық және тәжірибелік сипаттағы әдістердің көмегімен зерттеуге болады. Ұсынылып отырған мақалада толқындардың маңызды деген макроскоптық және кванттық қасиеттері теориялық тәсіл бойынша талдаулық-сараптамалық есептеулер арқылы зерттелетін болады. Жалпы айтқанда, сызықтық теория, Ландау-Лифшиц теңдеулері және т.б. теориялық зерттеу әдістері спиндік толқындарды модельдеу мен оларға талдау жасау бағыттарын қамтиды [1,2]. Тәжірибелік тәсіл спиндік толқындарды бақылау, олардың сипаттамаларына өлшеулер жүргізумен айналысса, зондтық тәсіл, фазалық ығысуларды өлшеу тәсілдері, кеңістіктік Фурье-талдау және оптикалық әдістер де спиндік толқындар туралы мол ақпараттар алуға мүмкіндік береді. Қазіргі кезеңде қысқа лазерлік импульстік тәсіл арқылы спиндік толқындарды басқару қолға алынған. Спиндік толқындардың таралуы кезінде зат тасымалданбайтын болғандықтан, оларды көбіне мәліметтерді тасымалдау мақсатында қолданған ыңғайлырақ. Осы тәсілдің бұған дейін қолданылып келген электрондық тәсілдерге қарағанда термиялық шығыны жағынан аз тәсілге жатады: жіберілетін немесе берілетін мәлімет толқынның фазасына (немесе амплитудасына) кодталады да, интерференцияның көмегімен бұл мәліметтер өңделіп (ажыратып) алынады. Магнондардың қатысуымен өтетін логикалық элементтердің жұмыс істеу принципі де осындай идеяға негізделген. Сонымен бірге, спиндік толқындарды оптикалық тәсілдер арқылы қоздырып, толқындар туғызатын әртүрлі параметрлерді басқарып отыру бүгінгі күнгі өзекті зерттеу нысандарының бірегейіне айналып отыр.

Нәтижелер және талқылау

Біз ферромагнетиктің магниттік моменті тығыздығының ($\vec{M}(\vec{r}, t)$) тепе-

теңділік \vec{M}_0 мәнінен ауытқуын $\vec{m}(\vec{r}, t)$, ал магнит өрісінің ($\vec{H}(\vec{r}, t)$) тепе-

теңділік мәннен (\vec{H}_0) ауытқуын $\vec{h}(\vec{r}, t)$ деп белгілеу арқылы $\vec{M}(\vec{r}, t)$ және

$\vec{H}(\vec{r}, t)$ шамаларының тербелістерін қарастыратын боламыз. Бұл жерде $\vec{m}(\vec{r}, t)$ және $\vec{h}(\vec{r}, t)$ ауытқулары (ығысулары) өзара төмендегі теңдеу арқылы байланысқан:

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = g \left[\vec{M}_0 \left[\vec{h} + \alpha_{ik} \frac{\partial^2 \vec{m}}{\partial x_i \partial x_k} + \beta \vec{n} (\vec{m} \vec{n}) - \frac{1}{M_0^2} \left(\vec{M}_0 \vec{H}_0 + \beta (\vec{M}_0 \vec{n})^2 \right) \vec{m} \right] \right] \quad (1)$$

Мұндағы $g = \frac{2\mu}{\hbar}$; $\mu = \frac{e\hbar}{2m_e c}$ – Бор магнетоны; β – температураға тәуелді болатын магниттік анизотропия тұрақтысы; \vec{n} – анизотропиялық осьтің бойындағы бірлік вектор. $\vec{m}(\vec{r}, t)$ және $\vec{h}(\vec{r}, t)$ ығысуларының Фурье құраушылары:

$$\vec{m}(\vec{r}, t) = \int \vec{m}(\vec{k}, \omega) \exp(i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)) d\vec{k} d\omega$$

$$\vec{h}(\vec{r}, t) = \int \vec{h}(\vec{k}, \omega) \exp(i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)) d\vec{k} d\omega$$

Мұндағы ω – магниттік моменттің өзгеру жиілігі. Осы жазылған интегралдық өрнектерді ескеріп, (1)–ді түрлендіріп жазуға болады:

$$-i\omega \vec{m}(\vec{k}, \omega) = g \left[\vec{M}_0 \left[\vec{h}(\vec{k}, \omega) - \left\{ \alpha_{ij} k_i k_j + \frac{\vec{M}_0 \vec{H}_0}{M_0^2} + \beta \frac{(\vec{M}_0 \vec{n})^2}{M_0^2} \right\} \vec{m}(\vec{k}, \omega) + \beta \vec{n} (\vec{n} \vec{m}(\vec{k}, \omega)) \right] \right]$$

Бұл теңдеудегі $\vec{m}(\vec{k}, \omega)$ және $\vec{h}(\vec{k}, \omega)$ – Фурье құраушылары, олар өзара мына түрде байланысқан:

$$m_a(\vec{k}, \omega) = \lambda_{ij} h_b(\vec{k}, \omega) \quad (2)$$

Мұндағы

$$\lambda_{ij}(\vec{k}, \omega) = \begin{pmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\lambda_{xx} = \frac{g\Phi_1 M_0}{\Phi_1 \Phi_2 - \omega^2}, \quad \lambda_{yy} = \frac{g\Phi_2 M_0}{\Phi_1 \Phi_2 - \omega^2}, \quad \lambda_{xy} = \frac{i\omega g M_0}{\Phi_1 \Phi_2 - \omega^2}$$

$$\Phi_1 = gM_0 \left(\alpha_{ij} k_i k_j + \frac{\vec{M}_0 \vec{H}_0}{M_0^2} + \beta \cos^2 \theta \right),$$

$$\Phi_2 = gM_0 \left(\alpha_{ij} k_i k_j + \frac{\vec{M}_0 \vec{H}_0}{M_0^2} + \beta \cos 2\theta \right)$$

θ – \vec{n}, \vec{M}_0 векторларының арасындағы бұрыш; z осьі \vec{M}_0 бойымен, ал x осьі \vec{n}, \vec{M}_0 векторлары арқылы құрылған жазықтықта орналасқан [3, 4]. $\lambda_{ij}(\omega, \vec{k})$ – ферромагнетиктің жоғары жиілікті магнит қабылдағыштықтензоры, оның жиілік (ω) пен толқындық векторға (\vec{k}) тәуелді болуы ферромагнетиктерде магнит қабылдағыштықтың уақыттық–кеңістіктік дисперсия орын алатындығын білдіреді. Спиндік толқын жиілігінің толқындық векторға тәуелділігін анықтау үшін магниттік моменттің теңдеуін және $\vec{m}(\vec{r}, t)$, $\vec{h}(\vec{r}, t)$ шамаларына арналған Максвелл теңдеулерін пайдалану керек болады. Алайда, спиндік толқындар төменгі жиіліктегі магниттік толқындар болғандықтан, олар үшін электр өрісін ескермеуге болады және магнит өрісін құйынсыз деп алу жеткілікті [5]. Басқаша айтқанда, спиндік толқындарды магнитостатикалық жуықтаулар бойынша зерттеген ыңғайлы, яғни $\vec{m}(\vec{r}, t)$, $\vec{h}(\vec{r}, t)$ шамалары үшін төмендегі теңдеулерді қолдану тиімді:

$$\text{rot} \vec{h}(\vec{r}, t) = 0, \quad \text{div} \vec{h}(\vec{r}, t) = -4\pi \text{div} \vec{m}(\vec{r}, t)$$

$\vec{m}(\vec{r}, t)$ және $\vec{h}(\vec{r}, t)$ шамаларының Фурье құраушыларына көшсек,

онда

$$\vec{k} \vec{h}(\vec{k}, \omega) = 0, \quad \vec{k} \vec{h}(\vec{k}, \omega) = -4\pi \vec{k} \vec{m}(\vec{k}, \omega) \quad (4)$$

(4)–гі бірінші теңдеуден $\vec{h}(\vec{k}, \omega)$ –тың \vec{k} –ға параллель екендігін байқау қиын емес: $\vec{h}(\vec{k}, \omega) = -i\vec{k}\tau(\vec{k}, \omega)$, мұндағы $\tau(\vec{k}, \omega)$ –магниттік потенциалдың Фурье құраушысы. (4)–тің екінші теңдеуін түрлендіріп жазайық: $(k^2 + 4\pi k_i k_j \lambda_{ij}(\vec{k}, \omega))\tau(\vec{k}, \omega) = 0$, осыдан: $k^2 + 4\pi k_i k_j \lambda_{ij}(\vec{k}, \omega) = 0$

Толқын жиілігінің толқындық векторға тәуелділігін және ферромагнетиктегі спиндік толқындардың спектрін анықтап беретін бұл теңдеу дисперсиялық теңдеу деп аталады [6]. Егер (3)–теңдікті ескерсек, онда

$$1 + \frac{4\pi g M_0 \Phi_1}{\Phi_1 \Phi_2 - \omega^2} \cdot \frac{k_x^2}{k^2} + \frac{4\pi g M_0 \Phi_2}{\Phi_1 \Phi_2 - \omega^2} \cdot \frac{k_y^2}{k^2} = 0,$$

осыдан

$$\omega(\vec{k}) = \sqrt{\Phi_1 \Phi_2 + 4\pi g M_0 (\Phi_1 \cos^2 \zeta_1 + \Phi_2 \sin^2 \zeta_2) \sin^2 \zeta_2} \quad (5)$$

ζ_2 және ζ_1 символдары арқылы \vec{k} векторының азимуталдық және полярлық бұрыштары белгіленген. $\alpha k^2 = 1$ шартында спиндік толқындардың жиілігіне арналған (5)–ші теңдеу едәуір ықшамды түрге келеді:

$$\omega(\vec{k}) = g M_0 \alpha_j k_i k_j$$

Ал, изотроптық жағдайда бұл формула мынадай түрді қабылдайды:

$$\omega(\vec{k}) = \frac{T}{\hbar} (\alpha k)^2$$

мұндағы $T = \frac{\hbar g M_0}{\alpha^2}$. Спиндік толқындар бір–бірімен, кристалдық

тордың тербелісімен (фонондармен) және электрондармен әсерлескен кезде әлсірейді, яғни олар өздерінің энергиясын жоғалтады, бұл жағдай өз кезегінде толқын амплитудасының кемуіне жеткізеді. Толқындардың

ферромагнетиктің құрылымындағы ақаулардан шашырауы да олардың әлсіреуіне себепкер болады.

Айнымалы біртекті магнит өрісі ($\vec{M}(\vec{r}, t)$) шамасының біртекті

тербелістеріне ғана себепші бола алады. Бұл жағдайды жоғарыда келтірілген теориялық зерттеулерден байқау қиын емес. Шынында да, магниттік момент тығыздығына арналған сызықты емес қозғалыс теңдеуіне сәйкес біртекті тербелістер біртекті тербелістермен байланысты [7], сондықтан да біртекті магнит өрісі біртекті және біртекті тербелістерді бірдей қоздыра алады десек те болады. Бұл спиндік толқындардың параметрлік қоздырылуы деп аталады. Магниттік момент тығыздығының біртекті тербелістерінің біртекті тербелістерімен қандай түрде байланысатынын анықтау үшін қозғалыс теңдеуін $\vec{m}(\vec{r}, t)$ векторының ($\vec{m} = \vec{M} - \vec{M}_0$) тек циркулярлық $m_{xy} = m_x \pm im_y$

құраушылары үшін ғана жазуға тура келеді:

$$\dot{m}_{xy} = \pm ig (M_z H_r - H_z m_{xy}) \quad (6)$$

Мұндағы

$$H_r = H_x \pm iH_y, \quad M_z = M_0 + m_z \quad (7)$$

Бұлар эффективті магнит өрісінің құраушылары. $\vec{M}^2 = M_0^2$ болғандықтан ауытқу шамасы z осьі бағытында жіктеледі:

$$m_z = -\frac{1}{2} \frac{m_x m_y}{M_0} + \dots$$

Бұл есептеулерде магниттік анизотроптық энергия ескерілмейді, яғни эффективті магнит өрісі мына түрде алынды [8, 9]: $\vec{H} = \alpha \Delta \vec{m} + \vec{h} + \vec{H}_0$, мұндағы

\vec{h} –ферромагнетиктегі магнит өрісінің айнымалы құраушысы;

$\vec{H}_0 = \vec{H}_0^e - 4\pi \vec{N} \vec{M}_0$ (\vec{N} – z осьінің бойымен магниттеуші коэффициент). Осы

келтірілген мәліметтерді ескеріп, (7)–теңдіктерді қайта түрлендіріп жазып өтеміз:

$$H_r = \alpha \Delta m_{xy} \pm h_{yx}, \quad M_z = \alpha \Delta m_z + h_z + H_0^e$$

Момент тығыздығының қалыпты мәннен ауытқуының төменде берілген:

$$\bar{m}(\vec{r}, t) = \sum_{\vec{k}} \bar{m}(\vec{k}) \exp\{i\vec{k}\vec{r}\}, \quad \bar{m}(\vec{k}) = \frac{1}{V} \int \bar{m}(\vec{r}, t) \exp\{-i\vec{k}\vec{r}\} d\vec{r}$$

Фурьелік кеңістіктік компоненттерге (құраушыларға) көше отырып қозғалыс теңдеуін де осы $\bar{m}(\vec{k})$ –Фурье құраушылары үшін жазатын боламыз. Бұл кезде біз магнит өрісінің $\vec{h}(\vec{k})$ Фурье құраушылары мен $\bar{m}(\vec{k})$ құраушылары арасындағы байланыстарды сипаттайтын төмендегі өрнектерді ескереміз:

$$\vec{h}(\vec{k}) = -\frac{4\pi\vec{k}(\vec{k}\bar{m}(\vec{k}))}{k^2}, \quad \vec{k} \neq 0 \quad \text{және} \quad \vec{h}(\vec{k}) = \vec{h}(t) - 4\pi\vec{N}\bar{m}(0), \quad \vec{k} = 0$$

Бұл өрнектерде: $\vec{h}(t) - \vec{M}_0$ -ге перпендикуляр бағытталады және

төмендегі заңдылық бойынша анықталатын тосын магнит өрісі:

$$\vec{h}(t) = \frac{1}{2}(\vec{h}_0 \exp\{-i\omega t\} + \vec{h}_0^* \exp\{i\omega t\})$$

Алдымен, қозғалыс теңдеуін $\bar{m}_{xy}(\vec{k})$ құраушыларына арнап $\vec{k} = 0$ үшін

және біртекті тербелістер тосын өрістің ықпалымен қозғатынын ескере отырып жазайық:

$$\dot{\bar{m}}_{xy}(0) = \pm igM_0 h_{xy} \pm igM_0 \left(\frac{\vec{H}_0}{M_0} + 4\pi\vec{n} \right)$$

$\vec{k} \neq 0$ жағдайға арналған қозғалыс теңдеуі жоғарыдағыдай тек сызықтық мүшелермен ғана шектелмей, қосымша бисызықтық құраушыларды да қосып алады:

$$\dot{\bar{m}}_x(\vec{k}) = -iA_k \bar{m}_x(\vec{k}) - iB_k \bar{m}_y(\vec{k}) + G_x(\vec{k})$$

$$\dot{\bar{m}}_y(\vec{k}) = -iA_k \bar{m}_y(\vec{k}) + iB_k^* \bar{m}_x(\vec{k}) + G_y(\vec{k})$$

Бұл теңдеулерде мынадай белгілеулер жасалды:

$$A_k = \Phi + 2\pi gM_0 \frac{k_x k_y}{k^2}, \quad B_k = 2\pi gM_0 \frac{k_x^2}{k^2}, \quad \Phi = gM_0 \left(\alpha k^2 + \frac{\vec{H}_0}{M_0} \right)$$

$$G_{xy}(\vec{k}) = \pm 2\pi ig \frac{k_z}{k^2} \left\{ (m_x(0)m_y(\vec{k}) + m_y(0)m_x(\vec{k}))\vec{k}_{xy} + m_{xy}(0)(k_x m_y(\vec{k}) + k_y m_x(\vec{k})) \right\}$$

Егер ферромагнетик арқылы жылдамдығы едәуір жоғары болатын зарядталған бөлшек өтетін болса, онда ол электромагниттік және спиндік толқындарды қатар (бірмезгілде) қоздыра алуы үшін толқынның фазалық жылдамдығының бағыты мен бөлшектің \vec{v} жылдамдығының бағаты толқындық вектор бағытымен сәйкес келуі керек, яғни төмендегі резонанстық шарт орындалуы тиіс: $\vec{v}\vec{k} = \omega(\vec{k})$. Бұл шарттағы $\omega(\vec{k})$ –толық векторы \vec{k}

болатын толқынның жиілігі. Черенковтың сәуле шығаруы деп аталатын осы құбылысты бөлшектер шоғыры арқылы спиндік толқындарды күшейту үшін қолдануға болады [10, 11]. Есеретін бір жағдай, ферромагнетик арқылы өтетін бөлшектер шоғыры (мысалы, электрон) жиіліктері мынадай шартты қанағаттандыратын спиндік толқындарды ғана қоздыра алады: $\omega_\alpha(\vec{k}) = \vec{k}\vec{v}_i$

бұл жерде \vec{v}_i –шоғырдың жылдамдығы. Спиндік толқындардың амплитудасының артуына жауапты күшейту коэффициенті шоғырдағы бөлшектердің n концентрациясына тәуелді. Шоғырдағы бөлшектердің жылулық қозғалыстары ескерілмейді және \vec{v}_i , n шамалары уақытқа да, координатаға да байланысты емес. Осы жағдай ферромагнетиктегі тұрақты магнит өрісінің әсерінен өзгеріп кетпес үшін шоғырдың жылдамдығы магнит индукция векторының тұрақты \vec{B}_α құраушысының бағытымен бағыттас деп есептейміз. Сонымен бірге, шоғырдағы ауыр бөлшектер үшін \vec{v}_i , n шамалары тұрақты деп саналады, тек өзгеріске ұшырайтын жеңіл

бөлшектердің концентрациясы мен жылдамдығы ғана: $n(\vec{r}, t)$ және $\vec{v}(\vec{r}, t)$

Осы келтірілген мәселені шешу үшін қасымды ескермейтін гидродинамиканың негізгі теңдеуін қолданған ыңғайлы:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = \frac{e}{m} \left\{ \vec{E} + \frac{1}{c} (\vec{v} (\vec{B}_\alpha + \vec{B}_\beta)) \right\}, \quad \frac{\partial n}{\partial t} + \text{div} n \vec{v} = 0$$

Мұндағы \vec{E} және \vec{B}_β – шоғырдағы жеңіл бөлшектер мен ферромагнетиктегі атомдардың бірлесе пайда ететін айнымалы электр өрісі мен магнит индукцияның айнымалы құраушысы (е және m–шоғырдағы жеңіл бөлшектердің заряды мен массасы). Бұл шамалар айнымалы магнит өрісімен (\vec{B}_γ) және айнымалы электрлік индукциямен (\vec{D}) Максвелл теңдеулері арқылы байланысады [12, 13]:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}_\beta}{\partial t}, \quad \text{rot} \vec{B}_\gamma = \frac{4\pi}{c} \vec{E} (n\vec{v}) + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{D} = 4\pi en, \quad \text{div} \vec{B}_\beta = 0$$

Бұл жерде \vec{B}_γ және \vec{B}_β шамалары бір-бірімен $\vec{B}_\beta = \vec{B}_\gamma + 4\pi \vec{m}$ теңдігі бойынша байланысқан, ал \vec{D} және \vec{E} шамаларын байланыстыратын теңдік $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ (ε – ферромагнетиктің диэлектрлік тұрақтысы).

Спиндердің тербелісі кристалдық тордағы иондардың тербелісін, керісінше иондардың тербелісі спиндердің тербелісіне себепші болады. Басқаша айтқанда, ферромагнетиктегі спиндік тоқындар серпімді толқындармен ілесе таралады. Осы екеуін біріктіре отырып мынадай тұжырымға келеміз: магниттік реттілікке ие жүйеде байланысқан магнитті серпімді толқындар тарай алады. Алайда, спиндік және серпімді толқындардың арасындағы байланыс тек резонанстық шартта ғана байқалады, бұл шарт орындалмаған жағдайда екі толқын жеке– дара өмір сүретін болады. Ферромагнетиктің күйін бірлік массаның магниттік моменті

($\vec{\psi}(\vec{r}, t)$) және ферромагнетик элементінің ығысу векторы ($\vec{S}(\vec{r}, t)$) арқылы

сипаттайтын болсақ, онда эйлерлік координата мен уақыттың функциясы ретінде қарастырылатын осы шамалар үшін қозғалыс теңдеулері мына түрде жазылады:

$$\frac{d\vec{\psi}}{dt} = \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial x_i} = g (\vec{\psi} \times \vec{H}) + \frac{1}{\rho} \vec{R}, \quad \rho \frac{d^2 \vec{S}}{dt^2} = \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right) = \vec{f} \quad (8)$$

Мұндағы $\vec{v}(\vec{r}, t)$ – ферромагнетик элементінің жылдамдығы:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{S}}{dt} = \frac{\partial \vec{S}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{S}}{\partial x_i}$$

\vec{H} – эффективті магнит өрісі; \vec{f} – ферромагнетиктің бірлік массасына

келетін серпімділік күші; \vec{R} – релаксациялық мүше; ρ – ферромагнетиктің

тығыздығы. Осы келтірілген \vec{H} , \vec{f} , \vec{R} шамалар ψ_i , $\frac{\partial \psi_i}{\partial x_k}$, $\frac{\partial S_i}{\partial x_k}$, $\frac{\partial u}{\partial x_k}$ тәуелді

[14, 15]. Импульстің сақталу заңы бойынша \vec{f} күшті $f_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}$ түрінде жазуға

болады (σ_{ik} – керілу тензоры). Бұл жағдайда жоғарыдағы (8) – теңдеулердің қатарына төмендегі

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{u} = 0$$

үзіліссіздік теңдеуі мен магнитостатиканың теңдеулері қосылатын болады. Ферромагнетиктегі магнит өрісінің \vec{B} индукциясы мен $\vec{\psi}(\vec{r}, t)$

арасындағы байланыс $\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \rho \vec{\psi}$ теңдігі арқылы іске асырылса, ал магнитостатика теңдеулерінің құрамындағы ток тығыздығы $\vec{j} = \lambda \left\{ \vec{E} + \frac{1}{c} (\vec{v} \times \vec{B}) \right\}$. Ферромагнетик энергиясының ω тығыздығы магнит энергиясының

тығыздығынан ($\frac{1}{8\pi} \vec{H}^2$), ферромагнетиктің қозғалып жатқан элементтерінің

кинетикалық энергиясынан ($\frac{1}{2} \rho v^2$) және ферромагнетиктің потенциалдық

энергиясының тығыздығынан құрылады ($F = F \left(\psi_i, \frac{\partial \psi_i}{\partial x_k}, \frac{\partial S_i}{\partial x_k} \right)$ –

ферромагнетиктің бірлік массасына келетін потенциалдық энергия). Энергияның диссипациясы болмаған жағдайда $\vec{R}, \vec{j} = 0$. Егер, $b_{ii} = \delta_{ii} - \frac{\partial S_i}{\partial x_i}$ белгілеуін жасайтын болсақ, онда серпімділік күшіне арналған мынадай өрнекті алатын боламыз:

$$\vec{f}_i = \vec{M} \frac{\partial \vec{H}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \rho \frac{\partial F}{\partial \frac{\partial S_i}{\partial x_k}} b_{ii} - \rho \frac{\partial F}{\partial \frac{\partial \psi_i}{\partial x_k}} \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} \right\}$$

Ферромагнетиктердегі спиндік толқындарға қатысты жоғарыдағы келтірілген векторлық және тензорлық шамаларды қарастырған кезде әйлерлік \vec{r} координаталармен бірге лагранждық ξ координаталарды да енгізген тиімді ($\vec{r} = \xi + \vec{S}(\xi, t)$). Себебі, $\psi_i, \frac{\partial \psi_i}{\partial x_k}, \frac{\partial S_i}{\partial x_k}$ комбинациясына

айнымалылардың $\psi_i, \frac{\partial \psi_i}{\partial \xi_k}, \frac{\partial S_i}{\partial \xi_k}$ инвариантты 18 түрлендіру сәйкес келеді, олардың бірнешеуі төменде көрсетілген:

$$I_{ij} = \frac{\partial x_k}{\partial \xi_i} \frac{\partial x_k}{\partial \xi_j}, \quad A_i = \psi_k \frac{\partial x_k}{\partial \xi_i}, \quad A_{ij} = \frac{\partial x_k}{\partial \xi_i} \frac{\partial \psi_k}{\partial \xi_j}$$

Сондықтан да, ферромагнетиктің потенциалдық энергиясының тығыздығын $F = F(I_{ij}, A_i, A_{ij})$ инварианттар арқылы жаза алатын боламыз.

Осыған байланысты, эффективті магнит өрісі төмендегі өрнек арқылы анықталатын болады:

$$\vec{H} = \vec{H} - \frac{\partial F}{\partial \psi_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \xi_n}{\partial x_k} \frac{\partial}{\partial \xi_n} \left(\rho \frac{\partial F}{\partial \frac{\partial \psi_i}{\partial \xi_m}} \frac{\partial x_k}{\partial \xi_m} \right)$$

Ендігі жерде спиндік толқындардың кванттық теориясына тоқталатын боламыз. Ферромагнетиктің кез-келген бір атомының магниттік моменті

ферромагнетик энергиясының ең аз мәніне сәйкес келетін бағыттан ауытқып, сонан соң өзімен-өзі қалатын болса, онда кристалда спиндік толқындар таралатын болады. Бұл толқынның энергиясы әрбір атомның спиндерінің бағыт-бағдарының өзгеруімен байланысты болатын кристалдың қозу энергиясымен бірдей болатыны түсіну қиын емес. Спиндік толқындар пайда болатын ең кіші энергия мөлшері $E(\vec{k}) = \hbar \omega_s(\vec{k})$, мұндағы ω_s, \vec{k} –

спиндік толқынның жиілігі мен толқындық векторы [16]. Бұл энергияны магнон атты бөлшектің энергиясы деп, ал оның импульсін $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ түрінде алуға болады. Спиндік толқын кристалдық торда таралатын болғандықтан магнонның импульсі тек $2\pi \hbar \vec{d}$ дәлдікпен ғана анықталатынын ескеру керек болады (\vec{d} – кері тор векторы). Сондықтан, бұл шама квазиимпульс деп аталады. Ферромагнетиктің қозу энергиясы жекелеген магнондардың (спиндік толқындардың) энергияларының қосындысынан тұрады деп есептеуге болады:

$$W(n) = \sum_k \hbar \omega_s(k) n(\vec{k}) \quad (9)$$

Бұл өрнекте $n(\vec{k})$ – магнондар саны. (9) – да қосындылау толқындық вектордың барлық мәндері бойынша жүргізіледі. Айта кету керек, (9) – өрнек ферромагнетик энергиясының тек магниттік қана бөлігі болып табылады немесе ол – атомдар спиндерінің әртүрлі бағыттылықтарымен байланысты энергия. Бұл энергия Кюри температурасынан әлде қайда аз болатын температураға сәйкес келеді және толқынның ұзындығы $\lambda = \frac{1}{k}$ немесе $\lambda = a$ (a – тор тұрақтысы). Олай болса, төменгі температураларда ферромагнетите ұзынтолқынды магнондар таралады екен.

Өзара әсерлесуші екі магноннан тұратын жүйеде байланысқан күйлер бола алады. Оларды зерттеу үшін ферромагнетиктің гамильтонианын мына түрде алу керек болады:

$$H = 2\mu H_0 \sum_i S_i^z - \frac{1}{2} \sum_{l \neq m} J(Q_{lm}) S_l S_m$$

Тек көршілес атомдардың ғана алмасу әсерілерін ғана ескеретін болсақ, онда гамильтонианның түрі өзгертін болады:

$$H = 2\mu H_0 \sum_i S_i^z - \frac{1}{2} J_0 \sum_{l, \lambda} S_l S_{l+\lambda}$$

Есептеуімізді жеңілдету үшін импульстік көріністегі екі магنونдық толқындық функцияларды мына түрде жазу қажет:

$$\psi(\vec{r}_i, \vec{r}_j) = \frac{1}{N} \sum_{\vec{k}} \exp(i\vec{k}\vec{R}) \frac{1}{N} \sum_{\vec{k}} \exp(i\vec{k}\vec{r}) \psi_{\vec{k}}(\vec{k})$$

Мұндағы $\vec{R} = \frac{1}{2}(\vec{r}_i + \vec{r}_j)$, $\vec{r} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$. Осы толқындық функциялар

бойынша екі магنونдық байланысқан күйлер төмендегі Шредингер теңдеуін қанағаттандыра алады:

$$(E - E_{\vec{k}}(\vec{k}) \psi_{\vec{k}}(\vec{k})) = \frac{1}{N} \sum_{\vec{k}_0} V_{\vec{k}}(\vec{k}, \vec{k}_0) \psi_{\vec{k}}(\vec{k}_0)$$

Бұл теңдеуде

$$V_{\vec{k}}(\vec{k}, \vec{k}_0) = 2J_0 \sum_{\vec{r}} \cos \vec{k}\vec{r} \left(\cos \frac{1}{2} \vec{K}\vec{r} - \cos \vec{k}_0\vec{r} \right)$$

$E_{\vec{k}}(\vec{k})$ – толқындық векторлары $\vec{k}_1 = \frac{1}{2} \vec{K} + \vec{k}$ және $\vec{k}_2 = \frac{1}{2} \vec{K} - \vec{k}$

болатын екі спиндік толқындардың энергияларының қосындысы:

$$E_{\vec{k}}(\vec{k}) = E(\vec{k}_1) + E(\vec{k}_2) = 4\pi\mu H_0 + 2SJ_0 \sum_{\vec{r}} \left(1 - \cos \frac{1}{2} \vec{K}\vec{r} \cos \vec{k}\vec{r} \right)$$

Ферромагнетиктің өзіндік бір ерекшелігі жекелеген атомдар спиндерінің бағыттарының арасында өте күшті корреляцияның болуында. Бұл жағдай спиндердің корреляциялық функциялары арқылы қарастырылады. Егер, $S_i(t)$ – гейзенберттік көріністегі i – ші атомның спин операторы болса, онда

i – ші және j – ші атомдардың корреляциялық функциялары ретінде $S_i^a(t) S_j^b(0)$ операторларының орташаланған мәндері алынатын болады (а

және b индекстері спин проекциялары):

$$\langle S_i^a(t) S_j^b(0) \rangle = S\rho S_i^a(t) S_j^b(0) \quad (10)$$

Бұл өрнекте

$$\rho = \exp\left\{ \frac{\omega - H}{T} \right\}$$

Ферромагнетик тығыздығының тепе-теңділік матрицасы. Н-Гамильтонианды (Н) меншікті v мәндер арқылы $Hv = E_v v$ түрде жазып

алып (E_v – v күйдегі ферромагнетиктің энергиясы), (10) – теңдік арқылы

берілген корреляциялық функцияларды мынадай жағдайға келтіруге болады [17]:

$$\langle S_i^a(t) S_j^b(0) \rangle = \sum_{\nu} \exp\{\beta(\omega - E_{\nu})\} \langle v(S_i^b(0)\mu) \rangle \langle \mu(S_i^a(t))v \rangle$$

мұндағы $\beta = \frac{1}{T}$. Алайда

$$\langle \mu(S_i^a(t))v \rangle = \exp\left\{ \frac{it}{\hbar}(E_{\mu} - E_{\nu}) \right\} \langle \mu(S_i^a(0))v \rangle$$

болғандықтан

$$\langle S_j^b(0) S_i^a(t) \rangle = \sum_{\nu} \exp\{\beta(\omega - E_{\nu})\} \exp\left\{ \frac{it}{\hbar}(E_{\mu} - E_{\nu}) \right\} \langle v(S_i^b(0)\mu) \rangle \langle \mu(S_i^a(t))v \rangle$$

Осы функциялардың Фурье құраушысы

$$J_{ab}(i-j, \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} dt \exp\{i\Omega t\} \langle S_j^b(0) S_i^a(t) \rangle$$

Спектральдық функция деп аталатын осы өрнектегі Фурье компонентін Грин функциясы арқылы өрнектелетін болады:

$$G_{ab}(i-j, \Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_{ab}(i-j, \tilde{\Omega}) \{ \exp(\beta\hbar\tilde{\Omega} - 1) \}}{\Omega - \tilde{\Omega} + i} d\tilde{\Omega}$$

Қорытынды

Мақала тақырыбы бойынша атқарылған теориялық сипаттағы зерттеулер өз мақсатына жетті деуге болады. Атап айтқанда, спиндік толқындардың теориялық зерттеу әдісі бойынша ферромагнетиктің магниттік момент пен магнит өрістерінің тербелісінің Фурье бейнелеуі ұсынылды, магнит қабылдағыштықтың уақыттық және кеңістіктік дисперсиясы Максвелл теңдеулері арқылы есептелді. Спиндік толқындардың магнитостатикалық жуықтаулардағы спектрін анықтап беретін дисперсиялық теңдеу, спиндік толқындардың әлсіреу механизмдері мен олардың параметрлік қоздырылуы қарастырылды. Магниттік момент тығыздығының біртекті тербелістерінің біртекті тербелістерімен байланыстар қозғалыс теңдеуінің көмегімен магниттік анизотроптық энергия ескерілмеген, толқындық вектордың нөлге тең және нөлге тең емес жағдайлары үшін анықталды. Ферромагнетик арқылы ауыр және жеңіл бөлшектерден құралған шоғыр (сәуле) өткен кездегі спиндік толқындардың қозуы және олардың күшейуі гидродинамиканың негізгі теңдеуі арқылы шешілді. Бұл теңдеулер шоғырдағы жеңіл бөлшектердің концентрациясы мен жылдамдықтарының кеңістік пен уақыт бойынша қалай өзгеретінін анықтап бере алатыны ескерілді. Эйлерлік координаталарда ферромагнетиктің бірлік массасына келетін серпімділік күші мен ферромагнетик энергиясының тығыздығы магнитостатика теңдеулері мен үзіліссіздік теңдеуі арқылы анықталды. Ферромагнетиктің потенциалдық энергиясының тығыздығы мен эффективті магнит өрісінің өрнектері эйлерлік және лагранждық координаталардағы инварианттар арқылы жазылып көрсетілді. Өзара әсерлесуші екі магноннан тұратын жүйедегі байланысқан күйлер көршілес атомдардың ғана алмасу әсерілерін ғана ескеретін ферромагнетиктің гамильтонианы мен импульстік көріністегі екі магнондық толқындық функциялар үшін жазылатын Шредингер теңдеуі арқылы зерттелді. Жекелеген атомдар спиндерінің бағыттарының арасында болатын корреляцияны сипаттайтын корреляциялық функциялар, олардың Фурье құраушысы, бұл құраушының Грин функциясы арқылы өрнектелуі көрсетілді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Bloch, F. Zur Theorie des Ferromagnetismus // Ztschr. für Phys. 1930. Bd. 61. – P. 206.

2 Хутиева, А. Б., Садовников, А. В., Анненков, А. Ю., Герус, С. В., Локк, Э. Г. Дифракция сверхнаправленного луча поверхностной спиновой волны на слабоконтрастном магнонном кристалле // Известия РАН. Серия

физическая. – 2021. – Т. 85. – № 11. – P. 1542–1545. – <https://doi.org/10.31857/S0367676521110156>

3 Annenkov, A. Yu., Gerus, S. V., Lock, E. H. // EPJ Web Conf. 2018. Vol. 185. – Art. № 02006. 11.

4 Annenkov, A. Yu., Gerus, S. V., Lock, E. H. // EPL. – 2018. – Vol. 123. № 4. – Art. № 44003. 12.

5 Damon, R. W., Van de Vaart, H. J. Propagation of magnetostatic spin waves at microwave frequencies in normally magnetized disk. // J. Appl. Phys. Vol. 36. – № 11. – P. 3453–3459.

6 Деминов, Р. Г. Методы квантовой теории поля в физике конденсированного состояния. – Казань: Казан. ун-т, 2023. – 88 с.

7 Шавров, В. Г., Щеглов, В. И. Спиновые волны в средах с обменом и диссипацией. – М.: Физматлит, 2021. – 496 с.

8 Андреева, Т. Л., Рубин, П. Л. Спиновые волны в неполяризованных холодных газах // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2007. – Т. 86. – С. 216–220. – <https://doi.org/10.1134/S0021364007150088>

9 Мясников, Н. В., Пятаков, А. П. Моделирование возбуждения спиновых волн воздействием электрического поля на доменную стенку в магнитных пленках с неоднородным магнитоэлектрическим воздействием // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2025. – Т. 89. – № 1. – С. 136–144. – <https://doi.org/10.31857/S0367676525010228>

10 Перов, Д. В., Ринкевич, А. Б. Интерференция спиновых волн в металлической ферромагнитной пластине // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – № 12. – С. 1212–1218. – <https://doi.org/10.1134/S0033849419110202>

11 Мартышкин, А. А., Одинцов, С. А., Губанова, Ю. А., Бегинин, Е. Н., Шешукова, С. Е., Никитов, С. А., Садовников, А. В. Управляемый спин–волновой транспорт в магнонно–кристаллической структуре с одномерным массивом отверстий // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. – Т. 110. – № 8. – С. 526–533. – <https://doi.org/10.1134/S0370274X19200037>

12 Буньков, Ю. М., Белотелов, В. И., Ветошко, П. М., Князев, Г. А., Кузмичев, А. Н., Петров, П. Е. Магнонный сверхток и сброс фазы в пленке железо-иттриевого граната // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2024. – Т. 120. – № 6. – С. 436–443. – <https://doi.org/10.31857/S0370274X24090191>

13 Kim, T. H., Kim, J-I., Kim, G-J., Jang, K-H., Sim, S., Choi, G.-M. Anisotropic manipulation of subterahertz spin waves by spin orbit torque in the

antiferromagnetic orthoferrite // Results in Physics, 2025, 108400. – <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108400>

14 **Gallardo, R. A., Alvarado-Seguel, P., Brevis, F., Gonzalez-Fuentes, C., González, J. W., Lenz, K., Lindner, J., Roldán-Molina, A.** Nonreciprocal spin wave channel in ferromagnetic / heavy-metal nanostrips // Results in Physics, 2024. – № 67, 108057. – <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.108057>

15 **Mamica, S.** The influence of the demagnetizing field on the concentration of spin wave energy in two-dimensional magnonic crystals // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023. – Vol. 588. – Part A, 171395. – <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171395>

16 **Oksana, Yu. Gorobets, Volodymyr, V. Kulish, Ihor A. Syzon.** Theory of propagation of nonlinear spin wave through an antiferromagnetic magnonic crystal with four-sublattice interfaces // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023. – Vol 587. – 171266. – <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171266>

17 **Han Zhang, Wen-Wei Wang, Chang Qiao, Long Zhang, Ming-Cheng Liang, Rui Wu, Xu-Jie Wang, Xiong-Jun Liu, Xibo Zhang.** Topological spin-orbit-coupled fermions beyond rotating wave approximation // Science Bulletin, 2024. – Vol. 69. – Issue 6. – P. 747–755. – <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.01.018>

REFERENCES

1 **Bloch, F.** Zur Theorie des Ferromagnetismus // Ztschr. für Phys. 1930. Bd. 61. – P. 206.

2 **Xutieva, A. B., Sadovnikov, A. V., Annenkov, A. Yu., Gerus, S. V., Lokk, E. G.** Difrakciya sverhnapravlennogo luchu poverxnostnoj spinovoj volny` na slabokontrastnom magnonnom kristalle [Superdirectional beam diffraction of a surface spin wave on a low-contrast magnon crystal] // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. – 2021. – Vol. 85. – № 11. – P. 1542–1545. – <https://doi.org/10.31857/S0367676521110156>

3 **Annenkov, A. Yu., Gerus, S. V., Lock, E. H.** // EPJ Web Conf. 2018. Vol. 185. – Art. № 02006. 11.

4 **Annenkov, A. Yu., Gerus, S. V., Lock, E. H.** // EPL. – 2018. – Vol. 123. № 4. – Art. № 44003. 12.

5 **Damon, R. W., Van de Vaart, H. J.** Propagation of magnetostatic spin waves at microwave frequencies in normally magnetized disk. // J. Appl. Phys. Vol. 36. – № 11. – P. 3453–3459.

6 **Deminov, R. G.** Metody` kvantovoj teorii polya v fizike kondensirovannogo sostoyaniya [Methods of quantum field theory in condensed matter physics]. – Kazan`: Kazan. un-t, 2023. – 88 p.

7 **Shavrov, V. G., Shheglov, V. I.** Spinovy`e volny` v sredax s obmenom i dissipaciej [Spin waves in media with exchange and dissipation]. – M. : Fizmatlit, 2021. – 496 p.

8 **Andreeva, T. L., Rubin, P. L.** Spinovy`e volny` v nepolyarizovanny`x xolodny`x gazax [Spin waves in unpolarized cold gases] // Pis`ma v Zhurnal e`ksperimental`noj i teoreticheskoy fiziki. – 2007. – Vol. 86. – P. 216–220. – <https://doi.org/10.1134/S0021364007150088>

9 **Myasnikov, N. V., Pyatakov, A. P.** Modelirovanie vzbuzhdeniya spinovy`x voln vozdeystviem e`lektricheskogo polya na domennuyu stenkku v magnitny`x plenkax s neodnorodny`m magnitoe`lektricheskim vozdeystviem [Simulation of the excitation of spin waves by the action of an electric field on a domain wall in magnetic films with an inhomogeneous magnetoelectric effect] // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya fizicheskaya. – 2025. – Vol. 89, № 1. – P. 136–144. – <https://doi.org/10.31857/S0367676525010228>

10 **Perov, D. V., Rinkevich, A. B.** Interferenciya spinovy`x voln v metallicheskoj ferromagnitnoj plastine [Interference of spin waves in a metal ferromagnetic plate] // Radiotekhnika i e`lektronika. – 2019. – Vol. 64. – № 12. – P. 1212–1218. – <https://doi.org/10.1134/S0033849419110202>

11 **Marty`shkin, A. A., Odinczov, S. A., Gubanov, Yu. A., Beginin, E. N., Sheshukova, S. E., Nikitov, S. A., Sadovnikov, A. V.** Upravlyaemy`j spin–volnovoj transport v magnonno–kristallicheskoj strukture s odnomerny`m massivom otverstij [Controlled spin–wave transport in a magnon crystal structure with a one–dimensional array of holes] // Pis`ma v Zhurnal e`ksperimental`noj i teoreticheskoy fiziki. – 2019. – Vol. 110. – № 8. – P. 526–533. – <https://doi.org/10.1134/S0370274X19200037>

12 **Bun`kov, Yu. M., Belotelov, V. I., Vetoshko, P. M., Knyazev, G. A., Kuzmichev, A. N., Petrov, P. E.** Magnonny`j sverxtok i sbros fazy` v plenke zhelezo–itrievogo granata [Magnon overcurrent and phase discharge in an iron–yttrium garnet film] // Pis`ma v Zhurnal e`ksperimental`noj i teoreticheskoy fiziki. – 2024. – Vol. 120. – № 6. – P. 436–443. – <https://doi.org/10.31857/S0370274X24090191>

13 **Kim, T. H., Kim, J-I., Kim, G-J., Jang, K-H., Sim, S., Choi, G.-M.** Anisotropic manipulation of subterahertz spin waves by spin orbit torque in the antiferromagnetic orthoferrite // Results in Physics, 2025, 108400. – <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2025.108400>

14 **Gallardo, R. A., Alvarado-Seguel, P., Brevis, F., Gonzalez-Fuentes, C., González, J. W., Lenz, K., Lindner, J., Roldán-Molina, A.** Nonreciprocal spin wave channel in ferromagnetic / heavy-metal nanostrips // Results in Physics, 2024. – № 67, 108057. – <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.108057>

15 **Mamica, S.** The influence of the demagnetizing field on the concentration of spin wave energy in two-dimensional magnonic crystals // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023. – Vol. 588. – Part A, 171395. – <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171395>

16 **Oksana, Yu. Gorobets, Volodymyr, V. Kulish, Ihor A. Syzon.** Theory of propagation of nonlinear spin wave through an antiferromagnetic magnonic crystal with four-sublattice interfaces // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023. – Vol 587. – 171266. – <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171266>

17 **Han Zhang, Wen-Wei Wang, Chang Qiao, Long Zhang, Ming-Cheng Liang, Rui Wu, Xu-Jie Wang, Xiong-Jun Liu, Xibo Zhang.** Topological spin-orbit-coupled fermions beyond rotating wave approximation // Science Bulletin, 2024. – Vol. 69. – Issue 6. – P. 747–755. – <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.01.018>

11.01.26 ж. баспаға түсті.
03.02.26 ж. түзетулерімен түсті.
27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

Т. Б. Коштыбаев¹, *К. К. Жантлеуов², Б. А. Камал³,
М. Е. Алиева⁴, У. Б. Курбангалиев⁵

^{1,5}Қазақстан Республикасының ұлттық педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы;
^{2,3,4}Қазақстан Республикасының ұлттық педагогикалық университеті и. а. Абая,
Қазақстан Республикасы, Алматы.
Поступило в редакцию 11.01.26.
Поступило с исправлениями 03.02.26.
Принято в печать 27.02.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ И КВАНТОВЫХ СВОЙСТВ СПИНОВЫХ ВОЛН

В статье исследованы макроскопические, квантовые свойства спиновых волн в магнитоупорядоченных системах и механизмы их практического применения. Рассмотрены колебания магнитного момента и магнитных полей в Фурье представлении, рассчитана временно-пространственная дисперсия магнитной восприимчивости с помощью уравнений Максвелла. Предложены методы получения дисперсионного уравнения, определяющего спектр спиновых волн, через магнитостатические приближения. Рассмотрены механизмы затухания спиновых волн и их параметрическое возбуждение.

Взаимосвязи между однородными и неоднородными колебаниями плотности магнитного момента были оценены через уравнение движения без учета энергии магнитной анизотропии и как для нулевого, так и для ненулевого значения волнового вектора. Проблема возбуждения и усиления спиновых волн через пучок (луч) тяжелых и легких частиц, проходящих через ферромагнетик, были решены с помощью основных уравнений гидродинамики. Определены масштабы пространственно-временных изменений концентрации и скорости легких частиц в пучке. С помощью уравнений магнитостатики и уравнения непрерывности вычислены значения упругой силы, приходящая на единицу массы ферромагнетика, и плотности энергии ферромагнетика в Эйлеровой системе координат. Выражения плотности потенциальной энергии ферромагнетика и эффективного магнитного поля были записаны через инварианты в Эйлеровских и Лагранжевых координатах. Связанные состояния в системе, состоящей из двух взаимодействующих магнонов, исследовались через гамильтониан ферромагнетика, учитывающее только обменные взаимодействия соседних атомов, и уравнение Шредингера для двухмагнонных волновых функций в импульсном представлении. Сильная корреляция между направлениями спинов отдельных атомов были охарактеризованы с помощью корреляционных функций спинов и были представлены их выражения через Фурье-преобразование и функцию Грина.

Ключевые слова: спиновые волны, магнитный момент, магноны, ферромагнетик, дисперсионное уравнение, уравнения магнитостатики, эйлеровы и лагранжевы координаты.

Т. В. Koshtybayev¹, *К. К. Zhantleuov², В. А. Kamal³,
М. Е. Aliyeva⁴, У. В. Kurbangaliev⁵

^{1,5}Kazakh National Women's Pedagogical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
^{2,3,4}Abai Kazakh National Pedagogical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 11.01.26.
Received in revised form 03.02.26.
Accepted for publication 27.02.26.

STUDY OF MACROSCOPIC AND QUANTUM PROPERTIES OF SPIN WAVES

This paper investigates the macroscopic and quantum properties of spin waves in magnetically ordered systems, as well as the mechanisms of their practical applications. Oscillations of the magnetic moment and magnetic fields are analysed in the Fourier representation, and the spatiotemporal dispersion of magnetic susceptibility is calculated using Maxwell's equations. Methods for deriving the dispersion relation that determines the spectrum of spin waves within the framework of magnetostatic approximations are proposed. The mechanisms of spin-wave damping and their parametric excitation are discussed. The interrelations between homogeneous and inhomogeneous oscillations of the magnetic moment density are evaluated through the equation of motion, without accounting for magnetic anisotropy energy, for both zero and nonzero values of the wave vector. The problem of spin-wave excitation and amplification by a beam of heavy and light particles passing through a ferromagnet is addressed using the fundamental equations of hydrodynamics. The scales of spatiotemporal variations in the concentration and velocity of light particles within the beam are determined. Using magnetostatic equations and the continuity equation, the values of elastic force per unit mass of the ferromagnet and the energy density of the ferromagnet in the Eulerian coordinate system are calculated. Expressions for the potential energy density of the ferromagnet and the effective magnetic field are derived in terms of invariants in both Eulerian and Lagrangian coordinates. Bound states in a system of two interacting magnons are investigated through the ferromagnet Hamiltonian, which accounts only for exchange interactions between neighbouring atoms, and the Schrödinger equation for two-magnon wave functions in momentum representation. Strong correlations between the spin orientations of individual atoms are characterized by spin correlation functions, whose expressions are presented in terms of the Fourier transform and Green's function.

Keywords: spin waves, magnetic moment, magnons, ferromagnet, dispersion relation, magnetostatic equations, Eulerian and Lagrangian coordinates.

SRSTI 53.530.1

<https://doi.org/10.48081/BGQF1896>

***S. A. Nurkenov¹, Zh. Ye. Zakiyeva², D. A. Kauanova³**

^{1,2}Astana International University, Republic of Kazakhstan, Astana;

³Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7116-1520>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9777-9943>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6194-7914>

*e-mail: s.nurkenov@gmail.com

MODELING MAXWELL-BOLTZMANN GAS DISTRIBUTIONS USING PYTHON: TEMPERATURE AND PRESSURE EFFECTS

This study explores the probability density distribution of gas molecules (hydrogen, neon, helium, argon, and oxygen) under optimal operating conditions. The research aims to analyze the impact of temperature, pressure, and altitude on the behavior and concentration of gas, particularly focusing on Maxwell-Boltzmann and barometric distributions. Case studies of the analysis of the probability density distribution of gas molecules using the Python programming language were presented. The analysis revealed that increasing temperature leads to an increase in the average and most probable molecular velocities, accompanied by a flattening of the Maxwell-Boltzmann distribution curve. At a constant temperature of $T = 80$ K, hydrogen exhibits significantly higher average velocities compared to heavier molecules such as neon and helium. Overall, the velocity distribution of gas molecules is influenced by the molecular mass and the thermodynamic state parameters. The proposed visualization methodology for Maxwell-Boltzmann distributions offers valuable applications for university educators and students.

Keywords: Maxwell distribution, Python, models, distribution function, Boltzmann distribution.

Introduction

In modern higher education, the rapid development of digital technologies has a significant impact on teaching and learning methods. Modeling methods in physics are becoming an integral part of the educational process, providing new opportunities for solving and visualizing problems [1].

In particular, the Python programming language has proven itself as an effective tool for studying physics and other natural sciences. It not only facilitates calculations, but also promotes a better understanding of theoretical concepts, such as the Maxwell-Boltzmann distribution, which underlie molecular kinetic theory [2].

Within the framework of the classical ideal gas model, approaches to studying the topic are proposed in: «The physical model of an ideal gas and the Maxwell distribution by molecular velocities» and the paradoxes of classical physics, which present generalized experiments on contradictions in the justification of statistical physics for systems that obey the laws of classical physics [3; 4].

«Python» is one of the most frequently used programming languages, especially in the field of data analysis [5]. It is a general-purpose programming language to which the community has contributed a huge library of scientific and data analysis functions, and the range of problems that can be solved is enormous [6]. The integration of Python into physics education programs helps to simplify this process by offering powerful tools for modeling and visualizing data. With its simple syntax and a variety of ready-made libraries such as NumPy, SciPy, Matplotlib, and Pandas, Python provides everything needed to efficiently solve problems of varying complexity. These resources are available online in the form of libraries of numerical routines, including SciPy [7], which includes algorithms for many classes of scientific problems such as optimization, integration, and interpolation, among many others; NumPy, which includes an array data structure and fast numerical routines [8]; Matplotlib is a graphical package for data visualization [9; 10] and pandas, which is built on top of Matplotlib and NumPy to provide access to the routines of both libraries with less code [11; 12] comprehensive guide for all your Python computational needs Key Features Learn the first steps within Python to highly specialized concepts Explore examples and code snippets taken from typical programming situations within scientific computing. Delve into essential computer science concepts like iterating, object-oriented programming, testing, and MPI presented in strong connection to applications within scientific computing. Book Description Python has tremendous potential within the scientific computing domain. This updated edition of Scientific Computing with Python features new chapters on graphical user interfaces, efficient data processing, and parallel computing to help you perform mathematical and scientific computing efficiently using Python. This book will help you to explore new Python syntax features and create different models using scientific computing principles. The book presents Python alongside mathematical applications and demonstrates how to apply Python concepts in computing with the help of examples involving Python 3.8. You'll use pandas for basic data analysis to understand the modern needs of scientific computing, and cover data module improvements and built-in

features. You'll also explore numerical computation modules such as NumPy and SciPy, which enable fast access to highly efficient numerical algorithms. By learning to use the plotting module Matplotlib, you will be able to represent your computational results in talks and publications. A special chapter is devoted to SymPy, a tool for bridging symbolic and numerical computations. By the end of this Python book, you'll have gained a solid understanding of task automation and how to implement and test mathematical algorithms within the realm of scientific computing. What you will learn Understand the building blocks of computational mathematics, linear algebra, and related Python objects Use Matplotlib to create high-quality figures and graphics to draw and visualize results Apply object-oriented programming (OOP).

Thus, when studying the course: «Molecular Physics and Thermodynamics» there is an opportunity to turn to an extensive community of Python developers and users who are ready to provide support and the necessary resources. Forums, documentation and training materials help to quickly solve emerging problems, which makes Python an even more convenient and accessible tool [13; 14] presents a menu of options for calculating magnitudes within uniformly varied rectilinear motion, parabolic motion, free fall, and uniform circular motion. The written codes can be verified using Python online, and there is also a code that does require the installation of Python and additional libraries to be able to see the graph of position-time, speed-time and acceleration-time. It was verified that each code works in two different online Python links and for a better understanding of the user the calculation menu is explained in parts.«container-title»: «Russian Law Journal», «https://doi.org/10.52783/rlj.v11i8s.1299», «ISSN 2313-7851», «issue»: «8s», «journalAbbreviation»: «RLJ», «license»: «<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>», «source»: «DOI.org Crossref».

Using Python when studying the topic: Maxwell-Boltzmann distribution allows students to simultaneously develop programming skills and deepen their knowledge of physics. With the help of Python, students can explore the behavior of molecules with changing temperatures and velocities, as well as analyze the statistical patterns behind the distribution of molecular velocities. Such tasks become more understandable and visual, thanks to the visualization capabilities, which significantly improves the quality of perception of the material. In connection with the above, the aim of the work is to use Python to consolidate the visualization and analysis of Maxwell-Boltzmann distributions under certain optimal conditions of action [15; 16].

The work uses the Python programming language, designed to calculate the average and most probable speeds and plot distribution graphs for the Maxwell-Boltzmann function at different temperatures for gas molecules. For clarity, five problems were considered and presented.

Materials and methods

The Maxwell-Boltzmann probability density function is described in the following equation:

$$f(v_x) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right) \quad (1)$$

where: m is the mass of the oxygen molecule, k is the Boltzmann constant, T is the gas temperature, v_x is the projection of the molecule velocity onto the x axis.

The next equation finds the most probable velocity:

$$v_{pos} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (2)$$

To plot the Maxwell distribution graph for the velocity of gas molecules, the following equation is used:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \quad (3)$$

The next equation calculates the average speed of gas molecules:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (4)$$

The pressure in the atmosphere decreases with altitude due to the effect of gravity, and this process can be described by the equilibrium equation:

$$dP = -\rho g dh \quad (5)$$

where P is the pressure, ρ is the air density at a given altitude, g is the acceleration of gravity, h is the altitude.

The density ρ can be expressed through the equation of state of an ideal gas:

$$P = \rho \frac{RT}{M} \quad (6)$$

where M is the molar mass of the gas, R is the universal gas constant, T is the temperature.

Expressing the density ρ through the pressure P :

$$\rho = \frac{MP}{RT}$$

Substituting this differential equation, we separate the variables:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{Mg}{RT} dh$$

Integrating this equation, we obtain:

$$\ln P = -\frac{Mg}{RT} h + \ln P_0$$

where P_0 is the pressure at sea level. Let's transform this equation into exponential form:

$$P(h) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{Mg}{RT} h\right) \quad (7)$$

This is the barometric formula for the Earth's atmosphere. It shows how pressure decreases exponentially with altitude at a given temperature. Substituting the equation of state of an ideal gas (6) into the expression of the barometric formula (7) allows to obtain the following dependence of the concentration of gas molecules on height:

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right) \quad (8)$$

Implementation using Python. To model the Maxwell-Boltzmann distribution and study the effects of temperature and pressure on gas behavior, we used Python version 3.10.11. The implementation leverages the following libraries:

- `numpy`: for numerical computations and array manipulations;
- `pandas`: for structured data handling, extraction and analysis;
- `matplotlib.pyplot`: for visualization of the distribution graphs;
- `scipy.constants`: for accessing physical constants, such as Boltzmann's constant and the universal gas constant.

At the start of each script, the listed libraries should be imported to ensure the availability of essential functions and tools. The Python imports are as follows:

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.constants import k, R, N_A
```

Results and Discussion

The findings of this study will be structured into five cases of modeling Maxwell-Boltzmann distributions of gas molecules, each accompanied by detailed Python-based solutions, visualizations, and tables:

- Maximum probability density;
- Most probable velocities;
- Average speed of argon molecules;
- Pressure and altitude relationship;
- Gas concentration with altitude;

This structured approach allows for a comprehensive analysis of the Maxwell-Boltzmann distribution, testing its generality in explaining properties of gas molecules using Python and related libraries. Each case demonstrates the practical application of the distribution in real-world scenarios and provides teachers and students with concrete Python examples to improve their understanding of molecular dynamics and statistical thermodynamics in programming.

Case 1

What is the maximum probability density $f(v)$ of the distribution of oxygen molecules by the x component of velocity at temperatures of $T = 300\text{K}$, 500K , 700K [15].

The maximum probability density is achieved when $v_x = 0$. To substitute the values and find the maximum probability density, the Maxwell distribution Equation (1) for velocities can be applied.

```
import ...
from scipy.constants import k, N_A
temperatures = [300, 500, 700]
M_oxygen = 32e-3
m_oxygen = M_oxygen / N_A
def maxwell_x(v_x, T, m):
    return np.sqrt(m / (2 * np.pi * k * T)) * np.exp(-m * v_x**2 / (2 * k *
T))
f_vx_max_values = [maxwell_x(0, T, m_oxygen) for T in temperatures]
f_vx_max_values
v_x = np.linspace(-1500, 1500, 500)
plt.figure(figsize=(10, 6))
for T in temperatures:
    plt.plot(v_x, maxwell_x(v_x, T, m_oxygen))
print(f_vx_max_values)
plt.show()
```

From the Figure 1 the resulted values of the probability density $f(v_x)$ at $v_x = 0$ for oxygen molecules at different temperatures can be observed:

$$\begin{aligned} T = 300, & \quad f(v_x) = 0.014 \text{ m}^{-1}\text{s} \\ T = 500, & \quad f(v_x) = 0.011 \text{ m}^{-1}\text{s} \\ T = 700, & \quad f(v_x) = 0.009 \text{ m}^{-1}\text{s} \end{aligned}$$

These results demonstrate that as the temperature increases, the probability density at zero velocity decreases, consistent with the broadening of the Maxwell-Boltzmann distribution at higher temperatures. This behavior reflects the greater spread of molecular velocities as thermal energy increases.

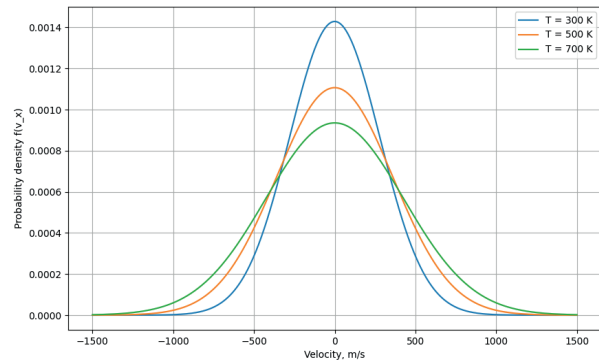


Figure 1 – Distribution of oxygen molecules by the x-component of velocity

Case 2

There are three gasses in a vessel – hydrogen (H₂), helium (He) and neon (Ne) – at a temperature of 80 K. It is necessary to find the most probable velocities v_{prob} for all gasses and compare them. Then plot the probability density distribution function $f(v)$ for each gas [15]. Using the Equations (2-3) the calculations and plot the graph using the following Python code can be performed:

```
import ...
T = 80
k = 1.38e-23
masses = {'H2': 3.35e-27, 'He': 6.65e-27, 'Ne': 3.32e-26}
colors = {'H2': 'blue', 'He': 'orange', 'Ne': 'green'}
v = lambda m: np.sqrt(2 * k * T / m)
f_maxwell = lambda v, m: 4 * np.pi * (m / (2 * np.pi * k * T))**(3/2) *
v**2 * np.exp(-m * v**2 / (2 * k * T))
v_range = np.linspace(0, 2000, 500)
plt.figure(figsize=(10, 6))
for gas, mass in masses.items():
    v_value = v(mass)
    plt.plot(v_range, f_maxwell(v_range, mass), label=f'{gas} (v =
{v_value:.2f} m/s)', color=colors[gas])
    plt.axvline(v_value, linestyle='--', color=colors[gas], alpha=0.7)
plt.show.
```

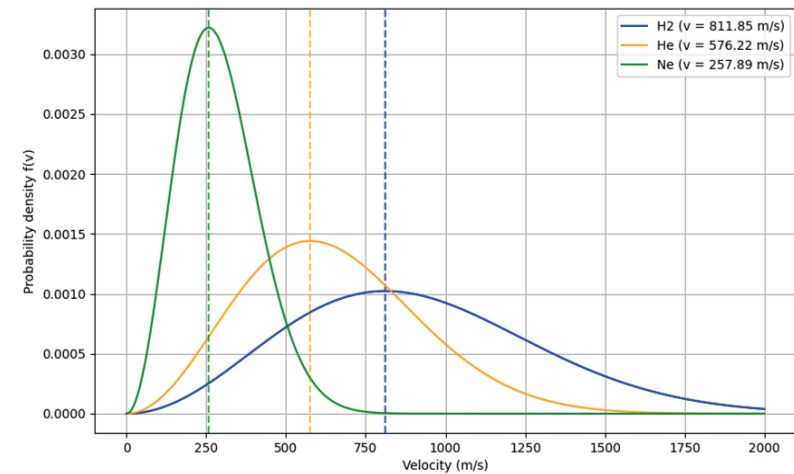


Figure 2 – Maxwell distribution for hydrogen, helium and neon (80 K)

Analysis of the graph presented in Figure 2 shows that the Maxwell distribution for maximum probable velocity of hydrogen (811.85 m/s) at a constant temperature of 80K has high values of speed compared to molecules with more mass, as helium (576.22 m/s) and neon (257 m/s), respectively.

Case 3

For argon molecules, three different temperatures are considered: 300 K, 500 K and 700 K. For each temperature, the average speed of argon molecules should be determined. Plot a graph of the Maxwell distribution by speeds and show the difference between them for each temperature [15].

To find the average speed and plot the graph the Equations (3–4) can be used, the values of T can be substituted in the following code:

```
import ...
T_values = [300, 500, 700]
mass_argon = 6.63e-26
k = 1.38e-23
colors = ['blue', 'orange', 'green']
v_avg = lambda m, T: np.sqrt(8 * k * T / (np.pi * m))
v_range = np.linspace(0, 2000, 500)
plt.figure(figsize=(10, 6))
for i, T in enumerate(T_values):
    f_maxwell = lambda v: 4 * np.pi * (mass_argon / (2 * np.pi * k * T))**(3/2) * v**2 * np.exp(-mass_argon * v**2 / (2 * k * T))
    plt.plot(v_range, f_maxwell(v_range), label=f'Ar (T = {T}K, v = {v_avg(mass_argon, T):.0f} m/s)', color=colors[i])
    plt.axvline(v_avg(mass_argon, T), linestyle='--', color=colors[i], alpha=0.7)
plt.text(1200, 0.001, r'$T_1 < T_2 < T_3$', fontsize=12, color='black')
plt.show
```

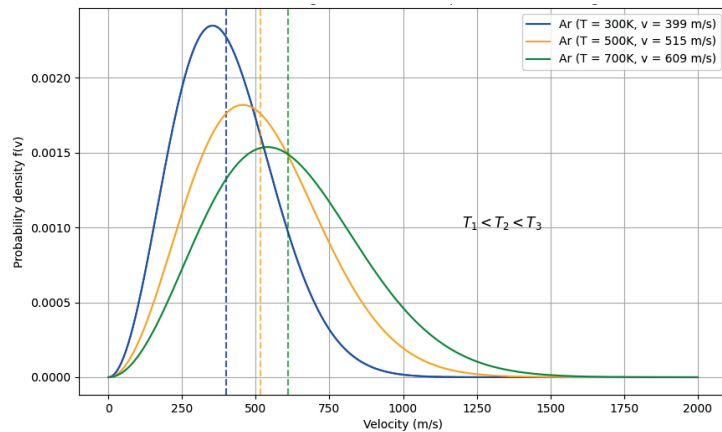


Figure 3 – Maxwell distribution for argon at different temperatures and average velocities

The obtained values of the average speed of argon molecules at different temperatures from the Figure 3 are: $v_{T300} = 399 \text{ m/s}$, $v_{T500} = 515 \text{ m/s}$, $v_{T700} = 609 \text{ m/s}$

Thus, based on the conducted studies for the Maxwell distribution function, it follows that for the case of an argon molecule, with an increase in temperature in the range from 300 K, 500 K to 700 K, an increase in the average velocity is observed. The Tables (1–3) provide calculations of the most probable, average, and root-mean-square velocities for various gases at constant temperatures of 300 K, 500 K, and 700 K.

Table 1 – Values of the most probable, average, and root-mean-square velocities for gases at a temperature of T=300 K

Gas	T, K	Vprob, m/s	VRMS, m/s	V, m/s
He	300	1116,5	1367,4	1260,1
CH ₄		558,2	683,7	630,1
NH ₃		541,6	663,3	514,4
C ₂		455,8	558,2	514,4
N ₂		422,0	516,8	476,3
O ₂		394,7	483,4	445,5
CO ₂		336,6	412,3	379,9

Table 2 – Values of the most probable, average, and root-mean-square velocities for gases at a temperature of T=500 K

Gas	T, K	Vprob, m/s	VRMS, m/s	V, m/s
He	500	1441,4	1765,3	1626,8
CH ₄		720,7	882,6	813,4
NH ₃		699,2	856,3	789,1
C ₂		588,4	720,7	664,1
N ₂		544,8	667,2	614,9
O ₂		509,6	624,1	575,2
CO ₂		434,6	532,3	490,5

Table 3 – Values of the most probable, average, and root-mean-square velocities for gases at a temperature of T=700 K

Gas	T, K	Vprob, m/s	VRMS, m/s	V, m/s
He	700	1705,4	2088,7	1924,9
CH ₄		852,7	1044,4	962,4
NH ₃		827,3	1013,2	933,7
C ₂		696,2	852,7	785,8
N ₂		644,6	789,5	727,5
O ₂		603,0	738,5	680,5
CO ₂		514,2	629,8	580,4

Case 4

Determine the altitude at which the pressure will decrease by half (to 50,000 Pa) at each of the specified temperatures T, K: 253, 273, 293 and 313 [16]. To solve the problem, the isothermal atmosphere model can be used, where the temperature is constant with altitude. Using the Equations (5-7) the calculations can be performed, the Python code is given below.

```
import ...
M = 0.029
R = 8.31
g = 10
P0 = 101125
k = R / M
def pressure_at_altitude(h, T):
    return P0 * np.exp((- M * g * h)/(R * T))
altitudes = np.linspace(0, 10000, 200)
temperatures = [253, 273, 293, 313]
plt.figure(figsize=(10, 8))
for T in temperatures:
    pressures = pressure_at_altitude(altitudes, T)
    plt.plot(altitudes, pressures, label=f'Temperature = {T} K')
plt.axhline(y=50000, color='black', linestyle='--', label='Pressure')
plt.show()
```

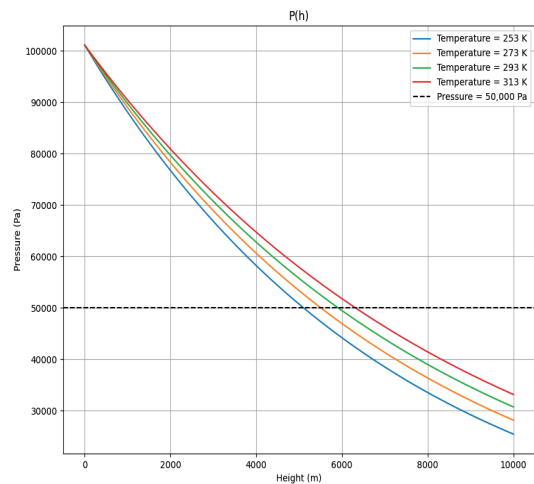


Figure 4 – Pressure dependence on altitude at different temperatures

Figure 4 demonstrates the direct relationship between temperature and the altitude at which pressure halves, with higher temperatures corresponding to greater altitudes:

$$h_1 = 5106 \text{ m}, h_2 = 5509 \text{ m}, h_3 = 5913 \text{ m}, h_4 = 6317 \text{ m}.$$

Case 5

A closed vertical cylindrical vessel of height h, located in a gravity field, is filled with one of three gasses: air, oxygen or argon. The mass of a gas molecule is m, the temperature in the entire vessel can take on temperature values T (K): 273, 292 and 313, and the gas concentration at a height h = 0 is equal to the Loschmidt number $n_0 = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$. Determine the dependence of the gas concentration n(h) on the height h for each temperature and plot the corresponding graphs. Calculate the concentrations at fixed heights (2000, 4000, 6000, 8000, 10,000 m) and present the results in a table for each gas and temperature [16]. The code below produces visualization and tabular data for the Boltzmann distribution:

```
import ...
BOLTZMANN_CONSTANT = 1.38e-23
GRAVITY = 9.81
LOSCHMIDT_NUMBER = 2.686e25
gas_properties = {
    "Air": 28.97 * 1.66e-27,
    "Oxygen": 32.00 * 1.66e-27,
    "Argon": 39.948 * 1.66e-27}
temp1 = int(input("Enter Temperature T1 (K) = "))
temp2 = int(input("Enter Temperature T2 (K) = "))
temp3 = int(input("Enter Temperature T3 (K) = "))
temperature_list = [temp1, temp2, temp3]
height_range = np.linspace(0, 10000, 1000)
for gas_name, molecular_mass in gas_properties.items():
    concentrations = [LOSCHMIDT_NUMBER * np.exp(-molecular_mass
    * GRAVITY * height_range / (BOLTZMANN_CONSTANT * temp))
    for temp in temperature_list]
    plt.figure(figsize=(6, 6))
    for temp, conc in zip(temperature_list, concentrations):
        plt.plot(height_range, conc, label=f'{gas_name}, T = {temp} K')
    plt.title(f'Concentration Dependence on Height for {gas_name}')
    plt.xlabel("Height (m)")
    plt.ylabel("Concentration (m^-3)")
    plt.legend()
    plt.grid(True, which="both", linestyle="--", linewidth=0.5)
    plt.show()
height_values = [2000, 4000, 6000, 8000, 10000]
def compute_concentration(molecular_mass, height_values, temperature_list):
    result_data = {}
    for temp in temperature_list:
        result_data[temp] = [
            LOSCHMIDT_NUMBER * np.exp(-molecular_mass *
            GRAVITY * h / (BOLTZMANN_CONSTANT * temp))
            for h in height_values]
```

Figure 5 illustrates the resulting plots showing the dependence of gas molecule concentration on altitude for various gases across a range of temperatures. Tables 4–6 provide detailed values of gas molecule concentrations at different altitudes for the specified temperatures. In the context of the research, the obtained results indicate the influence of temperature on the distribution of the velocities of molecules of various gases hydrogen, helium, argon and oxygen, as well as the dependence of temperature on pressure P (concentration n), and height within the framework of Maxwell-Boltzmann distributions.

Table 4 – Air concentration values depending on altitude and temperature

T, K h, m	273	293	313
2000	$2,09 \times 10^{25}$	$2,12 \times 10^{25}$	$2,15 \times 10^{25}$
4000	$1,62 \times 10^{25}$	$1,68 \times 10^{25}$	$1,73 \times 10^{25}$
6000	$1,26 \times 10^{25}$	$1,33 \times 10^{25}$	$1,39 \times 10^{25}$
8000	$0,98 \times 10^{25}$	$1,05 \times 10^{25}$	$1,12 \times 10^{25}$
10000	$0,77 \times 10^{25}$	$0,83 \times 10^{25}$	$0,90 \times 10^{25}$

Table 5 – Oxygen concentration values depending on altitude and temperature

T, K h, m	273	293	313
2000	$2,03 \times 10^{25}$	$2,07 \times 10^{25}$	$2,11 \times 10^{25}$
4000	$1,54 \times 10^{25}$	$1,60 \times 10^{25}$	$1,65 \times 10^{25}$
6000	$1,17 \times 10^{25}$	$1,24 \times 10^{25}$	$1,30 \times 10^{25}$
8000	$0,89 \times 10^{25}$	$0,96 \times 10^{25}$	$1,02 \times 10^{25}$
10000	$0,67 \times 10^{25}$	$0,74 \times 10^{25}$	$0,80 \times 10^{25}$

Table 6 – Values of argon concentration depending on altitude and temperature

T, K h, m	273	293	313
2000	$1,90 \times 10^{25}$	$1,94 \times 10^{25}$	$1,98 \times 10^{25}$
4000	$1,34 \times 10^{25}$	$1,41 \times 10^{25}$	$1,47 \times 10^{25}$
6000	$0,95 \times 10^{25}$	$1,02 \times 10^{25}$	$1,09 \times 10^{25}$
8000	$0,67 \times 10^{25}$	$0,74 \times 10^{25}$	$0,80 \times 10^{25}$
10000	$0,48 \times 10^{25}$	$0,54 \times 10^{25}$	$0,59 \times 10^{25}$

Conclusion

In the course of the conducted research, the dependencies of the Maxwell-Boltzmann distribution function for various gases under certain optimal conditions of action were analyzed using the Python programming language.

The brief results are presented below:

1) In the case of the Maxwell distribution for the argon molecule, an increase in the average speed is observed with an increase in temperatures (T, K): 300, 500 and 700.

2) The Maxwell distribution for hydrogen, helium and neon at 80K demonstrates that light molecules such as hydrogen have high values of average speeds, compared to massive molecules such as helium and neon.

3) Using the barometric formula, the dependencies of pressure P (up to 100 kPa) on the altitude h were obtained at temperature values T (K): 253, 273, 293 and 313. The pressure drops exponentially with increasing altitude due to a decrease in the mass of air above the point. At low temperatures, air is denser and the pressure decreases faster. At higher temperatures, air becomes less dense and the pressure decreases more slowly.

4) In the case of the Boltzmann distribution for air, argon and oxygen, it was found that the concentration of molecules decreases exponentially with height, with heavier argon settling faster than oxygen and air, and an increase in temperature reduces the effect of gravitational settling.

The results obtained demonstrate that Python can be used as a useful tool for modeling and visualizing physical phenomena and processes, which makes it useful in physics classes.

Thus, the inclusion of Python in the educational process of studying the distributions of the Maxwell-Boltzmann function opens up new horizons of possibilities for students and teachers. This programming language allows you to combine theoretical material and practical skills, which helps to increase student interest, develop their competencies in the field of data analysis and in-depth understanding of complex physical concepts.

REFERENCES

- 1 Андрюхина, Л. М., Садовникова, Н. О., Уткина, С. Н., Мирзаахмедов, А. М. Цифровизация профессионального образования: перспективы и незримые барьеры // Образование и наука. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 116–147.
- 2 Доброхотов, Ю. В. Один из подходов к изучению темы «Физическая модель идеального газа и распределение скоростей молекул Максвелла» // Наука и школа. – 2015. – С. 186–190.

REFERENCES

3 **Kravchenko, N., Revinskaja, O.** Studying Maxwell Distribution Using a Computer Model and in a Laboratory Experiment // Open Education. – 2016. – Vol. 0. – № 1(102). – Art. 1(102).

4 **Московский, С. Б.** Распределение Максвелла и парадоксы классической статистики // Образование и наука. – 2020. – Т. 2. – С. 365–368.

5 **McKinney, W.** Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and I Python. 2nd ed. Sebastopol, California: O'Reilly Media, Inc., 2018. – 45 p.

6 **Menke, E. J.** Series of Jupyter Notebooks Using Python for an Analytical Chemistry Course // J. Chem. Educ. – 2020. – Vol. 97. – № 10. – P. 3899–3903. – <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b01131>

7 **Virtanen, P.** Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nat Methods. – 2020. – Vol. 17. – № 3. – P. 261–272.

8 **Harris, C. R.** Array Programming with NumPy // Nature. – 2020. – Vol. 585. – № 7825. – P. 357–362.

9 **Yim, A., Chung, C., Yu, A.** Matplotlib for Python Developers: Effective Techniques for Data Visualization with Python. 2nd ed. Packt Publishing Ltd, 2018. – 24 p.

10 **Moruzzi, G.** Plotting with Matplotlib // Essential Python for the Physicist. Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 53–69. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-45027-4_3

11 **Führer, C., Solem, J. E., Verdier, O.** Scientific Computing with Python: High-Performance Scientific Computing with NumPy, SciPy, and Pandas. 2nd ed. Packt Publishing, 2021. – 89 p.

12 **Harrison, M., Petrou, T.** Pandas Cookbook: Practical Recipes for Scientific Computing, Time Series Analysis, and Exploratory Data Analysis Using Python. Packt Publishing Ltd, 2020. – 105 p.

13 **Molin, S.** Hands-On Data Analysis with Pandas : A Python Data Science Handbook for Data Collection, Wrangling, Analysis, and Visualization. Packt Publishing Ltd, 2021. – 210 p.

14 **Heredia Moyano, M. F.** Using Python for Teaching Classic Mechanics in University Students // RLJ. – 2023. – Vol. 11. – 14 p.

15 Interpreting Maxwell-Boltzmann Distributions Practice [Chemistry Practice Problems [Electronic Resource]. – Accessed: Dec. 12, 2024. – [Electronic resource]. – <https://study.com/skill/practice/interpreting-maxwell-boltzmann-distributions-questions.html>

16 **Миронова, Г. А., Брандт, Н. Н., Васильева, О. Н., Салецкий, А. М.** Молекулярная физика и термодинамика: методика решения задач: учеб. пособие. – 2-е изд. – М. : Физический факультет МГУ, 2016. – 120 с.

1 **Andrjuhina, L. M., Sadovnikova, N. O., Utkina, S. N., Mirzaahmedov, A. M.** Zifrovizatsiya professional'nogo obrazovaniya: perspektivy i nesnimye bar'ery [Digitalization of Professional Education: Prospects and Unresolved Barriers] // Informatsionnye tekhnologii v obrazovanii. – 2020. – Vol. 22. – № 3. – P. 116–147.

2 **Dobrokhoto, Yu. V.** Odin iz podkhodov k izucheniyu temy «Fizicheskaya model' ideal'nogo gaza i raspredelenie skorostey molekul Maksvela» [One Approach to Studying the Topic «Physical Model of an Ideal Gas and Maxwell's Molecular Velocity Distribution»] // Nauka i shkola. – 2015. – P. 186–190.

3 **Kravchenko, N., Revinskaja, O.** Studying Maxwell Distribution Using a Computer Model and in a Laboratory Experiment // Open Education. – 2016. – Vol. 0. – № 1(102). – Art. 1(102).

4 **Moskovskij, S. B.** Raspredelenie Maksvela i paradoksy klassicheskoy statistiki [Maxwell Distribution and the Paradoxes of Classical Statistics] // Pedagogicheskij opyt. – 2020. – Vol. 2. – P. 365–368.

5 **McKinney, W.** Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and I Python. 2nd ed. Sebastopol, California: O'Reilly Media, Inc., 2018. – 45 p.

6 **Menke, E. J.** Series of Jupyter Notebooks Using Python for an Analytical Chemistry Course // J. Chem. Educ. – 2020. – Vol. 97. – № 10. – P. 3899–3903. – <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b01131>

7 **Virtanen, P.** Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nat Methods. – 2020. – Vol. 17. – № 3. – P. 261–272.

8 **Harris, C. R.** Array Programming with NumPy // Nature. – 2020. – Vol. 585. – № 7825. – P. 357–362.

9 **Yim, A., Chung, C., Yu, A.** Matplotlib for Python Developers: Effective Techniques for Data Visualization with Python. 2nd ed. Packt Publishing Ltd, 2018. – 24 p.

10 **Moruzzi, G.** Plotting with Matplotlib // Essential Python for the Physicist. Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 53–69. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-45027-4_3

11 **Führer, C., Solem, J. E., Verdier, O.** Scientific Computing with Python: High-Performance Scientific Computing with NumPy, SciPy, and Pandas. 2nd ed. Packt Publishing, 2021. – 89 p.

12 **Harrison, M., Petrou, T.** Pandas Cookbook: Practical Recipes for Scientific Computing, Time Series Analysis, and Exploratory Data Analysis Using Python. Packt Publishing Ltd, 2020. – 105 p.

13 **Molin, S.** Hands-On Data Analysis with Pandas: A Python Data Science Handbook for Data Collection, Wrangling, Analysis, and Visualization. Packt Publishing Ltd, 2021. – 210 p.

14 **Heredia Moyano, M. F.** Using Python for Teaching Classic Mechanics in University Students // RLJ. – 2023. – Vol. 11. – 14 p.

15 Interpreting Maxwell-Boltzmann Distributions Practice |Chemistry Practice Problems [Electronic Resource]. – Accessed: Dec. 12, 2024. – [Electronic resource]. – <https://study.com/skill/practice/interpreting-maxwell-boltzmann-distributions-questions.html>

16 **Mironova, G. A., Brandt, N. N., Vasil'eva, O. N., Saleckij, A. M.** Molekuljarnaja fizika i termodinamika. Metodika reshenija zadach [Molecular Physics and Thermodynamics. Problem-Solving Methods]. – 2nd ed. – M. : Fizicheskij fakul'tet MGU, 2016. – 120 p.

Received 26.01.26.

Received in revised form 24.02.26.

Accepted for publication 19.03.26.

*С. А. Нұркенов¹, Ж.Е. Зәкиева², Д. Ә. Қауанова³

^{1,2}Астана халықаралық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

³Сарсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

26.01.26 ж. баспаға түсті.

24.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

PYTHON ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ГАЗДАРДЫҢ МАКСВЕЛЛ-БОЛЬЦМАН ҮЛЕСТІРІМДЕРІН МОДЕЛЬДЕУ: ТЕМПЕРАТУРА МЕН ҚЫСЫМНЫҢ ӘСЕРІ

Бұл жұмыста газ молекулаларының ықтималдық тығыздық таралуы оңтайлы жағдайларда зерттелді. Зерттеудің мақсаты – Максвелл-Больцман және барометрлік таралуларды қолданып, температура, қысым және биіктіктің газ мінез-құлқы мен концентрациясына әсерін талдау.

Python бағдарламалау тілін пайдалана отырып, газ молекулаларының ықтималдық тығыздық таралуын талдаудың мысалдары келтірілді. Нәтижелер көрсеткендей, температураның жоғарылауы молекулалардың орташа және ең ықтимал жылдамдықтарының артуына және Максвелл-Больцман

таралу қисығының тегістелуіне әкеледі. $T = 80$ К тұрақты температурада сутегі молекулалары неон және гелий сияқты ауыр молекулалармен салыстырғанда айтарлықтай жоғары орташа жылдамдықтарды көрсетеді.

Жалпы, газ молекулаларының жылдамдық таралуы молекулалық масса мен термодинамикалық жағдай параметрлеріне байланысты. Ұсынылған Максвелл-Больцман таралуын визуализациялау әдістемесі университет оқытушылары мен студенттер үшін пайдалы болуы мүмкін.

Кілтті сөздер: Максвелл таралуы, Python, модельдер, таралу функциясы, Больцман таралуы.

*С. А. Нұркенов¹, Ж. Е. Зәкиева², Д. Ә. Қауанова³

^{1,2}Международный университет Астана, Республика Казахстан, г. Астана;

³Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск.

Поступило в редакцию 26.01.26.

Поступило с исправлениями 24.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МАКСВЕЛЛА-БОЛЬЦМАНА ДЛЯ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PYTHON: ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

В данной работе исследуется распределение плотности вероятности молекул газов в оптимальных условиях. Цель исследования – проанализировать влияние температуры, давления и высоты на поведение и концентрацию газа с применением распределений Максвелла-Больцмана и барометрического распределения.

Приведены примеры анализа распределения плотности вероятности молекул газа с использованием языка программирования Python. Результаты показали, что повышение температуры приводит к увеличению средней и наиболее вероятной скорости молекул, а также к сглаживанию кривой распределения Максвелла-Больцмана. При постоянной температуре $T = 80$ К молекулы водорода демонстрируют значительно более высокие средние скорости по сравнению с более тяжёлыми молекулами, такими как неон и гелий.

В целом распределение скоростей молекул газа определяется молекулярной массой и термодинамическими параметрами состояния. Предложенная методика визуализации распределений Максвелла-Больцмана может быть полезна для преподавателей и студентов университетов.

Ключевые слова: распределение Максвелла, Python, модели, функция распределения, распределение Больцмана.

«МАТЕМАТИКА ЖӘНЕ СТАТИСТИКА» СЕКЦИЯСЫ

FTAMP 14.37.27

<https://doi.org/10.48081/BGQF1898>

***М. Әбдіжәлел¹, С. Тажиев², Е. Муртазин³, Д. Ережел⁴**

¹Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{2,3}У. М. Ахмедсафин атындағы гидрогеология және геоэкология Институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

⁴Almaty Management University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8878-7832>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5920-7757>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7404-4298>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

*e-mail: kanatkyzy_24@bk.ru

**ЖЕРАСТЫ СУЛАРЫ САПАСЫН БАҒАЛАУДА ӨЛШЕУ
БЕЛГІСІЗДІГІНІҢ ЕСЕБІ: ШУ ТРАНСШЕКАРАЛЫҚ
СУ ҚОЙНАУЫ МЫСАЛЫНДА**

Траншекаралық жерасты суларының сапасын бағалау қазіргі жағдайда тек гидрохимиялық көрсеткіштерді анықтаумен шектелмей, алынған нәтижелердің өлшеу сенімділігін сандық тұрғыдан дәлелдеуді талап етеді. Антропогендік әсердің күшеюі мен климаттық өзгерістер су ресурстарының жай-күйіне қосымша белгісіздік енгізіп, мониторинг деректерін интерпретациялауда метрологиялық тұрғыдан негізделген тәсілдерді қолданудың маңызын арттырады. Осы зерттеу Шу трансшекаралық су қойнауының жерасты сулары үшін аналитикалық өлшеулердің белгісіздігін бағалауға арналған жүйеленген әдістемелік негізді қалыптастыруға бағытталған.

Жұмыста гидрохимиялық параметрлерді анықтау барысында белгісіздік көздерінің қалыптасуы сынама алу, үлгілерді дайындау, аспаптық өлшеу және деректерді өңдеу сатылары бойынша кешенді түрде талданды. Белгісіздікті бағалау ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) қағидаттарына, сондай-ақ су сапасын аналитикалық бақылауға арналған халықаралық стандарттарға (ISO/IEC 17025:2017, ISO 11352:2012, IAS G17:2021) сәйкес жүзеге асырылды. Әртүрлі үлестердің қосынды әсерін ескере отырып, стандартты және

кеңейтілген белгісіздікті есептеудің қолданбалы мысалдары келтірілді.

Зерттеу нәтижелері өлшеу белгісіздігін ескеру аналитикалық деректердің интерпретациясын айтарлықтай өзгертетінін көрсетті, әсіресе көрсеткіш мәндері нормативтік шектерге жақын орналасқан жағдайларда. Мұндай тәсіл су сапасының сәйкестігін бағалау кезінде қате қорытындылардың алдын алып, шешім қабылдаудың ғылыми негізділігін арттырады. Сонымен қатар күрделі есептік жағдайлар үшін Монте-Карло модельдеуі мен байесиялық бағалау сияқты баламалы әдістердің қолданылу мүмкіндіктері қарастырылды.

Алынған қорытындылар өлшеу белгісіздігін бағалауды жерасты суларының сапасын мониторингтеу жүйелерінің міндетті құрамдас бөлігі ретінде енгізудің зертханалар арасындағы деректердің салыстырмалылығын қамтамасыз етуде және трансшекаралық су ресурстарын басқаруда сенімді ғылыми негіз қалыптастыруда маңызды рөл атқаратынын көрсетеді.

Кілтті сөздер: Өлшеу белгісіздігі, жерасты сулары, трансшекаралық су қойнаулары, ISO/IEC 17025, GUM, Монте-Карло әдісі, стандартты белгісіздік, су сапасы.

Кіріспе

Су – адам өмірін қамтамасыз ететін, орнықты экономикалық дамуды қолдайтын және экологиялық тепе-теңдікті сақтайтын негізгі табиғи ресурстардың бірі болып табылады [1]. Су ресурстарының сапасы халықтың денсаулығына, экожүйелердің жұмыс істеуіне және өңірлердің әлеуметтік-экономикалық тұрақтылығына тікелей әсер етеді [2]. Соңғы онжылдықтарда су сапасының нашарлауы жаһандық проблемаға айналып, қазіргі заманның ең күрделі сын-қатерлерінің бірі ретінде қарастырылуда [3; 4].

Климаттың өзгеруі, соның ішінде температураның көтерілуі, жауын-шашын режимінің өзгеруі және экстремалды гидрометеорологиялық құбылыстардың жиілеуі, сондай-ақ техногендік апаттар жер үсті және жерасты суларының жағдайына қосымша теріс әсерін тигізеді. Бұл үдерістер су ресурстарының қалыптасуы мен жаңаруына жауапты табиғи механизмдерді бұзып, ұзақ мерзімді деградация қауіпін күшейтеді, тұщы су қорының қолжетімділігін төмендетеді және су сапасының көрсеткіштерін нашарлатады [5]. Сонымен қатар халық санының өсуі және өнеркәсіпте, ауыл шаруашылығында және коммуналдық секторда суға деген сұраныстың артуы су экожүйелеріне түсетін антропогендік жүктеменің едәуір ұлғаюына алып келеді, бұл климаттық өзгерістердің әсерін күшейтіп, су тапшылығы

мәселесін ушықтырады [6]. Су сапасының төмендеуімен байланысты мәселелерді шешу Жаһандық орнықты даму күн тәртібінде басым бағыттардың бірі болып табылады. Атап айтқанда, тұрақты даму мақсаты 6 (ТДМ 6) барша үшін су мен санитарияның қолжетімділігін және орнықты басқарылуын қамтамасыз етуге бағытталған, бұл су сапасын бағалаудың ғылыми негізделген әдістерін енгізу, мониторинг жүйелерін жетілдіру және су ресурстарын басқарудың тиімділігін арттыру қажеттігін айқындайды [7].

Біріккен Ұлттар Ұйымының мәліметтері бойынша, 2050 жылға қарай су ресурстарына жаһандық сұраныс шамамен 55 %-ға артуы мүмкін, бұл халықты қауіпсіз әрі сапалы ауыз сумен қамтамасыз ету мәселесін едәуір күрделендіреді [8;9]. Осындай жағдайларда су сапасын мониторингтеу, бағалау және басқару мәселелері орнықты дамудың стратегиялық маңызы бар бағыттарына айналады, өйткені олар гидрохимиялық және экологиялық параметрлерді жүйелі бақылаумен қатар, өлшеу нәтижелерінің метрологиялық тұрғыдан негізделген бағалануын талап етеді. Басқарушылық шешімдердің сенімділігі өлшеу нәтижелерінің дәлдігіне, қайталанғыштығына және салыстырмалылығына тікелей тәуелді, ал бұған стандартталған әдістерді, калибрленген өлшеу құралдарын қолдану және өлшеу белгісіздігін бағалау арқылы қол жеткізіледі [2;10;11].

Белгісіздікті бағалау тәсілдерін қолдану аналитикалық нәтижелердің сенімділік деңгейін сандық түрде сипаттауға мүмкіндік береді және қате интерпретациялардың алдын алуға көмектеседі. Соңғы зерттеулер белгісіздік талдауын елемей су сапасын бұрмаланған түрде бағалауға алып келуі мүмкін екенін көрсетеді [12]. Мысалы, белгісіздікті су сапасының индекстеріне енгізу деректердің өзгергіштігін елемей су объектілерінің жай-күйін жіктеуді өзгертетінін көрсетті: тазартуды қажет ететін нысандар саны шамамен 8 %-ға артады, ал «өте нашар» санатына жатқызылатын үлес 26 %-ға ұлғаяды [13]. Бұл қоршаған ортаны мониторингтеу жүйелеріне белгісіздікті бағалауды енгізудің қорытындылардың сенімділігін арттыру үшін қажеттігін айқындайды [14].

Осы зерттеуде Шу трансшекаралық су қойнауы үшін жерасты суларының сапасын бағалау барысында өлшеу белгісіздігін сандық анықтау мақсатында ISO GUM тәсілі қолданылды [15]. Сынамаларды алудан бастап деректерді өңдеуге дейінгі барлық кезеңдерде белгісіздікті ескеру бақылау нүктелері мен мониторинг кезеңдері бойынша нәтижелердің салыстырмалылығын арттырып, трансшекаралық мониторинг аясында нормативтік талаптардың орындалуын және басқарушылық шешімдердің негізділігін күшейтеді [16]. Осы тұрғыда өлшеу белгісіздігін бағалау қосалқы рәсім ретінде емес, жерасты суларының сапасын мониторингтеу әдістемесінің ажырамас бөлігі ретінде қарастырылады. Ол өлшенген концентрацияларды нормативтік шекті

мәндермен дұрыс салыстыруды қамтамасыз етеді және гидрохимиялық параметрлердің кеңістіктік-уақыттық өзгергіштігін талдау, антропогендік жүктемені бағалау және трансшекаралық су ресурстарын басқару бойынша ғылыми негізделген ұсынымдар әзірлеу үшін сенімді ақпараттық негіз қалыптастырады.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу аймағы және деректерді жинау

Осы зерттеудің нысаны – Қырғыз Республикасы мен Қазақстан Республикасының шекаралас аумақтарын қамтитын және Орталық Азияның қуаң аймақтарын сумен қамтамасыз етуде маңызды рөл атқаратын Шу трансшекаралық су қойнауының жерасты сулары болып табылады. Бұл алаптың су ресурстары шөл және шөлейт аймақтардағы экожүйелердің жұмыс істеуін қамтамасыз етеді; соңғы жылдары өңір климаттың өзгеруі, ағын көлемінің азаюы және антропогендік қысымның күшеюі салдарынан су тапшылығы тәуекелдерінің артуына тап болып отыр.

Зерттеу пәні – жерасты суларының сапасының физика-химиялық параметрлерін аналитикалық өлшеу нәтижелерінің белгісіздігі болып табылады, ол сынамаларды алу, үлгілерді дайындау, аспаптық талдау және деректерді өңдеу кезеңдерінде қалыптасады. Зерттеу әдістемесі Шу трансшекаралық су қойнауы үшін жерасты суларының сапа көрсеткіштерін аналитикалық өлшеулердегі белгісіздікті бағалаудың жүйелік тәсіліне негізделген және ISO/IEC Guide 98-3:2008 (негізгі GUM құжаты) талаптарына, сондай-ақ аналитикалық өлшеулер саласындағы заманауи халықаралық стандарттарға сәйкес жүзеге асырылған. Зерттеу барысында зертханалардың құзыреттілігіне қойылатын ISO/IEC 17025:2017 стандартының қағидаттары, су талдауындағы белгісіздікті бағалау жөніндегі ISO 11352:2012 нұсқаулығы, сондай-ақ метрологиялық ұйымдардың қазіргі ұсынымдары (ILAC G17:2021, ISO/IEC Guide 98-6:2021 және басқалар) ескерілді. Аталған стандарттарды сақтау өлшеу нәтижелерінің халықаралық эталондарға қадағалануын, есептеулердің ашықтығын және белгісіздікті бағалау тәсілдерінің бірізділігін қамтамасыз етеді.

Белгісіздікті бағалаудың кешенді тәсілін қолдану Шу трансшекаралық су қойнауы бойынша жерасты суларына жүргізілген талдау нәтижелерінің метрологиялық қадағалануын, қайталанғыштығын және салыстырмалылығын қамтамасыз етеді. Әзірленген әдістеме аймақтық және мемлекетаралық су ресурстарын мониторингтеу бағдарламаларын жетілдіруде, сондай-ақ әртүрлі зертханалар арасындағы сапаны бақылау рәсімдерін үйлестіруде қолданылуы мүмкін.

Аналитикалық әдістер және деректер көлемі

Жерасты суларының сынамалары Шу трансшекаралық су қойнауы аумағындағы жеті елді мекенде (Қарасу, Өтеген, Аухатты, Сортөбе, Қордай, Сарыбұлақ және Қайнар) алынды. Сынамалар қолданыстағы орталықтандырылған және орталықтандырылмаған сумен жабдықтау жүйелерінің пайдалану ұңғымаларынан су сынамаларын алу жөніндегі қолданыстағы нормативтік құжаттардың талаптарына сәйкес жиналды. Өрбір сынама алу нүктесі үшін нәтижелердің қайталанғыштығын бағалау және А типті стандартты белгісіздікті есептеу мақсатында аналитикалық өлшеулердің қайталама сериясы ($n = 7$) орындалды.

Сутек иондарының концентрациясы (рН) біріктірілген шыны электродпен жабдықталған зертханалық рН-метрді пайдалана отырып, потенциометриялық әдіспен анықталды. Өлшеулер алдында аспап 20 °С температурада номинал мәндері 4,00; 7,00 және 9,18 болатын буферлік ерітінділер арқылы калибрленді.

Фторид-иондарының концентрациясы ион-селективті фторид электроды көмегімен потенциометриялық әдіс бойынша анықталды, бұл ретте иондық күш пен кешен түзуші компоненттердің әсерін жою үшін иондық күшті реттейтін буфер ерітіндісі (TISAB) қолданылды. Калибрлеу талданатын сынамаларда күтілетін концентрациялар диапазонын қамтитын стандартты фторид ерітінділерінің сериясы бойынша жүргізілді.

Мұнай өнімдерінің мөлшері органикалық еріткішпен экстракциялаудан кейін фотометриялық әдіспен анықталды, кейін алынған экстракттың ультракүлгін спектр аймағындағы оптикалық тығыздығы өлшенді. Калибрлеу қисықтары белгілі концентрациядағы стандартты мұнай өнімдері ерітінділері негізінде тұрғызылды.

Беттік-белсенді заттардың (ББЗ) мөлшері фотометриялық әдіс арқылы анықталды, бұл кезде аниондық индикатор реагенттері қолданылып, олардың судағы ББЗ-мен түсті кешен түзуі тіркелді; түстің қарқындылығы сынамадағы ББЗ концентрациясына пропорционал болды.

Аналитикалық жабдықтарды калибрлеу және әдістемелердің жұмыс қабілеттілігін тексеру ұлттық және халықаралық стандарттарға қадағаланатын сертификатталған стандартты үлгілер мен калибрлеу ерітінділерін пайдалана отырып жүргізілді. В типті белгісіздікке қосылатын үлестерді бағалау кезінде аспаптардың техникалық сипаттамалары, калибрлеу сертификаттарының деректері және калибрлеу қисықтарының параметрлері ескерілді.

Белгісіздікті бағалаудың жалпы қағидаттары

Анықталатын шаманың концентрациясын өлшеу нәтижесі келесі түрде өрнектеледі:

$$x = \bar{x} \pm U, P = 0.95 \quad (1)$$

мұнда \bar{x} – өлшенетін шаманың бағаланған мәні (орташа мән),
U – кеңейтілген белгісіздік,
P – сенімділік деңгейі (әдетте 95 %).
Кеңейтілген белгісіздік келесі формула бойынша есептеледі:

$$U = k \cdot u_c \quad (1.1)$$

мұнда u_c – біріктірілген стандартты белгісіздік,
k – қамту коэффициенті (әдетте $k = 2$).

Жерасты сулары талдауындағы белгісіздік көздері

Жерасты суларының талдауында белгісіздіктің негізгі көздеріне мыналар жатады:

– Сынамаларды алу белгісіздігі: су қойнауының кеңістіктік әртектілігі; су құрамының уақыт бойынша өзгергіштігі; ұңғыма конструкциясының және сынама алу режимінің әсері.

– Үлгілерді дайындау белгісіздігі: сүзу; консервациялау (қышқылдау, салқындату); тасымалдау және сақтау.

– Өлшеу белгісіздігі: аналитикалық жабдықтарды калибрлеу; әдістің қайталанғыштығы мен қайта өндірілуі; матрицалық әсерлер.

– Деректерді өңдеу белгісіздігі: калибрлеу функцияларын аппроксимациялау; нәтижелерді дөңгелектеу; өлшеулер сериясын статистикалық өңдеу.

Аталған факторлар жиынтығы өлшеу нәтижесінің жалпы белгісіздігін қалыптастырады. Мұндай белгісіздік көздерінің санаттары халықаралық экологиялық мониторинг тәжірибесінде кеңінен танылған. Мысалы, [17], еңбегінде белгісіздік қоршаған ортаны зерттеудің барлық кезеңдерінде – сынама алудан және зертханалық талдаудан бастап экологиялық модельдеу мен тәуекелдерді бағалауға дейін – сөзсіз орын алатыны көрсетілген. Осы көпқұрамды белгісіздікті мойындау қоршаған ортаның нақты жай-күйін дәл түсінуге және негізделген шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді.

А типті стандартты белгісіздік

А типті стандартты белгісіздік қайталанған өлшеулер сериясының статистикалық талдауы негізінде анықталады.

Концентрацияны өлшеу нәтижелері үшін орташа мән келесі формуламен есептеледі:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.2)$$

Стандартты ауытқу:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1.3)$$

Орташа мәннің стандартты белгісіздігі:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1.4)$$

Осылайша, А типті үлес бірдей жағдайларда алынған бір үлгінің қайталанған өлшеулерінің нәтижелеріндегі шашырауды ескереді.

В типті стандартты белгісіздік

В типті белгісіздік өлшеу нәтижелерінің статистикалық өңдеуінен тікелей алынбайтын априорлық ақпарат негізінде бағаланады. В типті белгісіздік көздеріне мыналар жатады:

– аспаптардың техникалық сипаттамалары (дәлдік, өлшеу қатесі);

– өлшеу құралдарының калибрлеу сертификаттары;

– нормативтік және әдістемелік құжаттар (әдістің рұқсат етілген қателіктері);

– әдеби деректер және алдыңғы тәжірибе (әдісті валидациялау нәтижелері, сапаны бақылау деректері).

Мысалы, егер калибрлеу ерітіндісінің белгісіздігі $\pm a$ ретінде беріліп, бірқалыпты (тікбұрышты) үлестірім қабылданса, стандартты белгісіздік келесі түрде есептеледі:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (1.5)$$

Ал егер қалыпты үлестірім қабылданып, стандартты ауытқу белгілі болса, онда:

$$u_B = \sigma \quad (1.6)$$

Сертификатта $\pm 0,5\%$ белгісіздік шегі көрсетіліп, бірқалыпты үлестірім қабылданған жағдайда, стандартты белгісіздік келесі формула бойынша есептеледі:

$$u_{\text{cal}} = \frac{U_{\text{cert}}}{\sqrt{3}} \quad (1.7)$$

мұнда U_{cert} – сертификатта көрсетілген белгісіздік шегі, ал $\sqrt{3}$ – бірқалыпты (тікбұрышты) үлестірімге сәйкес келетін бөлгіш.

Қалыпты үлестірім қабылданған жағдайда және стандартты ауытқу бастапқы дереккөзде нақты көрсетілсе, ол белгісіздік үлесі ретінде тікелей қолданылады:

$$u = \sigma \quad (1.8)$$

мұнда σ – тиісті дереккөзден алынған стандартты ауытқу.

Егер бірнеше тәуелсіз В типті белгісіздік көздері болса, олар квадраттық қосу ережесі (root sum of squares, RSS) бойынша біріктіріледі:

$$u_B = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (1.9)$$

Біріктірілген стандартты белгісіздік

Біріктірілген стандартты белгісіздік барлық тәуелсіз стандартты белгісіздік құрамдастарының квадраттарының қосындысының квадрат түбірі ретінде анықталады:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (2)$$

Жерасты суларының концентрациясын талдау үшін белгісіздіктің типтік құрылымы келесі түрде өрнектелуі мүмкін:

$$u_c = \sqrt{u_{sam}^2 + u_{prep}^2 + u_{meas}^2 + u_{cal}^2 + u_A^2} \quad (2.1)$$

мұнда $u_{sampling}$ – сынама алу белгісіздігі,
 u_{prep} – үлгіні дайындау белгісіздігі,
 u_{meas} – аспаптық өлшеу белгісіздігі,
 u_{cal} – калибрлеу белгісіздігі,
 u_A – А типті стандартты белгісіздік.

1-кесте – Аналит концентрациясы үшін өлшеу белгісіздігінің бюджетін құрастыру (фторид-иондары мысалында)

Белгісіздік көзі	Бағалау түрі	Мәні, мг/л	Үлестірім түрі	Стандартты белгісіздікке түрлендіру u_i , мг/л	Ескертпе
Өлшеу қайталанғыштығы	А типі	$s = 0.28$	Қалыпты	$u_1 = 0.28/\sqrt{7} = 0.11$	7 рет қайталанған өлшеу
Аспапты калибрлеу	В типі	± 0.20	Қалыпты	$u_2 = 0.20$	Калибрлеу сертификатын аң
Сертификатталған стандартты үлгі (CRM)	В типі	± 0.30	Бірқалыпты	$u_3 = 0.30/\sqrt{3} = 0.17$	CRM белгісіздігі
Үлгіні дайындау (сүзу, консервациялау)	В типі	± 0.25	Қалыпты	$u_4 = 0.25$	Әдісті валидациялау
					деректері бойынша
Деректерді өңдеу (аппроксимациялау, дөңгелектеу)	В типі	± 0.10	Бірқалыпты	$u_5 = 0.10/\sqrt{3} = 0.06$	Есептеу түрлендірулері
Біріктірілген стандартты белгісіздік	—	—	—	$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} = 0.38$	—
Кеңейтілген белгісіздік ($k = 2$)	—	—	—	$U = 2 \cdot 0.38 = 0.76$	Сенімділік деңгейі 95 %
Қорытынды нәтиже	—	—	—	$x = \bar{x} \pm$ мг/л	мысалы, $1.85 \pm$ мг/л

Кеңейтілген белгісіздік

Кеңейтілген белгісіздік біріктірілген стандартты белгісіздікті қамту коэффициентіне көбейту арқылы анықталады:

$$U = k \cdot u_c \quad (2.2)$$

Сенімділік деңгейі 95 % болған жағдайда, қалыпты үлестірімге сәйкес келетін $k = 2$ қамту коэффициенті қабылданады.

Белгісіздікті есептеудің мысалы

Әдістеменің қолданылуын көрсету мақсатында нитраттар концентрациясын анықтау кезіндегі өлшеу белгісіздігін есептеудің егжей-тегжейлі мысалы келтіріледі.

Нитраттардың келесі концентрация мәндері алынсын (мг/л):
44.5; 46.0; 45.2; 47.1; 43.8; 45.6; 44.9 мг/л.

Орташа мән:

$$\bar{x} = \frac{44.5+46.0+45.2+47.1+43.8+45.6+44.9}{7} = 45.3 \text{ мг/л} \quad (2.3)$$

Стандартты ауытқу:

$$s = \sqrt{\frac{(44.5-45.3)^2 + \dots + (44.9-45.3)^2}{6}} \approx 1.1 \text{ мг/л} \quad (2.4)$$

A типті стандартты белгісіздік:

$$u_A(\bar{x}) = \frac{1.1}{\sqrt{7}} \approx 0.4 \text{ мг/л} \quad (2.5)$$

B типті біріктірілген стандартты белгісіздік 0.5 мг/л-ге тең деп қабылдайық.

Біріктірілген стандартты белгісіздік:

$$u_c = \sqrt{(0.4)^2 + (0.5)^2} = 0.6 \text{ мг/л} \quad (2.6)$$

Кеңейтілген белгісіздік:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0.6 = 1.2 \text{ мг/л} \quad (2.7)$$

Қорытынды нәтиже:

$$x = 45.3 \pm 1.2 \text{ мг/л}, P = 0.95 \quad (2.8)$$

Бұл есептеу кеңейтілген белгісіздікті ескере отырып, өлшеу нәтижесін 44.1–46.5 мг/л аралығында көрсетуге болатынын көрсетеді. Біріктірілген белгісіздік қайталанған өлшеулер нәтижелерінің шашырауымен байланысты статистикалық құрамдасқа (A типті стандартты белгісіздік) және аспаптарды калибрлеу, сертификатталған стандартты үлгілердің сипаттамалары, үлгілерді дайындау және деректерді өңдеу сияқты жүйелік көздерге (B типті белгісіздіктер) бірдей дәрежеде тәуелді.

Осылайша, кеңейтілген белгісіздік келесі формула бойынша есептеледі:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2.9)$$

мұнда:

u_A – A типті стандартты белгісіздік;

u_B – B типті біріктірілген стандартты белгісіздік;

$k = 2$ – 95 % сенімділік деңгейіне сәйкес келетін қамту коэффициенті.

Қорытынды нәтиже келесі түрде беріледі:

$$x = \bar{x} \pm U = 45.3 \pm 1.2 \text{ мг/л} \quad (3)$$

Бұл тәсіл аналитикалық деректерді интерпретациялау кезінде, әсіресе өлшенген мән нормативтік шекті көрсеткіштерге (мысалы, рұқсат етілген шекті концентрация) жақын болған жағдайларда, белгісіздіктің барлық маңызды көздерін дұрыс ескеруге мүмкіндік береді.

Нормативтік шекті мәндерге сәйкестікті бағалау кезінде белгісіздікті ескеру

Өлшеу нәтижелерін рұқсат етілген шекті концентрациялармен (РЕШК, MPC) салыстыру кезінде нормативтік талаптарға сәйкестікті дұрыс интерпретациялау үшін есептелген өлшеу белгісіздігін міндетті түрде ескеру қажет. Халықаралық нұсқаулық құжаттарда ұсынылған тәсілдер аясында өлшеу белгісіздігін қамтитын келесі шешім қабылдау ережесі қолданылады:

– егер $\bar{x} + U < \text{MPC}$,

онда шекті мәннен асу байқалмайды;

– егер $\bar{x} - U > \text{MPC}$,

онда шекті мәннен асу расталады;

– егер MPC мәні $[\bar{x} - U; \bar{x} + U]$

аралықта орналасса, қосымша бақылау немесе қайта өлшеулер жүргізу қажет.

Бұл тәсіл I типті қателіктердің (нормативтік шек нақты сақталған жағдайда, шектен асу деп қате жариялау) және II типті қателіктердің (нақты шектен асуды анықтай алмау) туындау қаупін төмендетеді. Ол ISO/IEC

17025 және IAC G8/G17 стандарттарында белгіленген шешім қабылдау қағидаттарына сәйкес келеді және қоршаған ортаны реттеу саласындағы қорытындылардың орнықтылығы мен дәлелділігін арттырады.

Нәтижелер және талқылау

Жерасты суларының гидрохимиялық сипаттамалары

Алынған нәтижелер барлық зерттелген нүктелерде жерасты суларының рН мәндері 8.0–8.24 аралығында екенін көрсетеді, бұл карбонатты су қойнауларымен байланысты әлсіз сілтілі жерасты суларына тән көрсеткіш болып табылады. Фторид-иондарының концентрациялары 1.0–2.3 мг/л аралығында өзгеріп отырады. Ең жоғары мәндер Сарыбұлақ ауылы аумағында тіркелді, мұнда фторидтің концентрациясы 2.3 мг/л-ге жетіп, рұқсат етілген шекті концентрациядан (РЕШК, МРС) 1.5 мг/л асып отыр. Мұнай көмірсутектері мен беттік-белсенді заттардың мөлшері барлық сынамааларда белгіленген нормативтік шектерден аспайды және фондық деңгейлерге жақын мәндерде сақталады.

Мониторинг нүктелері бойынша су сапасы көрсеткіштерінің кеңістіктік өзгергіштігін көрнекі түрде көрсету мақсатында жинақталған нәтижелер 2-кестеде келтірілген.

2-кесте – Жерасты суларының гидрохимиялық параметрлері (орташа мәндер, n = 7)

Мониторинг нүктесі	pH	F ⁻ , мг/л	Мұнай көмірсутектері, мг/л	Беттік-белсенді заттар, мг/л
Қарасу ауылы (елді мекен)	8.00	1.5	0.005	0.05
Өтеген ауылы (елді мекен)	8.04	1.2	0.010	0.05
Аухатты ауылы (елді мекен)	8.16	1.5	0.005	0.05
Сортөбе ауылы (елді мекен)	8.24	1.3	0.005	0.05
Қордай ауылы (елді мекен)	8.21	1.2	0.005	0.05
Сарыбұлақ ауылы (елді мекен)	8.19	2.3	0.005	0.05
Қайнар ауылы (елді мекен)	8.15	1.0	0.005	0.05

рН мәндерінің кеңістіктік өзгерісі шектеулі болып табылады және барлық өлшеулер карбонатты типтегі жерасты суларына тән диапазонда орналасқан. Фторид-иондарының концентрациясы нысандардың басым бөлігінде РЕШК-тен төмен, алайда Сарыбұлақ аумағында жергілікті сипаттағы жоғарылау байқалады. Мұнай көмірсутектері мен беттік-белсенді заттардың концентрациялары барлық сынамааларда нормативтік шекті мәндерден едәуір төмен болып, сынама алу сәтінде аталған компоненттер бойынша айқын техногендік ластанудың жоқтығын көрсетеді.

Аналитикалық өлшеулердің белгісіздігін бағалау

Осы зерттеу аясында ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) ұсынымдарына сәйкес Шу трансшекаралық су қойнауы жерасты суларының сапасының негізгі параметрлері үшін аналитикалық өлшеулердің белгісіздігі сандық тұрғыдан бағаланды. Су сапасын аналитикалық бақылауға қойылатын қазіргі заманғы талаптар өлшеу белгісіздігін міндетті түрде сандық бағалауды көздейді.

Белгісіздікті бағалау аналитикалық өлшеулерді метрологиялық қамтамасыз етудің негізгі элементі болып табылады және келесі мүмкіндіктерді қамтамасыз етеді:

– өлшенген концентрацияларды сенімділік интервалдарын ескере отырып дұрыс интерпретациялау;

– әртүрлі зертханаларда және әртүрлі әдістермен алынған нәтижелерді бірыңғай метрологиялық негізде салыстыру;

– көрсеткіш мәндері нормативтік шектерге жақын болған жағдайда негізделген шешімдер қабылдау (бұл су сапасының жай-күйін қате жіктеудің алдын алады);

– өлшеу нәтижелерінің халықаралық стандарттар мен эталондарға қадағалануын қамтамасыз ету, бұл трансшекаралық мониторинг жүйесінде сенім қалыптастыру үшін аса маңызды.

Халықаралық стандарттарға (GUM, ISO/IEC 17025 және т.б.) сәйкес белгісіздікті бағалау әдістемелерін қолдану жерасты суларының сапасын бақылаудың ашықтығын, қайталанғыштығын және ғылыми орнықтылығын қамтамасыз етеді. Осы зерттеуде рН, фторид-иондары, мұнай көмірсутектері және беттік-белсенді заттар үшін есептелген кеңейтілген белгісіздік мәндері (P = 95 %) қолданылған аналитикалық әдістердің рұқсат етілген қателіктерімен шамалас болды. Мысалы, рН үшін салыстырмалы белгісіздік 0.5 %-дан аспады; фторид-иондары үшін ол шамамен 10 % деңгейінде болды, бұл концентрациялардың анықтау шектеріне жақын орналасуымен байланысты; ал мұнай көмірсутектері мен беттік-белсенді заттар үшін салыстырмалы белгісіздік олардың өте төмен концентрацияларына байланысты 15–20 % аралығында өзгерді. Аталған бағалаулар алынған деректердің сапасының

канағаттанарлық екенін растайды және оларды сенімді салыстырмалы талдау жүргізуге мүмкіндік береді.

Айта кету қажет, күрделі жағдайларда белгісіздікті бағалаудың заманауи есептеу тәсілдері нәтижелердің сенімділігін одан әрі арттыра алады. Атап айтқанда, JCGM 101:2008 және ISO/IEC Guide 98-3-S1 құжаттарында сипатталған Монте-Карло әдісі кіріс шамаларының үлестірімдерін көп мәрте модельдеу арқылы шығыс үлестірімін алу негізінде аналитикалық есептеулерге балама тәсіл ұсынады. Бұл тәсіл күрделі сызықтық емес модельдер немесе асимметриялық кіріс үлестірімдері жағдайында әсіресе тиімді болып табылады [18].

Тағы бір маңызды тәсіл – байесиялық әдіс, онда өлшенетін шаманың шынайы мәні априорлық үлестірімі бар кездейсоқ айнымалы ретінде қарастырылады, ал эксперименттік деректер апостериорлық үлестірімді алу үшін пайдаланылады. Байесиялық бағалау априорлық ақпаратты енгізуге мүмкіндік береді және үлгі көлемі шектеулі болған жағдайда анағұрлым орнықты бағалар алуға жағдай жасайды. Байесиялық әдістер классикалық тәсілдер шектеулі болған жағдайларда, мысалы, нөлге жақын нәтижелердің немесе теріс түзету мәндерінің үлесі жоғары болған кезде, артықшылыққа ие екені көрсетілген [19]. Алдыңғы зерттеулер Монте-Карло әдісінің микрофлюидтік өлшеулерде белгісіздікті бағалаудың практикалық баламасы бола алатынын, ал байесиялық тәсіл күрделі нәтижелік үлестірімдер үшін анағұрлым дәл бағалар ұсынатынын дәлелдейді [20].

Осы зерттеуде негізгі есептеулер классикалық GUM әдістемесі бойынша жүргізілді, алайда белгісіздікті бағалаудың баламалы тәсілдері туралы хабардар болу болашақ әдістемелік дамулар үшін, атап айтқанда белгісіздікті ластаушы заттардың тасымалдану модельдеріне немесе су сапасының индекстеріне біріктіру сияқты бағыттарда маңызды болып табылады [2].

Белгісіздіктің нәтижелерді интерпретациялауға әсері

Өлшеулердің кеңейтілген белгісіздігін ескеру аналитикалық бақылау нәтижелерін интерпретациялауға түбегейлі әсер етеді. Зерттелген параметрлердің басым бөлігі үшін (рН, мұнай көмірсутектері, беттік-белсенді заттар) белгісіздік интервалдарының жоғарғы шектері тиісті рұқсат етілген шекті концентрациялардан (РЕШК, МРС) едәуір төмен орналасқан. Бұл аталған компоненттер бойынша нормативтік шектердің асуының жоқтығын жоғары сенімділік деңгейімен көрсетуге мүмкіндік береді. Мысалы, мұнай көмірсутектерінің ең жоғары тіркелген концентрациясы (Өтеген ауылында 0.01 мг/л), өлшеу белгісіздігін ($U \approx \pm 0.002$ мг/л) ескергеннің өзінде, РЕШК = 0.1 мг/л мәнінен әлдеқайда төмен болып қалады. Демек, өлшеу белгісіздігін ескеру мұнай көмірсутектерімен ластанудың жоқтығы жөніндегі қорытындыға әсер етпейді.

Керісінше, кейбір нүктелерде, әсіресе Сарыбұлақ аумағында, фторид-иондарының концентрациясы үшін өлшенген мән (2.3 мг/л) нормативтік шекке (1.5 мг/л) жақын орналасқан. Мұндай жағдайларда өлшеу белгісіздігін ескеру жерасты суларының сапа жай-күйін неғұрлым орнықты және негізделген түрде жіктеуге мүмкіндік береді. 2.2.8-бөлімде сипатталған шешім қабылдау ережесіне сәйкес, егер МРС мәні $\bar{x} \pm U$ интервалында орналасса, сәйкестік немесе сәйкессіздік туралы бірімәнді қорытынды жасау мүмкін болмайды.

Осы зерттеуде Сарыбұлақ үшін $\bar{x} = 2.3$ мг/л және $U = 0.4$ мг/л болған жағдайда, 95 % сенімділік деңгейіне сәйкес интервал шамамен 1.9–2.7 мг/л құрайды. РЕШК = 1.5 мг/л осы интервалдан төмен орналасқандықтан, белгісіздікті ескергеннің өзінде шекті мәнің асуы жоғары ықтималдықпен расталады. Алайда егер РЕШК, мысалы, 2.0 мг/л болған жағдайда, $\bar{x} = 2.3$ мг/л және $U = 0.4$ мг/л үшін нормативтік шек белгісіздік интервалында (1.9–2.7 мг/л) орналасар еді. Мұндай жағдайда нәтиже шекаралық (borderline) ретінде жіктеліп, қосымша өлшеулер немесе бақылау іс-шараларын жүргізу талап етілер еді.

Осылайша, белгісіздікті ескеру су сапасын бағалау кезінде жалған оң (false-positive) және жалған теріс (false-negative) қорытындылардың алдын алады. Бұл қағидат сәйкестік немесе сәйкессіздік туралы қорытындылар сандық тұрғыдан анықталған сенімділік деңгейімен қатар берілуі тиіс деген тәсілмен толық үйлеседі.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Ғылыми-зерттеу жұмысы ИРН АР23489813 «Қырғызстан тарапынан Жамбыл облысының тұщы жерасты суларын пайдалану және қорғау саласында трансшекаралық мәселелердің туындау тәуекелдерін бағалау» тақырыбы бойынша гранттық қаржыландыру аясында жүргізілді.

Қорытынды

Осы зерттеуде ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) ұсынымдарына негізделген және заманауи әдістемелік тәсілдерді қамтитын Шу трансшекаралық су қойнауындағы жерасты суларының сапа көрсеткіштерін аналитикалық өлшеулердің белгісіздігін бағалаудың метрологиялық тұрғыдан негізделген тәсілі сынақтан өткізіліп, валидацияланды. Өлшеу белгісіздігін ескеру, әсіресе өлшенген мәндер нормативтік шектерге жақын болған жағдайда, гидрохимиялық мониторинг нәтижелерін интерпретациялау үшін аса маңызды екені көрсетілді. Қажет болған кезде статистикалық модельдеу элементтерімен толықтырылған классикалық GUM тәсілін қолдану алынған қорытындылардың сенімділігі мен орнықтылығын арттырады.

Алынған нәтижелер өлшеу белгісіздігін кешенді бағалау шекаралық концентрациялар жағдайында да жерасты суларының сапасын сенімді

интерпретациялауға мүмкіндік беретінін растайды. Мысалы, фторид-иондары үшін өлшенген концентрация 2.3 мг/л және кеңейтілген белгісіздік ± 0.4 мг/л болғанда, алынған сенімділік интервалы [1.9; 2.7] мг/л рұқсат етілген шекті концентрациядан (РЕШК = 1.5 мг/л) асып түседі, бұл 95 % сенімділік деңгейімен шекті мәнің асуын көрсетеді. Ал мұнай көмірсутектері үшін 0.01 мг/л мәні және ± 0.002 мг/л белгісіздігі ([0.008; 0.012] мг/л интервалы) нормативтік шектен (РЕШК = 0.1 мг/л) едәуір төмен қалып, шектен асу ықтималдығын іс жүзінде жоққа шығарады.

Осы зерттеуде ISO/IEC Guide 98-3, ISO/IEC 17025:2017 және ISO 11352:2012 талаптарына сәйкес қолданылған жүйелі белгісіздікті бағалау тәсілі белгісіздіктің негізгі көздерінің үлестерін сандық тұрғыдан есепке алуға мүмкіндік берді. Олардың қатарына қайталанғыштық ($u_A \approx 0.11$ мг/л), калибрлеу (0.20 мг/л), сертификатталған стандартты үлгілер (0.17 мг/л), үлгіні дайындау (0.25 мг/л) және деректерді өңдеу (0.06 мг/л) жатады. Біріктірілген стандартты белгісіздік 0.38 мг/л-ге жетсе, кеңейтілген белгісіздік 0.76 мг/л-ді құрады.

Мұндай тәсіл есептеулердің ашықтығын, нәтижелердің қайталанғыштығын және басқарушылық шешімдер қабылдау үшін берік ғылыми негізді қамтамасыз етеді. Бұл, әсіресе, мемлекетаралық деректердің бірізділігі экологиялық басқару мен саясатты қалыптастыру үдерістеріне тікелей әсер ететін трансшекаралық алаптар үшін аса маңызды.

Алынған нәтижелер мен ұсынылған әдістемелік негіз аймақтық және мемлекетаралық жерасты суларының сапасын мониторингтеу бағдарламаларын жетілдіруде қолданылуы мүмкін. Мониторингтік есептерде өлшеу белгісіздігін халықаралық стандарттарға (ISO/IEC 17025, ILAC G17 және т.б.) сәйкес тұрақты түрде есептеу және ұсыну зертханалар арасындағы деректердің салыстырмалылығын арттырып, қоршаған ортаны бақылаудың ашықтығы мен сенімділігін күшейтеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Balta, D., Balta, Kaç, S., Balta, M., Eken, S.** Water quality estimation and anomaly detection: a review // EAI Endorsed Transactions on Internet of Things. – 2023. – Vol. 9. – e2. – <https://doi.org/10.4108/eetiot.v9i4.3660>.

2 **Sheikholeslami, R., Jahangir, F.** An uncertainty-informed water quality index: incorporation of data uncertainty into water quality assessment // Environmental Modelling & Software. – 2026. – Vol. 196. – 106760. – <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106760>.

3 **Shi, X., Mao, D., Song, K., Xiang, H., Li, S., Wang, Z.** Effects of landscape changes on water quality: a global meta-analysis // Water Research. – 2024. – Vol. 260. – 121946. – <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121946>.

4 **Abdul-Aziz, O.I., Ahmed, S.** Relative linkages of stream water quality and environmental health with the land use and hydrologic drivers in the coastal-urban watersheds of Southeast Florida // GeoHealth. – 2017. – Vol. 1. – P. 180–195. – <https://doi.org/10.1002/2017GH000058>.

5 **He, L., Zhou, Y., Yang, H., Su, L., Ma, J.** A deep learning-based method for marine oil spill detection and its application in UAV imagery // Marine Pollution Bulletin. – 2026. – Vol. 222. – 118889. – <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118889>.

6 **Okello, C., Tomasello, B., Greggio, N., Wambiji, N., Antonellini, M.** Impact of population growth and climate change on the freshwater resources of Lamu Island, Kenya // Water. – 2015. – Vol. 7. – P. 1264–1290. – <https://doi.org/10.3390/w7031264>.

7 **Rajendrakumar, S., Mavhaire, D., Shimly, S., Rahut, D. B., Tharanidevi, N., Ramachandran, V. S., Timilsina, R. R.** Drivers and barriers towards achieving SDG 6 on clean water and sanitation for all: an Indian perspective // World Development Sustainability. – 2025. – Vol. 7. – 100228. – <https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100228>.

8 **Boretti, A., Rosa, L.** Reassessing the projections of the World Water Development Report // npj Clean Water. – 2019. – Vol. 2. – 15. – <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>.

9 **Grouillet, B., Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A.** Historical reconstruction and 2050 projections of water demand under anthropogenic and climate changes in two contrasted Mediterranean catchments // Journal of Hydrology. – 2015. – Vol. 522. – P. 684–696. – <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.029>.

10 **Priyadarsini, M., Rahul, Paikra, R.** AI-driven IoT and gamification for smart water management: real-time monitoring and predictive analytics // Environmental Modelling & Software. – 2026. – Vol. 195. – 106711. – <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106711>.

11 **Wei, C., Zhao, T., Cao, J., Li, P.** Water quality prediction model based on interval type-2 fuzzy neural network with adaptive membership function // International Journal of Fuzzy Systems. – 2025. – <https://doi.org/10.1007/s40815-025-01999-x>.

12 **Ernst, O.G., Sprungk, B., Zhang, C.** Uncertainty modeling and propagation for groundwater flow: a comparative study of surrogates // GEM – International Journal of Geomathematics. – 2024. – Vol. 15. – 11. – <https://doi.org/10.1007/s13137-024-00250-3>.

13 Seifi, A., Dehghani, M., Singh, V. P. Uncertainty analysis of water quality index (WQI) for groundwater quality evaluation: application of Monte-Carlo method for weight allocation // Ecological Indicators. – 2020. – Vol. 117. – 106653. – <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106653>.

14 Ahmed, E., Al Janabi, F., Zhang, J., Yang, W., Saddique, N., Krebs, P. Hydrologic assessment of TRMM and GPM-based precipitation products in transboundary river catchment (Chenab River, Pakistan) // Water. – 2020. – Vol. 12. – 1902. – <https://doi.org/10.3390/w12071902>.

15 ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) [Electronic resource]. – <https://www.iso.org/standard/50461.html>

16 Tazhiyev, S., Murtazin, Y., Rakhimova, V., Rakhmetov, I., Adenova, D., Koshpanova, K., Sotnikov, Y., Abdizhalel, M., Akylbayeva, A., Yerezhap, D. Applied hydrogeological assessment and GIS-based modeling of transboundary aquifers in the Shu River Basin // Water. – 2025. – Vol. 17. – 2476. – <https://doi.org/10.3390/w17162476>.

17 Zhao, W., Wang, B., Yu, G. Addressing the uncertainties in the environmental analysis, modeling, source and risk assessment of emerging contaminants // Water. – 2025. – Vol. 17. – 215. – <https://doi.org/10.3390/w17020215>.

18 Sousa, J. A., Batista, E., Demeyer, S., Fischer, N., Pellegrino, O., Ribeiro, A. S., Martins, L. L. Uncertainty calculation methodologies in microflow measurements: comparison of GUM, GUM-S1 and Bayesian approach // Measurement. – 2021. – Vol. 181. – 109589. – <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109589>.

19 Chen, Y., Li, X., Huang, L., Wang, X., Liu, C., Zhao, F., Hua, Y., Feng, P. GUM method for evaluation of measurement uncertainty: BPL long wave time service monitoring // Measurement. – 2022. – Vol. 189. – 110459. – <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110459>.

20 Dieste-Velasco, M. I. Enhanced Monte Carlo-based uncertainty quantification in electronic circuits // Journal of Electronic Testing. – 2025. – Vol. 41. – P. 615–629. – <https://doi.org/10.1007/s10836-025-06202-5>.

11.01.26 ж. баспаға түсті.

03.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*М. Әбдіжәлел¹, С. Тажиев², Е. Муртазин³, Д. Ережеп⁴

¹Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;

^{2,3}Институт гидрогеологии и геоэкологии имени У. М. Ахмедсафина, Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴Almaty Management University, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 11.01.26.

Поступило с исправлениями 03.02.26.

Принято в печать 27.02.26.

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД: НА ПРИМЕРЕ ШУЙСКОГО ТРАНСГРАНИЧНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА

Оценка качества трансграничных подземных вод в современных условиях не ограничивается определением гидрохимических показателей, а требует количественного обоснования достоверности полученных результатов измерений. Усиление антропогенного воздействия и изменение климатических условий вносят дополнительную неопределённость в состояние водных ресурсов и повышают значимость применения метрологически обоснованных подходов при интерпретации данных мониторинга. Настоящее исследование направлено на формирование систематизированной методической основы оценки неопределённости аналитических измерений для подземных вод Шуйского трансграничного водоносного горизонта.

В работе комплексно проанализированы источники формирования неопределённости при определении гидрохимических параметров на этапах отбора проб, подготовки образцов, инструментальных измерений и обработки данных. Оценка неопределённости выполнена в соответствии с принципами ISO/IEC Guide 98-3 (GUM), а также международными стандартами аналитического контроля качества воды (ISO/IEC 17025:2017, ISO 11352:2012, ИЛАС G17:2021). С учётом суммарного влияния различных вкладов приведены прикладные примеры расчёта стандартной и расширенной неопределённости.

Результаты исследования показали, что учёт неопределённости измерений существенно изменяет интерпретацию аналитических данных, особенно в случаях, когда значения показателей находятся вблизи нормативных пределов. Такой подход позволяет избежать ошибочных выводов при оценке соответствия качества воды и

повышает научную обоснованность принимаемых решений. Кроме того, рассмотрены возможности применения альтернативных методов, таких как моделирование методом Монте-Карло и байесовская оценка, для сложных расчётных ситуаций.

Полученные выводы свидетельствуют о том, что включение оценки неопределённости измерений в качестве обязательного элемента систем мониторинга качества подземных вод играет важную роль в обеспечении сопоставимости лабораторных данных и формировании надёжной научной основы для управления трансграничными водными ресурсами.

Ключевые слова: неопределённость измерений, подземные воды, трансграничные водоносные горизонты, ISO/IEC 17025, GUM, метод Монте-Карло, стандартная неопределённость, качество воды.

*М. Abdizhalel¹, S. Tazhiyev², Y. Murtazin³, D. Yerezhep⁴

¹ Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,3} U. M. Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Geoecology, Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴ Almaty Management University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 11.01.26.

Received in revised form 03.02.26.

Accepted for publication 27.02.26.

ASSESSMENT OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN GROUNDWATER QUALITY EVALUATION: A CASE STUDY OF THE SHU TRANSBOUNDARY AQUIFER

The assessment of transboundary groundwater quality under current conditions is not limited to the determination of hydrochemical parameters but requires a quantitative justification of the reliability of the obtained measurement results. Increasing anthropogenic pressure and climate change introduce additional uncertainty into the state of water resources, thereby enhancing the importance of applying metrologically sound approaches in the interpretation of monitoring data. This study aims to develop a systematized methodological framework for evaluating the uncertainty of analytical measurements of groundwater in the Shu transboundary aquifer.

The sources of uncertainty arising during the determination of hydrochemical parameters were comprehensively analyzed across the

stages of sampling, sample preparation, instrumental measurement, and data processing. Uncertainty evaluation was conducted in accordance with the principles of ISO/IEC Guide 98-3 (GUM), as well as international standards for analytical water quality control (ISO/IEC 17025:2017, ISO 11352:2012, ILAC G17:2021). Practical examples of calculating standard and expanded uncertainty are presented, taking into account the combined contribution of individual uncertainty components.

The results demonstrate that consideration of measurement uncertainty can significantly affect the interpretation of analytical data, particularly when parameter values are close to regulatory limits. Such an approach helps to prevent erroneous conclusions in water quality compliance assessments and enhances the scientific robustness of decision-making. In addition, the applicability of alternative approaches, including Monte Carlo simulation and Bayesian estimation, is discussed for complex computational scenarios.

The findings indicate that incorporating measurement uncertainty evaluation as an integral component of groundwater quality monitoring systems is essential for ensuring interlaboratory data comparability and for establishing a reliable scientific basis for the management of transboundary water resources.

Keywords: measurement uncertainty, groundwater, transboundary aquifers, ISO/IEC 17025, GUM, Monte Carlo method, standard uncertainty, water quality.

FTAMP 29.01.11

<https://doi.org/10.48081/BGQF1899>

***А. Д. Акылбекова¹, И. М. Маратова²**

^{1,2}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1211-8877>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8522-2396>

*e-mail: akylbekova_ad_1@enu.kz

ФИЗИКА САБАҒЫНДА ГЕЙМИФИКАЦИЯНЫ ҚОЛДАНУДЫҢ ӘДІСТЕМЕЛІК НЕГІЗДЕРІ МЕН ПРАКТИКАЛЫҚ ЖОЛДАРЫ

Бұл мақалада орта буын оқушыларына физиканы оқытуда геймификацияның қолданудың маңыздылығы қарастырылады. Заманауи білім беру жүйесінде оқушылардың пәнге деген қызығушылығын арттыру және оқу жетістігін жақсарту мақсатында ойын элементтерін енгізудің теориялық және практикалық негіздері сипатталады. Авторлар геймификацияның мотивациялық, дидактикалық және тәрбиелік әсерін ғылыми деректермен дәлелдей отырып, өз тәжірибелерінен алынған нәтижелермен бөліседі. Зерттеу аясында 7-сынып оқушылары арасында «Физика ғажайыптары» атты авторлық үстел ойыны және басқа да ойын түрлері қолданылып, олардың оқу процесіне ықпалы анықталды. Экспериментке дейінгі және кейінгі көрсеткіштерді салыстыру арқылы геймификацияның оқу мотивациясы мен үлгеріміне оң әсері расталды. Ойын элементтері арқылы оқушылардың сыни ойлау, шығармашылық және топта жұмыс істеу қабілеттері дамып, пәнге деген қызығушылығы айтарлықтай артқаны байқалды.

Мақалада геймификация құралдарын қолдану арқылы оқушылардың білімді меңгеруін жеңілдету, дербес жұмыс істеу дағдыларын қалыптастыру және оқыту сапасын арттыру жолдары ұсынылады. Сонымен қатар, мұғалімдерге арналған әдістемелік ұсынымдар беріліп, сабақ құрылымында ойын әдістерін тиімді қолдану жолдары көрсетіледі. Бұл зерттеу физиканы оқытуда инновациялық әдістерді енгізудің маңыздылығын дәлелдейді.

Зерттеу нәтижелері геймификацияның тек пәндік білімді ғана емес, сонымен қатар оқушының жеке тұлғалық және әлеуметтік құзыреттіліктерін дамытуда да маңызы зор екенін көрсетеді. Әсіресе, оқушылардың оқу процесіне белсенді қатысуы мен ынтасын арттыруда ойын әдістері айтарлықтай рөл атқарады.

Кілтті сөздер: геймификация, физика, мотивация, ойын, оқу жетістігі, әдістеме, құзыреттілік.

Кіріспе

Қазіргі қоғамның даму үдерісінде ғылыми-техникалық прогресс пен техникалық сауаттылықтың рөлі ерекше артып отыр. Бұл жағдай білім беру саласында, әсіресе жаратылыстану пәндері ішінде физикаға деген сұранысты күшейтеді. Орта буын оқушыларының техникалық ойлау қабілетін қалыптастыру мен ғылыми дүниетанымын дамыту физиканы оқыту процесінде жүзеге асады. Алайда дәстүрлі оқыту әдістері бұл пәнге қызығушылықты арттыруда жеткілікті нәтиже бере бермейді. Осыған байланысты білім беру жүйесінде геймификация – яғни ойын элементтерін оқыту үдерісіне енгізу – оқушылардың пәнге деген мотивациясын арттырудың тиімді тәсілі ретінде қарастырылып отыр. Зерттеулер көрсеткендей, оқу процесіне ойын механизмдерін енгізу оқушылардың танымдық белсенділігін арттырып, үлгерім нәтижелерін жақсартады. Осы мақалада орта буын оқушыларына физика пәнін оқытуда геймификацияны қолданудың әдістемелік негіздері мен практикалық жолдары қарастырылады. Зерттеу мақсаты – геймификация арқылы оқушылардың оқу мотивациясын және пәнге деген қызығушылығын арттыру жолдарын тәжірибелік тұрғыда айқындау.

Қазіргі таңда білім беру саласында қойылған міндеттерді тиімді жүзеге асыру үшін заманауи әдіс-тәсілдер мен технологияларды мақсатты түрде қолдану қажеттілігі артып отыр. Себебі, өскелең ұрпақтың дүниетанымы, қызығушылығы мен ақпаратты қабылдау ерекшеліктері бұрынғы буындардан айтарлықтай өзгеше. Осыған байланысты заманауи педагогтар оқыту барысында жаңашыл идеялар мен тиімді құралдарды үнемі іздестіруді көздейді.

Солардың бірі ретінде кеңінен таралып келе жатқан әдіс – геймификация. Бұл тәсіл қазіргі білім беру жүйесінде оқушылардың оқу процесіне деген қызығушылығын арттырудың және мотивациясын көтерудің тиімді жолдарының бірі ретінде қарастырылуда. Геймификация – бұл ойын элементтері мен механизмдерін ойыннан тыс ортаға енгізу арқылы білім алушылардың белсенділігін, ынтасын және танымдық қызығушылығын арттыруды мақсат ететін әдіс [1].

Зерттеудің ғылыми жаңашылдығы – физика пәнін оқыту барысында оқушылардың қызығушылығын арттыруға ықпал ететін факторларды

метапәндік тұрғыдан қарастыруында. Бұл тұрғыда геймификация элементтерін оқу процесіне мақсатты түрде интеграциялау негізінде құрастырылған оқу-әдістемелік кешенді әзірлеу зерттеудің негізгі міндеттерінің бірі болып табылады.

Осы орайда, геймификация ұғымының мәнін тереңірек түсіну үшін бұл терминнің ғылыми әдебиеттерде қалай анықталатынына талдау жасау қажет. Әртүрлі зерттеушілер мен ғалымдар бұл ұғымды әртүрлі қырынан сипаттайды. Төмендегі 1-кестеде геймификацияның теориялық анықтамалары мен мазмұндық ерекшеліктері жүйеленіп көрсетілген.

1-кесте – «Геймификация» ұғымын талдау

Ғалымдар мен зерттеушілер	Анықтама
Голуб И. Н.	«Геймификация – бұл ойын элементтерін ойын емес контекстерде қолдану арқылы адамдардың мотивациясын арттыруға бағытталған әдіс» [2].
Себастьян Детердинг	«Геймификация – ойындарға тән элементтерді (ойын механикасы, ойын дизайны) ойын емес контексте қолдану» [3].
Кевин Вербах және Дэн Хантер	«Геймификация – ойынды емес контексте ойын ойнау принциптерін қолдану» [4].
Гейб Зихерман және Кристофер Каннингем	«Геймификация – адамдарды тарту және ынталандыру үшін ойын ойнау элементтерін пайдаланудың үдерісі» [5].
Карл Капп	«Геймификация – ойын ойнау механикасын, эстетикасын және ойынға тән ойлау процестерін пайдалану арқылы адамдарды тарту, олардың мінез-құлқын өзгерту және оқу процесін тиімді ету» [6].
Юха Хамари, Юкка Коивисто, Харри Сарса	«Геймификация – пайдаланушылардың мотивациясын арттыру үшін ойын элементтерін қолдану» [7].
Мазелис А.Л.	«Геймификация – білім беру мазмұнын оқушылардың жеке қызығушылығы мен белсенділігіне бейімдеп ұйымдастырудың заманауи әдісі» [8].
Левин Дж.	«Геймификация – оқушылардың әрекеттік белсенділігін арттыру арқылы танымдық процестерге ықпал ететін ойын тәсілдерінің жиынтығы» [9].
Gündüz A. Y.	«Геймификация – білім беру мен тәрбиелеуде жасанды интеллект пен ойын әдістерін біріктіру арқылы оқытудың тиімділігін арттыратын әдістемелік жүйе» [10].

1-кестеде көрсетілгендей, геймификация ұғымына берілген анықтамалар бұл феноменнің әртүрлі салаларда – әсіресе, мотивацияны арттыру, белсенділік қалыптастыру және оқу үдерісін жандандыру бағытында қолданылатынын көрсетеді. Терминнің ғылыми айналымға енуі бірнеше тарихи кезеңдермен сипатталады.

Геймификация алғаш рет 1980-жылдары Р. Бартлдың еңбектерінде қарастырылып, ол оны ойыннан тыс қызметке ойындық сипат беру ретінде сипаттады. Кейін 2003 жылы Н. Пеллинг ұғымға заманауи сипаттама беріп, оны нақты міндеттерді шешуге бағытталған ойын механизмдерін қолдану үдерісі ретінде анықтады. 2005–2009 жылдары бұл тәсіл Батыс елдерінде маркетинг пен сандық өнімдерде тұтынушыны тарту құралы ретінде кеңінен қолданыла бастады.

Уақыт өте келе геймификация білім беру жүйесіне де енгізіліп, оқытудың тиімді әдістерінің біріне айналды. Ол тек білімді бақылауға ғана емес, оқушылардың сыни ойлауын, шығармашылық қабілетін дамытуға және белсенді оқу ортасын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Дж. Левиннің іс-әрекет теориясы тұрғысынан, ойын элементтері оқушыларды белсенді әрекетке итермелей отырып, олардың шешім қабылдау, өзара ынтымақтастық және өзін-өзі бағалау қабілеттерін дамытады [2, 9].

Материалдар мен әдістері

Зерттеу жұмысы орта буындағы, нақтырақ айтқанда 7-сынып оқушыларының қатысуымен жүргізілді. Эксперименттік зерттеу барысында геймификация элементтері енгізілген сабақтар сериясы өткізілді. Зерттеу жұмысының мақсатына сәйкес, келесі оқыту әдістері қолданылды:

– Балл жинау жүйесі – оқушылардың белсенділігін бағалау және мотивациясын арттыру үшін;

– «Физика ғажайыптары» атты авторлық үстел ойыны – физикалық ұғымдар мен заңдарды меңгеруді жеңілдету және қызығушылықты ояту мақсатында;

– Онлайн викториналар – жедел кері байланыс орнату және білімді тексеру үшін;

– Оқушыларды деңгейге бөлу және марапаттау – саралап оқыту және жетістікке ынталандыру мақсатында;

– Топтық жарыстар мен квест форматындағы тапсырмалар – ынтымақтастықты арттыру және сыни ойлауды дамыту үшін.

Зерттеу барысында оқу жетістіктерін салыстыру үшін бақылау және эксперимент топтары құрылды. Экспериментке дейін және кейін жүргізілген сауалнама, диагностикалық тесттер және мұғалімдік бақылау нәтижелері негізінде оқушылардың пәнге деген қызығушылық деңгейі мен үлгеріміндегі өзгерістер анықталды.

Әсіресе, «Физика ғажайыптары» үстел ойыны (1-сурет) оқушылардың пәнге деген қызығушылығын арттыруда және білім мазмұнын ойын арқылы меңгеруде тиімді құрал ретінде көрінді.



1-сурет – «Физика ғажайыптары» үстел ойыны:
 а) ойын тақтасы; ә) бонус карталары

Ойынның құрылымы қарапайым болғанымен, мазмұны қызықты және әртүрлі деңгейдегі тапсырмалармен байытылған. Ойынға 2-ден 8-ге дейінгі оқушы қатыса алады. Ойын барысында 2 дана ойын тасы (кубик) пайдаланылады.

Ойын ережесі бойынша, әрбір ойыншы кубик лақтыру арқылы түскен ұпай санына сәйкес тақта бойымен қозғалады. Әр ұяшыққа жеткенде, оқушы тиісті сұраққа жауап беруге тиіс. Дұрыс жауап берген жағдайда ойыншы алға жылжиды және жұлдызша түріндегі жетон алады; қате жауап болған жағдайда – бір немесе бірнеше қадам артқа шегінеді. Жауаптар дауыстап беріледі, ал жауаптың дұрыстығы бірге тексеріледі.

Ойын 7-сыныптың физика пәнінің мазмұнына негізделген 6 кезеңнен тұрады. Әр кезеңде 30 сұрақтан, барлығы 180 сұрақ қарастырылған. Сұрақтар физикалық анықтамаларға, формулаларға, танымал ғалымдардың еңбектеріне, есептерге және логикалық тапсырмаларға негізделіп құрастырылған.

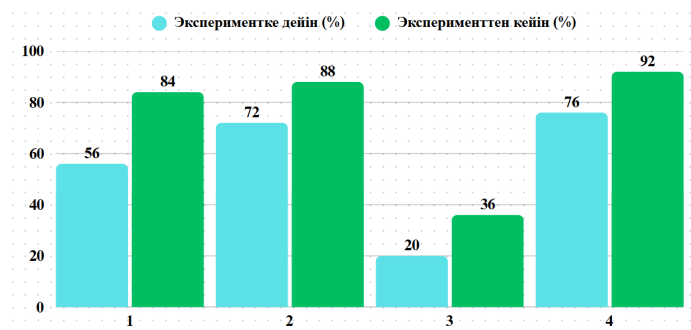
Ойын барысында қосымша мотивациялық элементтер ретінде арнайы карталар (сыйлықтар, белгісіз сандықтар, орын ауыстыру мүмкіндігі) қолданылады. Бұл элементтер ойынға бәсекелестік сипат беріп, қатысушылардың қызығушылығын арттырады.

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу нәтижелері «Физика ғажайыптары» үстел ойыны арқылы жүзеге асырылған геймификация әдісінің оқушылардың физика пәніне

деген қызығушылығын арттырғанын және оқу материалын меңгеру сапасын жақсартқанын көрсетеді. Ойын элементтерін қолдану оқушылардың жеке жетістіктерін бағалау, өзара ынтымақтастық орнату, қателерден сабақ алу және танымдық белсенділігін дамыту сияқты дағдылардың қалыптасуына ықпал етті.

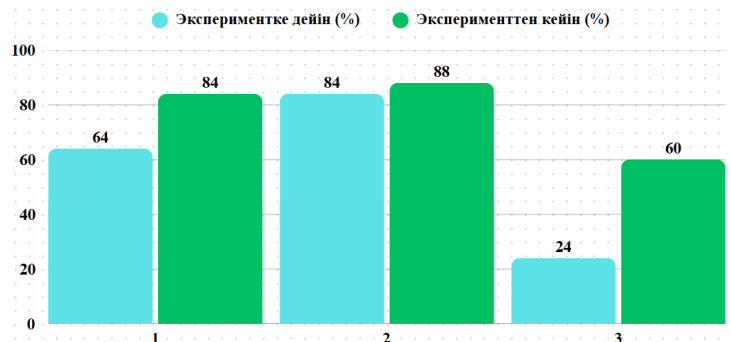
Эксперименттік топта геймификация әдісін енгізу нәтижесінде оқушылардың пәнге деген қызығушылығы мен үлгерім көрсеткіштері айтарлықтай жақсарды. Экспериментке дейінгі және кейінгі деректердің салыстырмалы талдауы 2 мен 3-суреттерде көрсетілген. Атап айтқанда, физика сабағын «өте қызықты» деп бағалаған оқушылар саны 8-ден 20-ға дейін артқан, ал «мүлдем қызықсыз» деп жауап бергендер саны 10-нан 2-ге дейін қысқарған.



2-сурет – Эксперимент тобының қызығушылығы бойынша нәтиже:

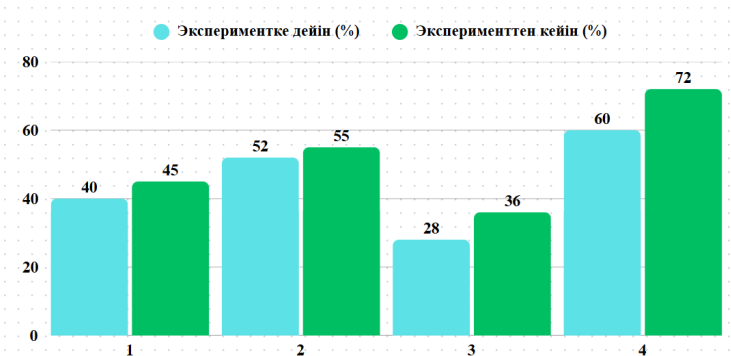
- 1) Физика сабағы қызықты;
- 2) Сабаққа белсенді қатысады;
- 3) Қосымша ізденеді;
- 4) Геймификация қызығушылықты арттырады деп санайтын оқушылар

Сабаққа белсенді қатысу, қосымша ізденіс жүргізу және геймификацияның тиімділігіне оң көзқарас танытқан оқушылар үлесі де айтарлықтай өскен (2-сурет). Оқу жетістігі тұрғысынан теориялық сұрақтарға дұрыс жауап берген, есептерді нақты орындаған және тест нәтижелері жақсарған оқушылар үлесі артқаны байқалды (3-сурет).

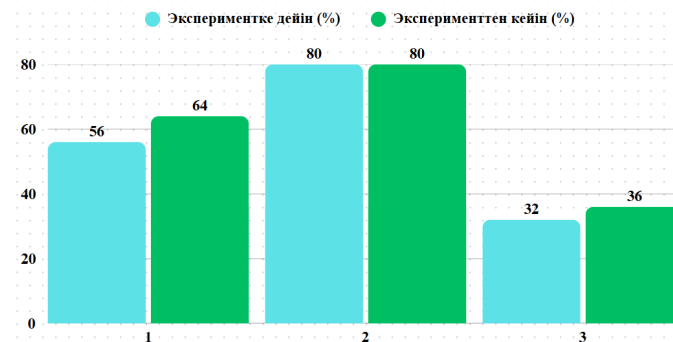


3-сурет – Эксперимент тобының үлгерімі бойынша нәтиже:
1) орташа тест нәтижесі; 2) есептерді дұрыс орындаған оқушылар;
3) теориялық сұрақтарға дұрыс жауап берген оқушылар

Бақылау тобының көрсеткіштері, керісінше, айтарлықтай өзгеріске ұшыраған жоқ. Бұл топтың көрсеткіштері 4 пен 5-суреттерде ұсынылған.



4-сурет – Бақылаушы топтың қызығушылығы бойынша нәтиже:
1) Физика сабағы қызықты; 2) Сабаққа белсенді қатысады;
3) Қосымша ізденеді; 4) Геймификация қызығушылықты арттырады деп санайтын оқушылар



5-сурет – Бақылаушы топтың үлгерімі бойынша нәтиже:
1) орташа тест нәтижесі; 2) есептерді дұрыс орындаған оқушылар;
3) теориялық сұрақтарға дұрыс жауап берген оқушылар

Жинақталған зерттеу нәтижелері геймификация әдісін қолдану оқушылардың оқу мотивациясын арттырып қана қоймай, олардың оқу үлгерімі мен пәндік құзыреттіліктерін дамытуға ықпал ететінін дәлелдейді.

Қорытынды

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ойын технологияларын оқу процесіне енгізу оқушыларды өз бетімен білім алуға үйретудің тиімді жолдарының бірі болып табылады. Мұндай сабақтарға дайындық уақыт пен күшті талап еткенімен, оның нәтижесі оқушылардың танымдық, шығармашылық және тұлғалық дамуына зор ықпал етеді. Атап айтқанда, оқытуда геймификацияны қолдану теориялық ойлау қабілетін дамытып, ақпараттық және коммуникативтік құзыреттіліктерді қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бұл – қазіргі заманның білім беру талаптарына толықтай сай келетін нәтижелер.

Жалпы алғанда, ойын элементтері оқу үдерісінің мотивациялық және танымдық белсенділігін арттыратын қуатты құрал ретінде ерекшеленеді. Олар оқушылардың пәнге деген қызығушылығын арттырып қана қоймай, білімді өмірлік жағдайларда қолдануға, топпен жұмыс істеуге, шығармашылық шешімдер қабылдауға және дербес ойлауға ынталандырады.

Геймификация әдісінің тиімділігі тәжірибелік түрде дәлелденіп, оқушылардың үлгерімі мен сабаққа деген қатысу белсенділігі айтарлықтай артқаны байқалды. Бұл тәсіл әсіресе физика сияқты абстрактілі ұғымдарды түсіндіруде қолайлы әдістемелік шешім болып табылады. Зерттеу барысында әзірленген авторлық оқу ойыны – «Физика ғажайыптары» – геймификацияны пән мазмұнына икемдеп енгізудің тиімді үлгісі ретінде қарастырылды.

Алдағы уақытта геймификация элементтерін өзге жаратылыстану пәндерінде, соның ішінде химия, биология және математика сабақтарында бейімдеп қолдану мүмкіндіктері қарастырылуы тиіс. Сонымен қатар, мұғалімдер үшін әдістемелік құралдар әзірлеу, цифрлық ойын платформаларын дамыту және геймификацияны инклюзивті білім беру жағдайына бейімдеу де маңызды зерттеу бағыттары қатарында болуға тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Кричфалушая, Д. С., Курылев, И. Н.** Геймификация как тип организации деятельности в современном [Текст] // Бизнес и дизайн ревю. – 2024. – № 2(34). – С. 98–110.

2 **Голуб, И. Н.** Геймификация как инструмент мотивации труда персонала [Текст] // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. – 2021. – № 8. – С. 157–160.

3 **Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., Nacke, L.** From Game Design Elements to Gamefulness : Defining «Gamification» [Text] // Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments. – 2021. – P. 9–15.

4 **Werbach, K., Hunter, D.** For the Win: How Game Thinking Can Revolutionize Your Business: [Text]. – Wharton Digital Press, 2015. – 148 p.

5 **Zichermann, G., Cunningham, C.** Gamification by Design: Implementing Game Mechanics in Web and Mobile Apps: [Text]. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2011. – 208 p.

6 **Kapp, K. M.** The Gamification of Learning and Instruction: Game-based Methods and Strategies for Training and Education [Text]. – San Francisco : Pfeiffer, 2022. – 336 p.

7 **Hamari, J., Koivisto, J., Sarsa, H.** Does Gamification Work? – A Literature Review of Empirical Studies on Gamification [Text] // Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences. – 2014. – P. 3025–3034.

8 **Мазелис, А. Л.** Геймификация в электронном обучении [Text] // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2023. – № 3 (21). – С. 139–142.

9 **Левин, Дж.** Теории деятельности в образовании: монография [Текст]. – Кембридж: Cambridge University Press, 2020. – 300 с.

10 **Gündüz, A. Y.** Eğitimde yapay zekâ ve oyunlaştırma [Text] // Eğitim ve kültür çalışmalarında. – 2022. – P. 1.

REFERENCES

1 **Krichfalushaya, D. S., Kurylev, I. N.** Gejmifikatsiya kak tip organizatsii deyatel'nosti v sovremennom obshchestve [Gamification as a Type of Activity Organization in Modern Society] // Biznes i dizajn revyu. – 2024. – № 2(34). – P. 98–110.

2 **Golub, I. N.** Gejmifikatsiya kak instrument motivatsii truda personala [Gamification as a Tool for Employee Motivation] // Gumanitarnye, sotsial'no-ekonomicheskie i obshchestvennye nauki. – 2021. – № 8. – P. 157–160.

3 **Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., Nacke, L.** From Game Design Elements to Gamefulness: Defining «Gamification» [Text] // Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments. – 2021. – P. 9–15.

4 **Werbach, K., Hunter, D.** For the Win: How Game Thinking Can Revolutionize Your Business: [Text]. – Wharton Digital Press, 2015. – 148 p.

5 **Zichermann, G., Cunningham, C.** Gamification by Design: Implementing Game Mechanics in Web and Mobile Apps: [Text]. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2011. – 208 p.

6 **Kapp, K. M.** The Gamification of Learning and Instruction: Game-based Methods and Strategies for Training and Education: [Text]. – San Francisco: Pfeiffer, 2022. – 336 p.

7 **Hamari, J., Koivisto, J., Sarsa, H.** Does Gamification Work? – A Literature Review of Empirical Studies on Gamification [Text] // Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences. – 2014. – P. 3025–3034.

8 **Mazelis, A. L.** Gejmifikatsiya v elektronnom obuchenii [Gamification in E-Learning] // Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa. – 2023. – № 3(21). – P. 139–142.

9 **Levin, Dzh.** Teorii deyatel'nosti v obrazovanii: monografiya [Theories of Activity in Education: Monograph]. – Cambridge: Cambridge University Press, 2020. – 300 p.

10 **Gündüz, A. Y.** Eğitimde yapay zekâ ve oyunlaştırma [Text] // Eğitim ve kültür çalışmalarında. – 2022. – P. 1.

28.07.25 ж. баспаға түсті.

28.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

10.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. Д. Ақылбекова¹, И. М. Маратова²

^{1,2}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 28.07.25.

Поступило с исправлениями 28.07.25.

Принято в печать 10.02.26.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ПРИМЕНЕНИЮ ГЕЙМИФИКАЦИИ НА УРОКАХ ФИЗИКИ

В данной статье рассматривается значимость применения геймификации в обучении физике учащихся среднего звена. Описываются теоретические и практические основы внедрения игровых элементов в образовательный процесс с целью повышения интереса к предмету и улучшения учебных достижений в условиях современной системы образования. Авторы, обосновывая мотивационное, дидактическое и воспитательное воздействие геймификации научными данными, делятся результатами, полученными на основе собственного опыта. В рамках исследования среди учащихся 7-х классов была применена авторская настольная игра «Физика ғажайыптары» и другие игровые формы, влияние которых на учебный процесс было проанализировано. Сравнение показателей до и после эксперимента подтвердило положительное влияние геймификации на учебную мотивацию и успеваемость. Было отмечено, что благодаря игровым элементам учащиеся развиваются критическое мышление, творческие способности и умение работать в команде, а интерес к предмету значительно возрастает.

В статье предложены пути упрощения усвоения знаний, формирования навыков самостоятельной работы и повышения качества обучения посредством применения инструментов геймификации. Также даны методические рекомендации для учителей и показаны эффективные способы интеграции игровых методов в структуру урока. Это исследование доказывает значимость внедрения инновационных подходов в преподавание физики. Его результаты показывают, что геймификация важна не только для формирования предметных знаний, но и для развития личностных и социальных компетенций учащихся. Особенно заметна роль игровых методов в повышении активности и заинтересованности школьников в учебном процессе.

Ключевые слова: геймификация, физика, мотивация, игра, учебные достижения, методика, компетентность.

*A. D. Akyzbekova¹, I. M. Maratova²

^{1,2}L. N. Gumilyov Eurasian National University,

Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 28.07.25.

Received in revised form 28.07.25.

Accepted for publication 10.02.26.

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS AND PRACTICAL APPROACHES TO THE USE OF GAMIFICATION IN PHYSICS LESSONS

This article explores the importance of using gamification in teaching physics to middle school students. It outlines the theoretical and practical foundations for integrating game elements into the educational process to increase student interest in the subject and improve academic achievement within the modern education system. The authors provide evidence-based insights into the motivational, didactic, and developmental impact of gamification, sharing results drawn from their own teaching practice. As part of the research, the authors implemented a custom-designed board game called «Physics Wonders» along with other types of educational games for Year 7 students, analysing their effect on the learning process. A comparison of pre- and post-experimental data confirmed the positive influence of gamification on student motivation and academic performance. The findings also indicate that game elements foster critical thinking, creativity, and collaboration skills, while significantly enhancing interest in physics.

The article proposes strategies for simplifying knowledge acquisition, developing independent learning skills, and improving teaching quality through gamification tools. Methodological recommendations for teachers are provided, along with practical suggestions for integrating game-based methods into lesson structures. This study demonstrates the importance of incorporating innovative approaches into physics education. The results show that gamification is essential not only for developing subject-specific knowledge, but also for enhancing students' personal and social competencies. Notably, game-based methods play a key role in increasing students' engagement and enthusiasm in the learning process.

Keywords: gamification, physics, motivation, game, academic achievement, methodology, competence.

FTAMP 14.25.09

<https://doi.org/10.48081/BGQF1900>

***А. Б. Искакова¹, Н. Ж. Әділбек², Ш. С. Зейтова³**

^{1,3}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2142-8949>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5640-6680>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1880-6737>

*e-mail: anar_is@mail.ru

11-СЫНЫПТА ТОЛҚЫНДЫҚ ОПТИКА БОЙЫНША ТРАНСПӘНДІК МИНИ-ЖОБАЛАРДЫ ҰЙЫМДАСТЫРУДЫҢ ӘДІСТЕМЕЛІК ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Мақала 11-сыныпта толқындық оптика бойынша транспәндік мини-жобаларды ұйымдастырудың әдістемелік ерекшеліктеріне арналған. Зерттеудің өзектілігі жоғары сынып оқушыларының бойында пәнаралық ойлауды, зерттеушілік дағдылары мен күрделі физикалық құбылыстарды оқып білуге деген ынтасын қалыптастыруға деген қажеттілікпен айқындалады.

Зерттеудің мақсаты – 11-сыныпта толқындық оптика тарауын оқытуда транспәндік тұғырды қолданудың әдістемелік ерекшеліктерін анықтау, талдау. Зерттеу мақсатына сәйкес келесі міндеттер қойылды: 1) транспәндік оқыту мен жобалық іс-әрекетке қатысты теориялық мәселелерді зерттеу; 2) орта мектепте физиканы оқытуда STEM элементтері ретіндегі PBL-ді қолдану мысалдарына талдау жасау; 3) «Толқындық оптика» тарауын оқытуда физиканың басқа пәндермен біріктіретін мини-жобалардың құрылымын жасау; 4) бағалау критерийлері мен ресурстарды таңдауды қоса алғанда, мұғалімдерге арналған әдістемелік ұсыныстарды әзірлеу.

Мақалада теориялық әдістер, оның ішінде ғылыми-әдістемелік әдебиеттерге талдау жасау, педагогикалық тәжірибелерді салыстырмалы түрде талдау, мини-жобалардың құрылымын модельдеу. Сонымен қатар, мини-жобалардың құрылымдық модельдерін, оларды ұйымдастырудың алгоритмін, пәнаралық білімдердің интеграциясының нұсқаларын және жарықтың

интерференциясы, дифракциясы мен поляризациясын оқып білуге бағытталған тапсырмалардың мысалдарын әзірлеуге көңіл бөлінген.

Зерттеу нәтижесінде транспәндік мини-жобалардың ұйымдастырудың моделі, транспәндік тапсырмалардың мысалдары, әдістемелік ұсыныстар жасалынды.

Кілтті сөздер: физика, толқындық оптика, интерференция, дифракция, транспәндік тұғыр, пәнаралық байланыс.

Кіріспе

Соңғы онжылдықта оқушыларды ХХІ ғасырдың күрделі, көп қырлы мәселелерін шешуге дайындауға деген қажеттіліктің болуына байланысты білім берудегі транспәндік тұғырдың маңыздылығы арта түсті. Зерттеулерге сәйкес, транспәндік әртүрлі салалардағы білімдердің интеграциясына ықпал етеді, сыни ойлауды, мәселелерге деген шығармашылық көзқарасты дамытады [1]. Ғылыми-әдістемелік әдебиетте транспәндік жобалар әртүрлі пәндердің оқу мазмұнын, әдістері мен тәжірибелерін біріктіруге мүмкіндік беретін құрал ретінде қарастырылады. Бұл өз кезегінде жаңа әрі маңызы жоғары оқу іс-әрекеттерінің түрлерін қалыптастырады [2]. Әсіресе, физика, технология, инженерия мен математиканың біріккен оқу жобаларын жасауға бағытталған STEM-оқыту аясында транспәндік тұғырды қолданудың болашағы зор [3]. STEM ортасында жобаға бағытталған оқыту (PBL) білім алдушыларға білімді біріктіруге, командада жұмыс істеуге және оны шынайы мәселелерде қолдануға мүмкіндік береді.

Білім алушылардың бойында зерттеушілік, шығармашылық дағдыларды, өзіндік сенімділігін және кәсіби шеберлігін арттыруға мүмкіндігі оптика мен фотониканы оқыту контекстінде жобалық оқытуды енгізудің табысты мысалдары болып табылады [4; 5]. Ғылыми-әдістемелік зерттеулерде зерттеулерде физиканы оқытудағы жобалық оқытудың рөлі де ерекше атап өтіледі, соның ішінде, жобалық оқытуда мұғалімдер мен оқушылардың іс-әрекеті дәстүрлі сабақтардағы іс-әрекеттерін түбегейлі ерекшеленеді, яғни рөлдер, өзара әрекеттесу формалары және жауапкершілікті бөлу өзгереді [6]. Сонымен қатар, орта мектепте физиканы оқытуда PBL тиімді әдіс екендігі, яғни оның қолданылуы оқушылардың ынтасы мен белсенділігін арттыруға, негізгі ғылыми түсініктерді терең түсінуіне ықпал етуі транспәндік оқытудың маңыздылығын дәлелдейді [7].

Қазақстанда STEM білім беруді дамыту мәселесі мемлекеттік деңгейде қызу талқылануда, яғни негізгі дереккөздеріне [8] сүйенетін болсақ, STEM дәстүрлі білім берудегі бытыраңқылықты жеңуге, пәнаралық білімді байланыстыруға және оқушылардың шығармашылық ойлауын дамытуға көмектеседі. Дегенмен, оң тәжірибе мен теориялық негіздемеге қарамастан,

шетелдік және қазақстандық мектеп білімінде «Толқындық оптика» тарауын оқытуда мини-жобаларды (яғни, шағын, қысқа мерзімді жобалар) жүргізудің әдістемелері жеткілікті түрде әзірленбеген және жүйеленбегендігін байқауға болады. Бұл белгілі бір қиындық туғызады, себебі толқындық оптика күрделі, бірақ өте көрнекі әрі практикаға бағытталған, басқа пәндермен интеграциясы табысты болатын физиканың бір бөлімі болып табылады.

Толқындық оптика бойынша мини-жобаларды жүргізу әдістемесін әзірлеуде транспандік тұғыр оқушылардың бойында жоспарлау, бақылау және өз іс-әрекетіне рефлексия жасау сияқты метатанымдық дағдыларды қалыптастыруға, дамытуға, сонымен қатар, физиканы басқа пәндермен интеграциялау арқылы инженерлік және кәсіпкерлік құзыреттіліктерді қалыптастыруға [9; 10] ықпал ететіндігін дәлелдейтін соңғы жылдардағы зерттеулердің маңызы зор. Осындай тәсілдер оқушылар инженерлік және экономикалық аспектілерді қоса алғанда, пәнаралық есептерді шешу үшін толқындық оптика қатысты білімдерді қолданатын, сонымен қатар, математика мен технологияның интеграциясы жүзеге асырылатын мини-жобаларды жасауға мүмкіндік береді.

Ұсынылып отырған зерттеудің мақсаты – ІІ-сыныпта толқындық оптика бойынша пәнаралық ойлауды, оқушылардың зерттеу белсенділігін және ынтасын арттыруға бағытталған транспандік мини-жобаларды ұйымдастырудың әдістемелік ерекшеліктерін айқындау, талдау.

Қойылған зерттеу мақсатын байланысты келесі зерттеу міндеттері қойылды:

- транспандік оқыту мен жобалық іс-әрекетке қатысты теориялық мәселелерді зерттеу;
- орта мектепте физиканы оқытуда STEM элементтері ретіндегі PBL-ді қолдану мысалдарына талдау жасау;
- «Толқындық оптика» тарауын оқытуда физиканың басқа пәндермен біріктіретін мини-жобалардың құрылымын жасау;
- бағалау критерийлері мен ресурстарды таңдауды қоса алғанда, мұғалімдерге арналған әдістемелік ұсыныстарды әзірлеу.

Зерттеу болжамы: толқындық оптика бойынша әзірленген транспандік мини-жобалар пәнаралық ойлауды, зерттеушілік белсенділікті және білім алушылардың физиканы оқып-білуге деген ынтасын арттырудың тиімді құралы ретінде қарастырылады.

Оқытудағы транспандік тұғыр бірыңғай оқу немесе зерттеу міндетін шешу үшін әртүрлі пәндердің білімдері мен әдістерін біріктіруді көздейді, әсіресе жоғары сыныпта осы тұғырды «Толқындық оптика» бөлімін оқытуда қолдану тиімді. Мысалы, интерференция, дифракция, поляризация секілді физикалық құбылыстарды басқа ғылымдар мен технологиялар арқылы

қарастыру, түсіндіру. Зерттеудің негізгі идеясы – пәнаралық мини-жобаларды қолдану білім алушылардың бойында бір уақытта зерттеу дағдыларын, пәнаралық ойлауды және мәселелерді шешуге шығармашылық тұрғыдан қарауды дамытуға мүмкіндік беру.

Мини-жоба оқу іс-әрекетінің форматы ретінде ықшамдылығымен, орындалу уақытының шектеулілігімен (1–3 сабақ немесе 1–2 апта) және мұғалім тарапынан басқарылып отыруымен сипатталады. Оның құрылымына зерттеу мәселесін қою, топ ішінде рөлдерді бөлу, эксперимент жүргізу немесе модельдеу, деректерді өңдеу, нәтижелерді ұсыну және рефлексия кіреді. Жұмыстың осындай форматы білім алушыларды белсенді қатысуға, дербестік пен топта жұмыс жасай білу дағдыларын дамытуға ықпал етеді.

Зерттеу аясында жұмыс кезеңдерін, дайындық алгоритмдерін, тақырыпты таңдау критерийлерін және физиканы басқа пәндермен интеграциялау мүмкіндіктерін анықтайтын транспандік мини-жоба моделі әзірленді және олардың мысалдары жүйеленді.

Әдістемелік ұсыныстарға білім алушылардың жұмысын ұйымдастыру алгоритмдері, цифрлық құралдар, бағдарламалық платформаларды қолдану, сондай-ақ, ғылымилық, шығармашылық, пәнаралық, зерттеушілік секілді белсенділік бағалау критерийлері кіреді.

Зерттеудің негізгі нәтижелері толқындық оптика бойынша транспандік мини-жобалар білім алушылардың бойында пәнаралық ойлауды дамытуға, олардың физиканы оқуға деген ынтасын арттыруға, зерттеу және жобалық дағдыларды дамытуға мүмкіндік беретіндігін көрсетеді. Мини-жобалар практикалық іс-әрекеттерді, физикалық құбылыстарды модельдеу мен теориялық зерттеуді біріктіретін тиімді форматтан тұрады. Әзірленген әдістемелік тәсілдер кейіннен педагогикалық сынақтан өтуге және жоғары мектептің оқу-тәрбие процесіне енгізуге теориялық негіз болады.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу теориялық-қолданбалы, жобалық тұғырлар негізінде жүзеге асырылады және транспандік оқыту, STEM-білім беру, оптика мен фотоника саласындағы жобаға бағытталған оқыту (PBL) мәселелеріне арналған ғылыми-әдістемелік әдебиеттер мен практикалық тәжірибелерді зерттеу, талдау және жүйелеуге бағытталған. ІІ-сыныпта басқа пәндерден алынған білімдердің интеграциясынан тұратын толқындық оптика бойынша мини-жобаларды ұйымдастыруға арналған әдістемелік нұсқаулықтарды әзірлеуге көңіл бөлінеді.

Қазіргі зерттеуге байланысты ғылыми-әдістемелік мәселелерді зерделеуге, қолданыстағы транспандік тәжірибелерді салыстыруға және мини-жобалардың құрылымын әзірлеуге арналған үлгілік әдістемелік тәсілдерді анықтауға мүмкіндік беретін талдау, салыстыру және жүйелеу

әдістері әдіснамалық негізді құрайды. Жобалық әдіс оқу іс-әрекетін ұйымдастыруға қатысты ұсыныстар жасау үшін, ал критериалды талдау оқушылардың зерттеу белсенділігі мен пәнаралық ойлауын бағалау үшін қолайлы болатын көрсеткіштерді анықтауда қолданылады.

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу мәселесіне қатысты ғылыми-әдістемелік әдебиеттерге жасалынған талдау транспәндік тұғыр әртүрлі салалардан алынған білімдердің интеграциясын жүзеге асыруға, оқушылардың сыни ойлауы мен шығармашылық қабілеттерін дамытуға ықпал ететіндігін көрсетті. STEM және PBL бойынша жасалынған зерттеу нәтижелері жобаға бағытталған оқыту оқушылардың ынтасын арттыруға, ізденуге ынталандыратынын және теориялық білімді практикада қолдануға мүмкіндік беретінін көрсетеді [11; 12; 13]. Осындай зерттеу нәтижелері құбылыстарды визуализациялау және эксперимент жүргізуден тұратын толқындық оптика бөлімін оқыту оқушыларға күрделі физикалық тұжырымдамаларды тереңірек түсіну үшін маңызды.

Зерттеу барысында 11-сынып оқушылары үшін толқындық оптика бөлімі бойынша транспәндік мини-жобаларды ұйымдастыру әдістемесі әзірленді. Мини-жобалардың негізгі мақсаты – студенттердің ғылыми-зерттеу белсенділігін ынталандыру, әртүрлі пәндерден алған білімдерді интеграциялау, сыни ойлау мен шығармашылық қабілеттерін дамыту. Мұғалімдерге оқу жоспарын шамадан тыс жүктемей-ақ транспәндік тапсырмаларды оқу процесіне ендіруге мүмкіндік беретін мини-жобалар шектеулі уақытқа (1-3 сабақ) арналған және минималды ресурстармен құрастырылған. Әр жоба оқытудың пәнаралық бағыттылығын қамтамасыз ететін технология, инженерия, математика, химия және информатика элементтерін қамтитын физикалық эксперименттерден тұрады. 1-кестеде транспәндік мини-жобаларды орындауға қысқаша әдістемелік нұсқаулық берліген.

1-кесте – Оптикалық құбылыстар бойынша мини-жобалар

Қарапайым интерферометрді жасау. Мақсаты: интерференциялық жолақтарды және олардың толқын ұзындығына тәуелділігін көрсету.	
Пәндердің интеграциясы	Физика, технология
Құрал-жабдықтар	Лазер, айналар, шыны пластинкалар, экран, сызғыш, ұстағыштар
Орындау алгоритмі	1. Интерферометрді жинау; 2. Лазерді баптау; 3. Жолақтарды өлшеу және талдау.

Бағалау критерийлері	Өлшеулердің дәлдігі, құрал-жабдықтарды жинаудағы ұқыптылық, есеп, жұмысты орындауда бірнеше пәннен алынған білімдер қолданылған
Күтілетін нәтиже және ұзақтығы	Интерференцияны визуалдау, есеп. 1-2 сабақ
Дифракциялық тордан алынған дифракцияны зерттеу. Мақсаты: лазердің толқын ұзындығын анықтау	
Пәндердің интеграциясы	Физика, математика
Құрал-жабдықтар	Лазер, дифракциялық тордан, экран, сызғыш.
Орындау алгоритмі	1. Лазерді дифракциялық торға бағыттау; 2. Дифракциялық максимумдарды белгілеу; 3. Есептеулер жүргізу
Бағалау критерийлері	Есептеулердің дұрыстығы, нәтижелерді рәсімдеу. жұмысты орындауда бірнеше пәннен алынған білімдер қолданылған.
Күтілетін нәтиже және ұзақтығы	Өлшеулер кестесі, дифракцияның графикалық сұлбасы. 1 сабақ.
Мини-лазерлік жоба. Мақсат: мини-лазерді жасау және оның сипаттамаларын өлшеу.	
Пәндердің интеграциясы	Физика, инженерия, технология.
Құрал-жабдықтар	Лазерлік модуль, батарея, линзалар, ұстағыштар, экран.
Орындау алгоритмі	1. Лазерді жинау; 2. Сәулені баптау; 3. Сипаттамаларды өлшеу.
Бағалау критерийлері	Қауіпсіздік техникасын сақтау, өлшеулердің дәлдігі. жұмысты орындауда бірнеше пәннен алынған білімдер қолданылған.
Күтілетін нәтиже және ұзақтығы	Лазердің жұмысын көрсету, интенсивтіліктің үлесу графигі. 2-3 сабақ.
Оптикалық коммуникациялар. Мақсаты: жарық диодтарының көмегімен сигналдарды тасымалдау	
Пәндердің интеграциясы	Физика, информатика, технология.
Құрал-жабдықтар	Жарық диодтары, фотодетекторлар, батареялар, өткізгіш сымдар, экран.
Орындау алгоритмі	1. Жүйені жинау; 2. Хабарламаны тарату; 3. Қателерді талдау.
Бағалау критерийлері	Сигналды сәтті тарату, жұмыс істеу принципін түсіндіру. жұмысты орындауда бірнеше пәннен алынған білімдер қолданылған.

Күтілетін нәтиже және ұзақтығы	Қателер кестесі, жұмыс сұлбасы. 2 сабақ.
Жарық көздерінің спектрлік құрамын зерттеу. Мақсаты: әртүрлі жарық көздерінің спектрлерін анықтау.	
Пәндердің интеграциясы	Физика, химия.
Құрал-жабдықтар	Призма/спектроскоп, шамдар, экран.
Орындау алгоритмі	1. Жарықты призма арқылы өткізу; 2. Спектрлерді тіркеу; 3. Салыстыру.
Бағалау критерийлері	Бақылаулардың толықтығы, тіркеудің дәлдігі, салыстырмалы талдау, жұмысты орындауда бірнеше пәннен алынған білімдер қолданылған.
Күтілетін нәтиже және ұзақтығы	Спектрлер кестесі, интенсивтілік графиктері, ерекшеліктерін сипаттау. 1-2 сабақ.
Поляризациялық фильтрдің көмегімен алынған фотосуреттерді өңдеу. Мақсаты: жарықтың поляризациясын және оның түрлі салаларда қолданысын зерттеу және бағдарламалық платформаның көмегімен пәнаралық мини-өнім әзірлеу	
Пәндердің интеграциясы	Физика, математика, информатика, инженерия
Құрал-жабдықтар	Поляризациялық фильтрлер, смартфон, жарық көзі, суреттерді өңдеуге арналған бағдарламалар, Брюстер бұрышы үшін шыны пластина
Орындау алгоритмі	1. Инженерлік модельді құрастыру; 2. Мәліметтерді жинау (фотосуреттер); 3. Мәліметтерді өңдеу.
Бағалау критерийлері	Поляризация анық, фотосурет және инженерлік модель жасалынған, жұмысты орындауда бірнеше пәннен алынған білімдер қолданылған, презентация.
Күтілетін нәтиже және ұзақтығы	Инженерлік модель, фотосуреттерге талдау жасау. 2- сабақ.

Ұсынылып отырған немесе ұқсас мини-жобаларды әзірлеу транспәндік тұғырдың практикалық қолданысын көрсетеді және оқушыларға зерттеушілік, жобалық іс-әрекеттерге белсенді қатысуға мүмкіндік береді. Жобалық әдіс пен критериялды талдауды оқу процесіне қосу оқушылардың зерттеушілік белсенділігіне, пәнаралық ойлау деңгейлеріне объективті баға беруді қамтамасыз етеді, ал әдістемелік негіз ұсынылған шешімдердің жүйелілігі мен негіздемесіне кепілдік береді.

Осылайша, зерттеу нәтижелері толқындық оптика бойынша трансдисциплинарлық мини-жобалардың білімді интеграциялаудың, зерттеушілік белсенділікті дамытудың және оқушылардың мотивациясын арттырудың тиімді құралы екенін көрсетеді. Ал ұсынылған әдістемелік

ұсынымдар мен жобалардың құрылымы оларды оқу үдерісіне практикалық тұрғыдан енгізуге мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, толқындық оптика бойынша транспәндік мини-жобаларды ұйымдастыру оқушылардың оқу процесіне белсенді қатысуына ықпал етеді, олардың зерттеушілік белсенділігі мен ынтасын арттырады, әртүрлі пәндерден алынған білімді интеграциялау дағдыларын қалыптастырады. Бір-екі сабақта орындалған ықшам жобалардың өзі теориялық білімді практикалық тәжірибемен ұштастыра отырып, білім беру нәтижесіне елеулі серпілістік әсер береді. Әсіресе, құбылыстарды визуализациялау және практикалық іс-әрекеттер оқушыларға күрделі физикалық тұжырымдамаларды терең түсінуге мүмкіндік беретін толқындық оптика бөлімін оқытуды жүзеге асыруда өте маңызды. Басқа зерттеулермен салыстыру ұсынылған тәсілдің дұрыстығын растайды. Осылайша, физика сабағында STEM-PBL қолдану оқушылардың сыни ойлауы мен зерттеу дағдыларын дамытады, игерілетін материалға деген ынтасын арттырады [14; 15; 16; 17]. Сонымен қатар, мәселеге қатысты жүргізілген зерттеулер оқушыларды жобалық тапсырмаларға қатыстыру арқылы олардың бойында жобалау, модельдеу, топта жұмыс жасай білу дағдыларын дамытуға мүмкіндік беретіндігін көрсетеді [18; 19].

Ұсынылып отырған мини-жобаларды ұйымдастыру уақыт пен ресурстар шектеулі болса да, күрделі физикалық құбылыстардың көрнекілігін және оқушылардың бойында пәнаралық ойлауды дамытуды қамтамасыз ететіндей, транспәндік тапсырмаларды оқу процесіне ендіруге болатындығын көрсетеді. Сонымен қатар, мини-жобаларды сәтті жүзеге асыру үшін мұғалімге осындай жобаларды ұйымдастыра білу құзыреттілігіне қойылатын талаптың болуы, қажет болатын құрал-жабдықтардың міндетті түрде қолда болуы және бағалау критерийлерін оқушылардың дайындық деңгейіне бейімдеу секілді мәселелерді ескеру қажет.

Осылайша, зерттеу нәтижелері STEM-білім беру саласындағы халықаралық және қазақстандық зерттеулермен үйлеседі және толқындық оптика бойынша транспәндік мини-жобалардың практикалық әрі әдістемелік құндылыққа ие екенін растайды. Олар оқу материалын белсенді меңгеруге ықпал етіп, педагогикалық зерттеулердің жаңа бағыттарын ашуға мүмкіндік береді.

Авторлар қарастырып отырған зерттеу жұмысына байланысты болашақта жалғасын табатын педагогикалық зерттеулер:

– қарастырылып отырған зерттеу аясында әзірленген транспәндік мини-жобалармен қатар, толқындық оптика бойынша сандық симуляция мен модельдеуден тұратын кең ауқымды транспәндік жобаларды әзірлеу және верификациялау;

– оқушылардың ғылыми-зерттеу және пәнаралық құзыреттіліктерін дамытуға бағытталған транспәндік мини-жобалардың әсерін бағалауға арналған педагогикалық экспериментті ұйымдастыру;

– мұғалімдерге транспәндік мини-жобаларды оқу жүктемесіне кері әсерін тигізбейтіндей етіп, оқу процесіне тиімді ендіруге мүмкіндік беретін әдістемелік нұсқаулықтар мен бағалау құралдарын әзірлеу.

Қорытынды

Толқындық оптика бойынша пәнаралық транспәндік мини-жобалар 11-сынып оқушыларының оқу іс-әрекетін ұйымдастыру барысында тиімді және практикалық эксперименттерді пәнаралық біліммен ұштастыруға мүмкіндік береді. Оларды оқу процесінде қолдану оқушылардың зерттеу белсенділігі мен ынтасын арттыруға, сыни тұрғыдан ойлау мен күрделі мәселелерді шешу дағдыларын дамытуға ықпал етеді. Шектеулі уақытта және ең аз құрал-жабдықпен орындалатын жобалардың құрылымы оқу процесіне транспәндік тұғырды оқу жүктемесін арттырмай ендіруге мүмкіндік береді. Әзірленген әдістемелік нұсқаулықтар мен мини-жобалардың құрылымы оқушылардың зерттеушілік және пәнаралық құзыреттіліктерін одан әрі дамытуға негіз болады, ал болашақ зерттеулер жобалар ауқымын кеңейтуден, цифрлық технологияларды интеграциялаудан және әзірленген транспәндік мини-жобалардың оқушылардың бойында зерттеушілік дағдылар мен сыни ойлауды дамытуға ықпалын бағалауды қамтиды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Гребенщикова, Е., Кнященко, Л.** Трансдисциплинарные основания инноваций в образовании [Мәтін] // Філософія освіти. – 2013. – № 1(12). – С. 210–223.

2 **Вихман, В. В.** Концепция трансдисциплинарного исследования образования: дисс.на соискан. д.п.н. [Мәтін] // ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет». – 2023. – 318 с.

3 **Lee, M. Y., Lee, J. S.** Project-Based Learning as a Catalyst for Integrated STEM Education [Мәтін] // Education Sciences. – 2025. Vol. 15. – № 7. – P. 1–8. – <https://doi.org/10.3390/educsci15070871>

4 **Clark, R., Wang, M., Zaghoul, M.A., Sullivan, S., Chen, K.** Project-Based Learning of Optics and Photonics: How to Teach a Stand-Alone Technical Elective «Niche» Course? [Мәтін] // ASEE Annual Conference & Exposition. – 2019.

5 **Suhartono, S., Cari, C., Sarwanto, Susanti, E., Fatmawati, S.** Transdisciplinary STEM education based on Among's philosophy implementation against engineering problem-solving and motivation: The case monochromatic

light, simple laser project [Мәтін] // EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education. – 2023. – № 19(11). – P. 1–16. – <https://doi.org/10.29333/ejmste/13811>

6 **Плещева, Е. В., Нигей, Н. В., Ланина, С. Ю.** Деятельность преподавателя и студентов в проектном обучении физики // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – С. 79–82. – <https://doi.org/10.18411/trnio-12-2023-82>

7 **Al-Kamzari, F., Alias, N.** A systematic literature review of project-based learning in secondary school physics: theoretical foundations, design principles, and implementation strategies [Мәтін] // Humanities and Social Sciences Communications. – 2025. – № 12:286. – P. 1–18. – <https://doi.org/10.1057/s41599-025-04579-4>

8 Концепция STEM-образования [Мәтін]. – Астана: НАО имени Ы. Алтынсарина, 2023. – 16 с.

9 **Нурумжанова, К. А., Искакова, А. Б., Каирбаева, А. К.** Развитие предпринимательского мышления студентов технических специальностей на основе применения трансдисциплинарного дидактического контента спецкурса по физике [Мәтін] // Перспективы науки и образования. – 2022. – Т. 58. – № 4. – С. 225–242. – <https://doi.org/10.32744/pse.2022.4.14>

10 **Искакова, А. Б., Нурумжанова, К. А.** Трансдисциплинарный подход как ресурс развития у студентов метакогнитивных навыков при изучении физико-технических дисциплин [Мәтін] // Образование и наука. – 2024. – № 2(76). – С. 113–139. – <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2024-2-113-139>

11 **Искакова, А. Б., Нурумжанова, К. А.** Трансдисциплинарный подход как дидактический ресурс формирования профессиональных компетенций [Мәтін] // Ясауи университетінің хабаршысы. – 2024. – № 2(132). – С. 243–257. – <https://doi.org/10.47526/2024-2/2664-0686.58>

12 **Орманова, Г. К., Абдрахманова, Х. К., Жармуханбетов, С. Б.** STEM-білім беру арқылы физика пәнін оқытуда оқушылардың негізгі құзыреттіліктерін қалыптастыру [Мәтін] // Абылай хан атындағы қазақ халықаралық қатынастар және әлем тілдері университеті хабаршысы. Педагогика ғылымдарының сериясы – 2024. – № 2(73). – Б. 464–482. – <https://doi.org/10.48371/PEDS.2024.73.2.028>

13 **Kopbossyn, A., Orynbekova, A., Serikbayeva, N.** STEM Technology in Interdisciplinary Natural Science Teaching [Мәтін] // Scientific Journal of Pedagogy and Economics. – 2025. – № 5(417). – P. 134–145. – <https://doi.org/10.32014/2025.2518-1467.1026>

14 **Mabrurah, F. F., Qadar, R., Sulaeman, N. F.** Enhancing High School Students' Critical Thinking Skills Through Stem-Pjbl in Optics Topic [Мәтін]

// Berkala Ilmiah Pendidikan fisika. – 2023. – № 1(11). – P. 1–8. – <http://dx.doi.org/10.20527/bipf.v1i1.14068>

15 **Rohali, P. A., Qadar, R., Syam, M.** The Effect of The Stem-Pbl Learning on Students' Learning Outcomes on Optical Concepts [Мәтін] // International Journal of STEM Education for Sustainability. – 2023. – № 1(3). – P. 184–194. – <http://dx.doi.org/10.52889/ijses.v3i1.137>

16 **Abdrakhmanova, Kh. K., Kudaibergenova, K. B.** Methodology for the application of STEM-education technology in the study of physics [Мәтін] // Gumilyov Journal of Pedagogy. – 2025. – № 3(152). – P. 59–73. – <https://doi.org/10.32523/3080-1710-2025-152-3-59-73>

17 **Parno, P., Yuliati, L., Hermanto, F. M., Ali, M.** A Case Study on Comparison of High School Students' Scientific Literacy Competencies Domain in Physics with Different Methods: Pbl-Stem Education, Pbl, and Conventional Learning [Мәтін] // Jurnal Pendidikan IPA Indonesia. – 2020. – № 2(9). – P. 159–168. – <http://dx.doi.org/10.15294/jpii.v9i2.23894>

18 **Cai, B., Mainhood, L., Knobel, R. G.** Using reflections to explore student learning during the project component of an advanced laboratory course [Мәтін] // Physics Education. – 2018. – P. 1–4. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.07251>

19 **Dounas-Frazer, D. R., Stanley, J. T., Lewandowski, H. J.** Student ownership of projects in an upper-division optics laboratory course: A multiple case study of successful experiences [Мәтін] // Physics Education. – 2017. – P. 1–22. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020136>

REFERENCES

1 **Grebenshchikova, Ye., Kiyashchenko, L.** Transdistsiplinarnye osnovaniya innovatsiy v obrazovanii [Transdisciplinary foundations of innovation in education] [Text] // Filosofiya osvity. – 2013. – № 1(12). – P. 210–223.

2 **Vikhman, V. V.** Kontseptsiya transdistsiplinarnogo issledovaniya obrazovaniya: diss. na soisk. d.p.n. [The Concept of Transdisciplinary Research in Education: Dissertation for the Degree of Doctor of Pedagogical Sciences] [Text]. – FGAOU VO «Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy gosudarstvennyy universitet», 2023. – 318 p.

3 **Lee, M. Y., Lee, J. S.** Project-Based Learning as a Catalyst for Integrated STEM Education [Мәтін] // Education Sciences. – 2025. Vol. 15. – № 7. – P. 1–8. – <https://doi.org/10.3390/educsci15070871>

4 **Clark, R., Wang, M., Zaghloul, M.A., Sullivan, S., Chen, K.** Project-Based Learning of Optics and Photonics: How to Teach a Stand-Alone Technical Elective «Niche» Course? [Мәтін] // ASEE Annual Conference & Exposition. – 2019.

5 **Suhartono, S., Cari, C., Sarwanto, Susanti, E., Fatmawati, S.** Transdisciplinary STEM education based on Among's philosophy implementation against engineering problem-solving and motivation: The case monochromatic light, simple laser project [Мәтін] // EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education. – 2023. – № 19(11). – P. 1–16. – <https://doi.org/10.29333/ejmrte/13811>

6 **Plashcheyaya, E. V., Nigei, N. V., Lanina, S. Yu.** Deyatel'nost' prepodavatelya i studentov v proektnom obuchenii fiziki [The Activities of Teachers and Students in Project-Based Physics Education] [Text] // Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. – 2023. – P. 79–82. – <https://doi.org/10.18411/trnio-12-2023-82>

7 **Al-Kamzari, F., Alias, N.** A systematic literature review of project-based learning in secondary school physics: theoretical foundations, design principles, and implementation strategies [Мәтін] // Humanities and Social Sciences Communications. – 2025. – № 12:286. – P. 1–18. – <https://doi.org/10.1057/s41599-025-04579-4>

8 Kontseptsiya STEM-obrazovaniya [The Concept of STEM Education] [Text]. – Astana: NAO imeni Y. Altynsarina, 2023. – 16 p.

9 **Nurumzhanova, K. A., Iskakova, A. B., Kairbayeva, A. K.** Razvitie predprinimatelskogo myshleniya studentov tekhnicheskikh spetsial'nostey na osnove primeneniya transdistsiplinarnogo didakticheskogo kontenta spetskursa po fizike [Development of entrepreneurial thinking of students of technical specialties based on the use of transdisciplinary didactic content of a special course in physics] [Text] // Perspektivy nauki i obrazovaniya. – 2022. – № 4(58). – P. 225–242. – <https://doi.org/10.32744/pse.2022.4.14>

10 **Iskakova, A. B., Nurumzhanova, K. A.** Transdistsiplinarnyy podkhod kak resurs razvitiya u studentov metakognitivnykh navykov pri izuchenii fiziko-tekhnicheskikh distsiplin [Transdisciplinary Approach as a Resource to Develop Student Metacognitive Skills in Studying Physical and Engineering Disciplines] [Text] // Obrazovanie i nauka. – 2024. – № 2(76). – P. 113–139. – <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2024-2-113-139>

11 **Iskakova, A. B., Nurumzhanova, K. A.** Transdistsiplinarnyy podkhod kak didakticheskiy resurs formirovaniya professional'nykh kompetentsiy [Transdisciplinary Approach as a Didactic Resource for Developing Professional Competencies] [Text] // Yasui universitetinin khabarsy. – 2024. – № 2(132). – P. 243–257. – <https://doi.org/10.47526/2024-2/2664-0686.58>

12 **Ormanova, G. K., Abdrakhmanova, H. K., Zharmukhanbetov, S.** STEM-bilim beru arqyly fizika panin oqytuda oqyshylardyn negizgi quzyrettilikterin qalyptastyru [Formation of Basic Competencies of Students when Teaching Physics with the Help of Stem Education] [Text] // Abilay Khan atyndagy qazaq khalyqaralyq qatynastar zhane alem tilderi universiteti khabarsy. – 2024. – № 2(73). – P. 464–482. – <https://doi.org/10.48371/PEDS.2024.73.2.028>

13 **Kopbossyn, A., Orynbekova, A., Serikbayeva, N.** STEM Technology in Interdisciplinary Natural Science Teaching [Мәтін] // Scientific Journal of Pedagogy and Economics. – 2025. – № 5(417). – P. 134–145. – <https://doi.org/10.32014/2025.2518-1467.1026>

14 **Mabrurah, F. F., Qadar, R., Sulaeman, N. F.** Enhancing High School Students' Critical Thinking Skills Through Stem-Pjbl in Optics Topic [Мәтін] // Berkala Ilmiah Pendidikan fisika. – 2023. – № 1(11). – P. 1–8. – <http://dx.doi.org/10.20527/bipf.v11i1.14068>

15 **Rohali, P. A., Qadar, R., Syam, M.** The Effect of The Stem-Pbl Learning on Students' Learning Outcomes on Optical Concepts [Мәтін] // International Journal of STEM Education for Sustainability. – 2023. – № 1(3). – P. 184–194. – <http://dx.doi.org/10.52889/ijses.v3i1.137>

16 **Abdrakhmanova, Kh. K., Kudaibergenova, K. B.** Methodology for the application of STEM-education technology in the study of physics [Мәтін] // Gumilyov Journal of Pedagogy. – 2025. – № 3(152). – P. 59–73. – <https://doi.org/10.32523/3080-1710-2025-152-3-59-73>

17 **Parno, P., Yuliati, L., Hermanto, F. M., Ali, M.** A Case Study on Comparison of High School Students' Scientific Literacy Competencies Domain in Physics with Different Methods: Pbl-Stem Education, Pbl, and Conventional Learning [Мәтін] // Jurnal Pendidikan IPA Indonesia. – 2020. – № 2(9). – P. 159–168. – <http://dx.doi.org/10.15294/jpii.v9i2.23894>

18 **Cai, B., Mainhood, L., Knobel, R. G.** Using reflections to explore student learning during the project component of an advanced laboratory course [Мәтін] // Physics Education. – 2018. – P. 1–4. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.07251>

19 **Dounas-Frazer, D. R., Stanley, J. T., Lewandowski, H. J.** Student ownership of projects in an upper-division optics laboratory course: A multiple case study of successful experiences [Мәтін] // Physics Education. – 2017. – P. 1–22. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020136>

27.11.25 ж. баспаға түсті.

03.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. Б. Искакова¹, Н. Ж. Әділбек², Ш. С. Зейтова³

^{1,3}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 27.11.25.

Поступило с исправлениями 03.02.26.

Принято в печать 27.02.26.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСДИСЦИПЛИНАРНЫХ МИНИ-ПРОЕКТОВ ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ В 11 КЛАССЕ

Статья посвящена методическим особенностям организации трансдисциплинарных мини-проектов по волновой оптике в 11 классе. Актуальность исследования определяется необходимостью формирования у старшеклассников межпредметного мышления, исследовательских навыков и мотивации к изучению сложных физических явлений.

Цель исследования – определение и анализ методических особенностей применения трансдисциплинарного подхода при изучении раздела «Волновая оптика» в 11 классе. В соответствии с целью исследования были поставлены следующие задачи: 1) изучение теоретических вопросов, связанных с трансдисциплинарным обучением и проектной деятельностью; 2) анализ примеров использования PBL в преподавании физики в средней школе; 3) разработка структуры мини-проектов, сочетающих физику с другими дисциплинами в преподавании раздела «Волновая оптика»; 4) разработка методических рекомендаций, включая критерии оценки и выбор ресурсов, для учителей.

В работе использованы теоретические методы: анализ научно-методической литературы, сравнительный анализ педагогических практик, моделирование структуры мини-проектов. Особое внимание уделено разработке структуры мини-проекта, алгоритмов организации работы учащихся, вариантов интеграции междисциплинарных знаний и примеров учебных заданий, направленных на изучение интерференции, дифракции и поляризации света.

В результате исследования предложена модель организации мини-проектов, примеры заданий, методические рекомендации.

Ключевые слова: физика, волновая оптика, интерференция, дифракция, трансдисциплинарный подход, междисциплинарная связь.

*A. B. Iskakova¹, N. Zh. Adilbek², Sh. S. Zeitova³

^{1,3}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

²Abai Kazakh National Pedagogical University,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 27.11.25.

Received in revised form 03.02.25.

Accepted for publication 27.02.26.

METHODOLOGICAL FEATURES OF ORGANIZING TRANSDISCIPLINARY MINI-PROJECTS ON WAVE OPTICS IN GRADE 11

This article examines the methodological aspects of organizing transdisciplinary mini-projects on wave optics in 11th-grade students. The relevance of the study stems from the need to develop interdisciplinary thinking, research skills, and motivation to study complex physical phenomena in high school students.

The purpose of the study is to identify and analyze the methodological features of applying a transdisciplinary approach to studying the section "Wave Optics" in the 11th grade. In accordance with the research objective, the following tasks were set: 1) to study theoretical issues related to transdisciplinary learning and project-based activities; 2) to analyze examples of using PBL in teaching physics in secondary school; 3) To develop a structure for mini-projects that combine physics with other subjects in teaching the topic «Wave Optics» 4) to develop methodological recommendations for teachers, including assessment criteria and selection of resources.

The work used theoretical methods: analysis of scientific and methodological literature, comparative analysis of pedagogical practices, modeling of the structure of mini-projects. Particular attention is paid to the development of the mini-project structure, algorithms for organizing student work, options for integrating interdisciplinary knowledge, and examples of educational tasks aimed at studying interference, diffraction, and polarization of light.

As a result of the study, a model for organizing mini-projects, examples of tasks, and methodological recommendations were proposed.

Keywords: physics, wave optics, interference, diffraction, transdisciplinary approach, interdisciplinary communication.

SRSTI 20.01.45

<https://doi.org/10.48081/BGQF1901>

*L. M. Kydyralina¹, A. N. Sarkytov²

^{1,2}Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2836-0919>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3952-3495>

*e-mail: lazat_75@mail.ru

NEURAL NETWORKS FOR AUTOMATING PEDAGOGICAL TASKS IN THE EDUCATIONAL PROCESS

The article explores the theoretical and methodological foundations of applying neural network technologies to automate pedagogical tasks within the educational process. The relevance of the study is determined by the ongoing digital transformation of education and the growing need to integrate artificial intelligence tools into teaching and learning practices. The research examines the potential of neural networks for automating the assessment of learning outcomes, supporting personalized learning trajectories, and utilizing educational data analytics to enhance decision-making in instruction. Particular attention is given to the pedagogical benefits and potential limitations associated with the implementation of neural network technologies in educational environments. The findings demonstrate that neural networks can effectively support teachers' professional activities by facilitating data-driven feedback, optimizing assessment procedures, and improving the adaptability of instructional strategies. The study also outlines methodological considerations for the integration of neural network systems into pedagogical practice and emphasizes the importance of developing digital and technological competencies among educators in modern educational contexts.

Keywords: neural networks, artificial intelligence, automation of pedagogical tasks, digital education, personalized learning, educational analytics.

Introduction

The current stage of development of the education system is characterized by the active digitalization of the learning process and the introduction of intelligent technologies. A significant increase in the volume of educational information, the growing complexity of educational programs, and stricter requirements for the

quality and objectivity of assessing student achievements necessitate the search for new approaches to organizing pedagogical activities [1; 2].

One of the most promising areas for the digital transformation of education is artificial intelligence technologies, including neural networks. Their ability to analyze large amounts of data, identify hidden patterns, and adapt to changing conditions of the educational environment allows them to be considered an effective tool for supporting pedagogical decision-making [3; 4].

The use of neural network technologies opens new opportunities for automating the assessment of learning achievements, personalizing instruction, and increasing the overall efficiency of the educational process [5; 6].

Scientific research highlights the successful application of neural networks in electronic, distance, and blended learning systems, as well as intelligent learning platforms [7; 8]. They allow the processing of educational data with various structures, such as test results, student written responses, and indicators of learning activity, creating conditions for objective analysis and prediction of learning outcomes [9].

At the same time, the integration of neural networks into educational practice requires pedagogical and methodological justification, as well as consideration of ethical aspects regarding personal data protection and responsibility for automated decisions [10; 11]. In this regard, studying the possibilities of using neural networks to automate pedagogical tasks is a relevant and in-demand area of modern pedagogical science.

In recent years, the rapid development of artificial intelligence technologies has significantly influenced the transformation of educational systems worldwide. Neural networks, as one of the most advanced areas of artificial intelligence, provide new opportunities for processing and analyzing large volumes of educational data generated within digital learning environments. Their application allows for the identification of hidden patterns in student learning behavior, prediction of academic performance, and the creation of adaptive learning systems capable of responding to the individual needs of learners [2; 8; 9].

Moreover, the integration of neural network technologies into educational practice contributes to the development of intelligent educational systems that combine automated data analysis with pedagogical decision-making. Such systems support teachers in monitoring student progress, optimizing instructional strategies, and improving the effectiveness of the educational process. Consequently, the study of neural network applications in the automation of pedagogical tasks is becoming an important research direction within modern digital pedagogy and educational technology [4; 7; 12].

Materials and Methods

The methodological foundation of the study is comprised of the scientific works of domestic and foreign researchers in the fields of artificial intelligence, neural networks, digital pedagogy, and educational analytics [1; 2; 3; 4; 5; 12]. During the preparation of the article, monographs, scientific articles, materials from international organizations, and regulatory and methodological documents governing the introduction of digital and intelligent technologies into the educational process were analyzed.

The study employed general scientific and specialized methods of cognition. The main method used was the theoretical analysis of scientific and pedagogical literature, which made it possible to identify existing approaches to the use of neural networks in education and determine their pedagogical potential and primary areas of application [4; 8].

The generalization method was used to systematize scientific views and formulate conclusions about the role of neural networks in automating pedagogical tasks.

To compare traditional and neural network-based approaches to organizing the educational process, a comparative analysis method was used, identifying the advantages and limitations of using neural networks to solve pedagogical problems [5; 6].

Additionally, classification and systematization methods were applied to structure the main groups of pedagogical tasks subject to automation through the use of neural networks.

In addition to the theoretical analysis of scientific literature, the study involved the examination of modern digital educational platforms and intelligent learning systems that utilize artificial intelligence technologies. Particular attention was paid to the functional capabilities of neural network algorithms used in educational analytics, automated assessment systems, and adaptive learning environments. The analysis made it possible to identify the most common models of neural network application in educational practice and to determine their role in supporting pedagogical decision-making and optimizing the organization of the educational process [4; 8].

Furthermore, the research considered the pedagogical conditions necessary for the effective implementation of neural network technologies in education. These conditions include the availability of digital infrastructure, the integration of educational data management systems, and the development of teachers' digital competencies. Special attention was given to the issues of transparency and interpretability of artificial intelligence systems, which are essential for ensuring trust in automated educational tools and for maintaining the pedagogical validity of the results obtained through neural network analysis [10; 11; 12].

Results and Discussion

The analysis of scientific and pedagogical literature, as well as modern research in the field of artificial intelligence in education, has shown that neural networks possess significant potential for automating a wide range of pedagogical tasks. The results of the study indicate that neural network technologies can substantially enhance several key components of the educational process, including the assessment of learning outcomes, the personalization of instruction, and the implementation of educational analytics [3; 4; 5; 6; 8].

One of the most significant results of the study is the confirmation of the effectiveness of neural networks in automating the assessment of student achievements. Neural network algorithms are capable of analyzing large volumes of educational data, including test results, written assignments, and indicators of student learning activity. This makes it possible to identify patterns in learning performance, detect typical mistakes, and determine the level of mastery of educational material with a high degree of accuracy [6; 9]. Compared with traditional assessment methods, the use of neural networks allows for a higher level of objectivity and reproducibility of results, while also significantly reducing the time teachers spend on evaluating student work.

Another important result concerns the improvement of feedback mechanisms in the educational process. Neural network-based systems are able to provide students with personalized recommendations aimed at correcting learning difficulties and improving academic performance. By analyzing individual learning trajectories, such systems can recommend additional educational resources and adaptive learning tasks that correspond to the learner's current level of knowledge and pace of learning [4; 8]. This contributes to the development of more flexible and student-centered learning environments.

The study also demonstrates the considerable potential of neural networks in supporting the personalization of education. By processing large datasets related to student learning behavior, neural networks can identify individual patterns in the assimilation of educational material and generate adaptive educational trajectories. As a result, the educational process becomes more responsive to the needs and abilities of learners, which increases motivation and improves learning outcomes [4; 7].

An important area identified during the study is the use of neural networks in educational analytics and predictive modeling. The analysis of educational data makes it possible to identify students who are at risk of academic failure, predict potential decreases in performance, and develop timely pedagogical interventions. Such predictive capabilities can significantly enhance the effectiveness of educational management and support early intervention strategies aimed at improving student success [8; 9].

At the same time, the results of the study indicate that the implementation of neural network technologies in education is associated with a number of challenges. Among the most significant issues are the protection of personal data, the transparency and interpretability of artificial intelligence algorithms, and the need to ensure the pedagogical validity of automated decision-making processes [10; 11]. These factors require the development of clear ethical guidelines and regulatory frameworks governing the use of artificial intelligence technologies in educational environments.

In addition, the effectiveness of neural network implementation largely depends on the level of digital competence of teachers and the availability of appropriate digital infrastructure. Teachers must possess not only technical skills for working with digital tools but also a methodological understanding of how artificial intelligence technologies can be integrated into pedagogical practice. Therefore, the development of teachers' digital and technological competencies becomes a critical condition for the successful implementation of neural networks in education [12].

Another important aspect identified during the analysis is the potential of neural networks to support data-driven educational management. The integration of artificial intelligence tools into digital learning environments makes it possible to collect, process, and interpret large volumes of educational data in real time. Such analytical capabilities allow educational institutions to monitor learning dynamics, evaluate the effectiveness of teaching strategies, and make evidence-based decisions aimed at improving the quality of education.

The study also indicates that the use of neural networks contributes to the development of adaptive educational systems capable of responding to the individual characteristics of learners. Unlike traditional educational models that rely on standardized instructional approaches, intelligent systems based on neural networks can dynamically adjust the complexity of learning materials, the sequence of tasks, and the pace of instruction. This adaptability enhances the effectiveness of learning and supports the implementation of personalized education models.

Furthermore, the application of neural network technologies opens new prospects for improving the interaction between teachers and students within digital educational environments. Automated analytical tools can assist teachers in identifying learning difficulties at early stages, providing timely support to students and enabling more effective pedagogical interventions. As a result, neural networks not only automate individual pedagogical tasks but also contribute to the transformation of the overall organization of teaching and learning in modern educational systems.

Overall, the results of the study confirm that neural networks should be considered not as a replacement for teachers, but as a powerful tool for supporting pedagogical decision-making. Their application expands the possibilities for analyzing educational data, improving the quality of assessment and feedback, and creating adaptive learning environments. Consequently, neural networks represent an important component of the ongoing digital transformation of modern education.

Conclusion

The study conducted shows that neural networks are an effective tool for automating pedagogical tasks in the educational process. Their application helps optimize teacher activities, increase the objectivity of assessment, develop personalized educational trajectories, and improve educational analytics [3; 8].

The use of neural network technologies meets modern requirements for the digital transformation of education and opens new opportunities for improving the quality of the educational process [4; 7]. At the same time, the implementation of neural networks requires pedagogical and methodological support, as well as consideration of ethical and legal aspects [10; 11]. Future research should focus on developing practical recommendations for integrating neural networks into educational practice and evaluating their pedagogical effectiveness.

The integration of neural network technologies into the educational process contributes not only to the automation of individual pedagogical tasks but also to the transformation of the overall organization of teaching and learning. The use of artificial intelligence tools makes it possible to implement data-driven educational management, improve the quality of pedagogical decision-making, and enhance the adaptability of educational environments to the needs of learners. In this context, neural networks become an important component of the development of digital educational ecosystems and intelligent learning systems [2; 8].

Successful implementation of neural network technologies also requires the development of methodological frameworks for their pedagogical use and the training of teachers capable of effectively applying artificial intelligence tools in professional practice. The formation of digital competencies, understanding of the principles of artificial intelligence operation, and the ability to interpret analytical results become key factors in the effective use of neural network technologies in education. Further research should focus on evaluating the pedagogical effectiveness of such technologies and developing practical models for their integration into modern educational systems [12].

REFERENCES

- 1 **Russell, S., Norvig, P.** Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 4th ed. – Pearson, 2022.
- 2 **Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A.** Deep Learning. – MIT Press, 2016.
- 3 UNESCO. AI and Education: Guidance for Policy-makers. – Paris : UNESCO, 2021.
- 4 **Holmes, W., Bialik, M., Fadel, C.** Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning. – Boston : Center for Curriculum Redesign, 2022.
- 5 OECD. Artificial Intelligence in Education: Challenges and Opportunities. – Paris: OECD Publishing, 2022.
- 6 **Vlasova, T. A.** Application of Neural Networks in the Automation of Pedagogical Measurement // Pedagogika i tsifrovizatsiya. – 2023. – № 2. – P. 45–52.
- 7 **Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., Forcier, L.** Intelligence Unleashed: An Argument for AI in Education. – London: Pearson, 2016.
- 8 **Baker, R., Inventado, P.** Educational Data Mining and Learning Analytics // Learning Analytics. – New York: Springer, 2014. – P. 61–75.
- 9 **Siemens, G., Baker, R.** Learning Analytics and Educational Data Mining // Educational Technology & Society. – 2012. – Vol. 15(3). – P. 138–147.
- 10 **Floridi, L., Cows, J.** A Unified Framework of Five Principles for AI in Society // Harvard Data Science Review. – 2019.
- 11 European Commission. Ethics Guidelines for Trustworthy Artificial Intelligence. – Brussels, 2019.
- 12 **Selwyn, N.** Education and Technology: Key Issues and Debates. – London: Bloomsbury Academic, 2021.

Received 15.01.26.

Received in revised form 04.02.25.

Accepted for publication 19.03.26.

*Л. М. Кыдырлина¹, А. Н. Саркытов²

^{1,2}Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.

15.01.26 ж. баспаға түсті.

04.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БІЛІМ БЕРУ ҮДЕРІСІНДЕ ПЕДАГОГИКАЛЫҚ МІНДЕТТЕРДІ АВТОМАТТАНДЫРУДА НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛЕРДІ ҚОЛДАНУ

Мақалада білім беру үдерісіндегі педагогикалық міндеттерді автоматтандыру үшін нейрондық желі технологияларын қолданудың теориялық және әдіснамалық негіздері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі білім беру саласының цифрлық трансформациясымен және оқыту мен оқыту тәжірибесіне жасанды интеллект құралдарын енгізу қажеттілігінің артуымен түсіндіріледі. Зерттеуде нейрондық желілердің оқу нәтижелерін автоматты бағалау, білім алушылардың жеке білім беру траекторияларын қолдау және педагогикалық шешім қабылдаудың тиімділігін арттыру мақсатында білім беру деректерін талдауда қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Сонымен қатар, білім беру ортасына нейрондық желі технологияларын енгізудің педагогикалық артықшылықтары мен ықтимал шектеулері талданады. Зерттеу нәтижелері нейрондық желілердің деректерге негізделген кері байланысты қамтамасыз ету, бағалау үдерістерін оңтайландыру және оқыту стратегияларының бейімделгіштігін арттыру арқылы оқытушылардың кәсіби қызметін тиімді қолдай алатынын көрсетеді. Сондай-ақ зерттеуде нейрондық желілік жүйелерді педагогикалық практикаға енгізудің әдістемелік аспектілері қарастырылып, қазіргі білім беру жағдайында педагогтардың цифрлық және технологиялық құзыреттіліктерін дамыту қажеттілігі атап өтіледі.

Кілтті сөздер: нейрондық желілер, жасанды интеллект, педагогикалық тапсырмаларды автоматтандыру, цифрлық білім беру, дербестендірілген оқыту, білім беру аналитикасы.

*Л. М. Кыдыралина¹, А. Н. Саркытов²

^{1,2} Университет Шәкәрім, Республика Казахстан, г. Семей.

Поступило в редакцию 15.01.26.

Поступило с исправлениями 04.02.26.

Принято в печать 19.03.26.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Статья посвящена исследованию теоретических и методологических основ применения технологий нейронных сетей для автоматизации педагогических задач в образовательном процессе. Актуальность исследования обусловлена продолжающейся цифровой трансформацией образования и возрастающей необходимостью интеграции инструментов искусственного интеллекта в практику обучения и преподавания. В работе рассматривается потенциал нейронных сетей для автоматизации оценки результатов обучения, поддержки персонализированных образовательных траекторий и использования аналитики образовательных данных для повышения эффективности принятия педагогических решений. Особое внимание уделяется педагогическим преимуществам и возможным ограничениям, связанным с внедрением нейросетевых технологий в образовательную среду. Полученные результаты показывают, что нейронные сети могут эффективно поддерживать профессиональную деятельность преподавателей, обеспечивая использование данных для обратной связи, оптимизацию процедур оценивания и повышение адаптивности учебных стратегий. В исследовании также рассматриваются методические аспекты интеграции нейросетевых систем в педагогическую практику и подчеркивается важность развития цифровых и технологических компетенций педагогов в современных образовательных условиях.

Ключевые слова: нейронные сети, искусственный интеллект, автоматизация педагогических задач, цифровое образование, персонализированное обучение, образовательная аналитика.

***А. А. Трищенко¹**

¹Смоленский государственный университет, СОГБОУИ Лицей имени Кирилла и Мефодия, Российская Федерация, г. Смоленск.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6780-2572>

*e-mail: youtriyaz@gmail.com

**ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ УЧАЩИХСЯ
ПРОФИЛЬНЫХ КЛАССОВ В ПРЕПОДАВАНИИ
ФИЗИКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
МЕТОДИКИ Л. А. ЯСЮКОВОЙ**

В данной статье рассматриваются современные подходы к преподаванию физики в условиях профильного обучения учеников старших классов с применением психодиагностической методики Л.А. Ясюковой, как инструмента диагностики и адаптации образовательного процесса, для комплексной оценки психологической, когнитивной и учебной готовности учащихся. Исследование имеет основную цель: проанализировать возможности и эффективность применения методики Л.А. Ясюковой для оценки и развития учебных компетенций учащихся профильных классов при изучении физики. Методика Л.А. Ясюковой позволяет сочетание психолого-педагогических данных с результатами предметной диагностики, в конечном итоге позволяет учителям физики профильных классов естественно-математического цикла выстраивать более точные траектории обучения, развития для учащихся и таким образом повышать эффективность преподавания физики. Процесс учения становится более диагностируемым. Представлены результаты анализа диагностических данных по различным профилям (физико-математический, химико-биологический, социально-экономический, гуманитарный). Показана взаимосвязь между уровнями развития когнитивных способностей, типов мышления, личностно-мотивационных компонентов и успешностью освоения предмета физики. Доказано, что использование данных методики позволяет выстраивать индивидуальные образовательные маршруты, адаптировать учебные материалы, повышать мотивацию к изучению предмета и целенаправленно формировать функциональную

грамотность. Работа укрепляет междисциплинарные связи между, психологией и методикой преподавания физики, предлагая практико-ориентированную модель интеграции диагностики результатов.

Ключевые слова: методика Л. А. Ясюковой, профильное обучение, методика преподавания физики, когнитивные компетенции, психологическая готовность, типы мышления, индивидуализация обучения, функциональная грамотность.

Введение

Актуальность оценки и развития компетенций учащихся естественнонаучных профильных классов обусловлена запросом российского социума на эффективное самоопределение выпускников школ и более осознанный и целенаправленный выбор профессиональной траектории. Изменение структуры рынка труда в России и мире привело к изменению современной образовательной парадигмы. Современная система образования всё более акцентирует внимание на компетентностном подходе, предполагающем не только усвоение знаний, но и развитие умений и навыков их практического применения, формирование у обучаемых метакогнитивных, предметных и личностных результатов. В этом контексте физика, как учебная дисциплина, обладает исключительным потенциалом для формирования интеллектуальной, логической и исследовательской культуры учащихся. Она способствует развитию абстрактного мышления, умения анализировать и синтезировать информацию, строить модели и проверять гипотезы [1]. Однако на практике педагоги часто сталкиваются с проблемой снижения познавательной мотивации школьников, трудностями в усвоении абстрактных понятий и низким уровнем когнитивной готовности к восприятию сложного материала. Эти проблемы особенно заметны в условиях профильного обучения, когда учебная нагрузка, уровень абстрактности и сложность содержания возрастают многократно. В этой связи актуальной становится проблема не только передачи предметных знаний, развитие когнитивных, личностных и метапредметных компетенций, но и оценка индивидуальных особенностей мотивации, восприятия, метакогнитивного потенциала каждого ученика [2, С. 79–84]; [3], что требует от учителя глубокого понимания особенностей учащихся.

Оценка и развитие компетенций становится важным инструментом обратной связи – она показывает, насколько эффективно реализуются цели и задачи профильного обучения. Таким образом, объектом исследования является система профильного обучения физико-математическим учебным дисциплинам. В профильных классах происходит более углубленное формирование предметных компетенций, что требует

дифференцированных подходов к оценке достижений учащихся. Важным направлением совершенствования методики преподавания физики и оценки эффективности профилизации обучения становится использование надежных психодиагностических инструментов, позволяющих выявить индивидуальные различия в когнитивных и личностных характеристиках учащихся.

Одной из таких методик является диагностика Л. А. Ясюковой, обеспечивающая многокомпонентный анализ готовности школьников к обучению [4; 5; 6]. Цель исследования: проанализировать возможности и эффективность применения методики Л. А. Ясюковой для оценки и развития учебных компетенций учащихся профильных классов при изучении физики. Сочетание психолого-педагогических данных с результатами предметной диагностики позволяет педагогу выстраивать более точные траектории развития и повышать эффективность преподавания физики. Основными задачами исследования являются: определение интеллектуальной готовности к профильному обучению и выявление зоны ближайшего развития учащихся. Актуальность данного исследования определяется необходимостью интеграции объективных психодиагностических данных в повседневную практику преподавания, что способствует более адресной работе с учащимися и развитию их функциональной грамотности [2; 6].

Теоретической основой применяемой комплексной методики Л. Я. Ясюковой [7] являются: концепция развивающего обучения Л. В. Занкова, Д. Б. Эльконина и В. В. Давыдова [8; 9]; концепция компетентного подхода А. В. Хуторского [10] и принципы системно-деятельностной педагогики.

Материалы и методы

Исследование на базе лицея имени «Кирилла и Мефодия» города Смоленска. Основу составляют принципы личностно-ориентированного, компетентного и деятельностного подходов.

В работе применялся комплекс методов: теоретический анализ психолого-педагогической литературы, наблюдение, анкетирование, психолого-педагогическая диагностика (комплексная методика Л. А. Ясюковой), а также методы статистического анализа и педагогической интерпретации данных.

В исследовании участвовали учащиеся 10-х классов четырех профильных направлений: физико-математического (n=25), химико-биологического (n=28), социально-экономического (n=30) и гуманитарного (n=27). Параллельно с психодиагностикой проводилась оценка предметных компетенций по физике с использованием заданий на функциональную

грамотность и элементов форматов PISA, направленных на оценку применения знаний в практических, жизненных ситуациях.

1 Когнитивные компетенции и особенности мышления учащихся разных профилей.

Методика Л. А. Ясюковой позволяет с высокой степенью достоверности определить уровень развития ключевых когнитивных функций: 1) понятийного мышления, 2) абстрактно-логического анализа, 3) вербального интеллекта и 4) комбинаторных способностей.

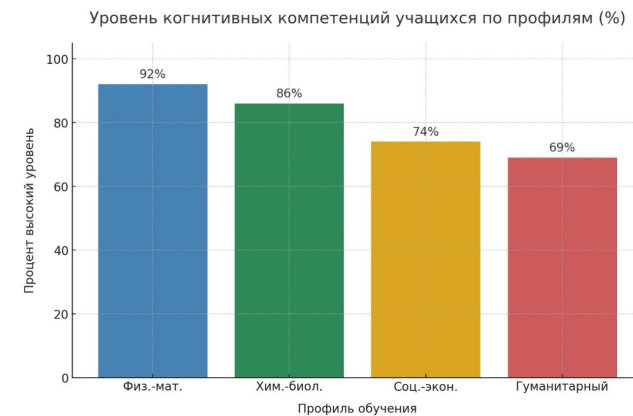


Рисунок 1 – Уровень когнитивных компетенций учащихся по профилям обучения (%)

Представленная на рисунке 1 диаграмма наглядно иллюстрирует значительный разброс в уровне развития когнитивных компетенций между учащимися разных профилей.

Учащиеся физико-математического профиля демонстрируют абсолютно выдающийся результат (92 % высокого уровня), что является объективным подтверждением их развитых аналитико-логических способностей, высокой скорости обработки информации и предрасположенности к оперированию абстрактными понятиями. Этот профиль концентрирует учащихся с наиболее мощным интеллектуальным потенциалом для освоения точных наук.

Химико-биологический профиль показывает также высокий результат (86 %), но несколько уступает физико-математическому. Это свидетельствует о сильной когнитивной базе, однако, возможно, с большим уклоном в системное и классифицирующее мышление, необходимое для биологии и химии, и чуть меньшим – в абстрактно-математическое.

Наиболее показательными являются данные по социально-экономическому (74 %) и гуманитарному (69 %) профилям. Существенное снижение процента учащихся с высоким уровнем когнитивных компетенций не является показателем их неспособности, а отражает иную направленность интеллекта. Эти данные подтверждают специфику образовательных программ данных профилей, где преобладают вербально-социальные, интерпретационные и коммуникативные компетенции над строго логико-аналитическими. Именно для этих групп важность индивидуального подхода с опорой на диагностику наиболее высока, так как позволяет выявить внутренний потенциал для развития физического мышления, который может быть скрыт за иной когнитивной структурой.

Важным направлением углубленного анализа является изучение преобладающих типов мышления учащихся в зависимости от профиля их обучения. Формирование логического, творческого, визуального и комбинаторного типов мышления напрямую связано с методами преподавания, содержанием предмета и уровнем психологической готовности [7; 11].

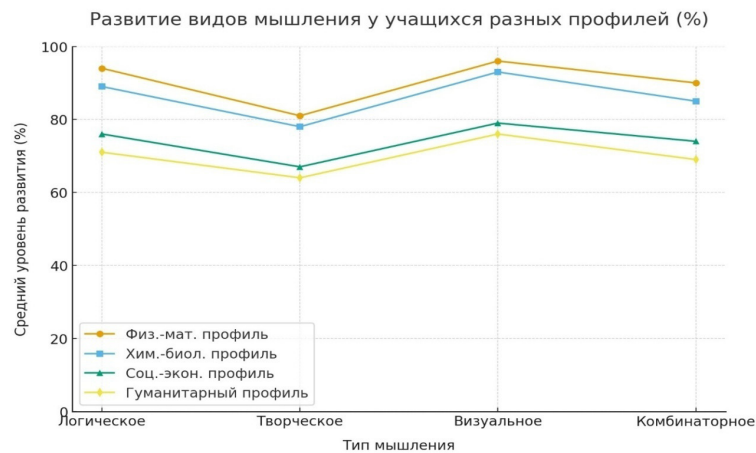


Рисунок 2 – Развитие видов мышления у учащихся разных профилей (%)

Диаграмма на рисунке 2 предоставляет более детализированную картину когнитивного ландшафта в профильных классах. Анализ данных позволяет выявить следующие закономерности:

– физико-математический профиль демонстрирует абсолютное лидерство по уровню логического и комбинаторного мышления. Это является прямым отражением требований профиля: необходимость выстраивать

строгие причинно-следственные связи, оперировать формулами и проводить многоходовые вычисления. При этом показатели творческого и визуального мышления также высоки, что указывает на сбалансированность и гибкость интеллекта, способного не только к алгоритмизации, но и к генерации новых идей и мысленному представлению сложных систем;

– химико-биологический профиль показывает очень похожую, но смягченную картину. Высокие показатели логического и комбинаторного мышления здесь дополняются часто более выраженным визуальным мышлением, что связано с необходимостью оперировать формулами органических соединений, схемами биохимических циклов и пространственными моделями молекул;

– социально-экономический профиль характеризуется выраженным пиком в области логического мышления при относительно низких показателях творческого и визуального. Это отражает прикладной, расчетно-аналитический характер профиля, где требуется анализировать данные, строить графики и прогнозы, но в меньшей степени – создавать принципиально новые концепции или глубоко визуализировать процессы;

– гуманитарный профиль представляет собой уникальную когнитивную конфигурацию. Его отличительная черта – относительно высокий уровень визуального и творческого мышления при значительно более низких, по сравнению с естественно-научными профилями, показателях логического и комбинаторного. Это полностью соответствует специфике гуманитарного познания, ориентированного на интерпретацию, образность, многозначность и эмоциональное восприятие.

Данная диагностика позволяет учителю физики не работать «вслепую», а целенаправленно подбирать задачи и формулировать объяснения, апеллируя к сильным сторонам мышления учащихся каждого профиля и развивая слабые.

2 Психологическая готовность учащихся к изучению физики: структурный анализ

Психологическая готовность учащихся является интегральным показателем, включающим когнитивный, личностный, эмоционально-волевой и мотивационный компоненты. Методика Л. А. Ясюковой позволяет оценить эти компоненты в комплексе и определить приоритетные направления педагогического сопровождения.

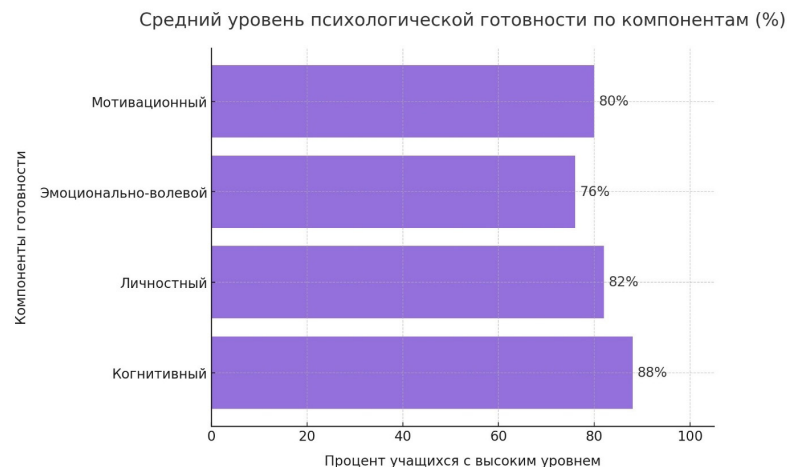


Рисунок 3 – Средний уровень психологической готовности учащихся по компонентам (%)

Столбчатая диаграмма (Рис. 3) дает четкое представление о структуре психологической готовности старшеклассников. Анализ показывает, что наиболее развитым в общей выборке является когнитивный компонент (88 %). Это закономерно и отражает целенаправленный отбор и самоопределение учащихся в профильные классы, где развитая интеллектуальная база является ключевым условием успеха.

Высокий личностный компонент (82 %) демонстрирует, что у большинства старшеклассников сформирована адекватная самооценка, чувство ответственности и осознанное отношение к процессу обучения, что является надежной основой для самостоятельной работы.

Мотивационный компонент (80 %) подтверждает общий осознанный интерес учащихся к углубленному изучению выбранных дисциплин, что создаёт благоприятный эмоциональный фон для обучения.

Критически важным выводом является данные по эмоционально-волевому компоненту (76 %), который оказался наименее развитым. Это конкретное, измеримое указание на «слабое звено» в подготовке учащихся. Низкие показатели по этому компоненту означают, что у значительной части школьников могут наблюдаться трудности с саморегуляцией, концентрацией внимания в условиях помех, устойчивостью к стрессу (например, перед контрольными работами, при решении нестандартных задач у доски или во время сложных лабораторных экспериментов). Это прямо указывает на необходимость целенаправленной работы педагога по формированию в

классе поддерживающей атмосферы, внедрению технологий поэтапного достижения целей и развитию навыков преодоления трудностей.

3. Корреляция между компонентами готовности и успеваемостью по физике

Данные исследования свидетельствуют о прямой зависимости между уровнем когнитивной готовности, структурой мышления и результатами предметной успеваемости по физике.

Учащиеся с высоким уровнем понятийного и абстрактно-логического мышления, развитой логической памятью успешнее выполняли задания на анализ графиков, построение физических моделей, объяснение явлений и решение комбинированных задач. Учащиеся со средним уровнем когнитивной готовности часто испытывали трудности в переходе от конкретных примеров к обобщениям и теоретическим построениям, что требовало от учителя использования специальных методических мостов и визуализаций.

Особое внимание уделялось личностно-мотивационным аспектам. Методика Ясюковой позволила выявить учащихся с пониженным уровнем саморегуляции и волевого контроля, что напрямую коррелировало с трудностями при выполнении длительных лабораторных работ и сложных исследовательских заданий.

В то же время высокий уровень эмоциональной устойчивости и самоконтроля был характерен для учащихся, наиболее успешных в проектной и экспериментальной деятельности, требующей терпения и точности.

Результаты и обсуждение

Педагогические интерпретации и практическое применение диагностики. Результаты диагностики по методике Л. А. Ясюковой являются не констатацией, а отправной точкой для построения адресной педагогической стратегии. На их основе педагог может:

Формировать дифференцированные группы. Создавать малые группы для проектной деятельности, где учащиеся с сильным логическим мышлением отвечают за аналитическую часть, с развитым визуальным – за моделирование и графическое представление, а с выраженными коммуникативными навыками – за презентацию результатов.

Определять приоритетные направления развития. Для гуманитариев делать акцент на визуализации процессов и историко-философском контексте открытий. Для социально-экономического профиля подбирать задачи с экономическим и социальным подтекстом (КПД, эффективность, статистика). Для химико-биологического профиля усиливать блок, связанный с термодинамикой, электростатикой и квантовыми явлениями в живой природе.

Адаптировать учебные материалы. Учащимся с низкой скоростью обработки информации предоставлять алгоритмы и опорные конспекты. Тем, у кого слабо развито визуальное мышление, предлагать больше видеоматериалов, 3D-моделей и реальных экспериментов. Для развития творческого мышления у «технистов» использовать задачи с открытым окончанием и изобретательские задачи (ТРИЗ) [12; 15].

Внедрять систему самооценки и рефлексии. Ознакомление учащихся (в тактичной и обобщенной форме) с их сильными сторонами и зонами роста позволяет сформировать у них осознанное отношение к собственному учебному процессу, развивать метакогнитивные навыки [13].

В рамках экспериментальной части исследования были апробированы конкретные методы, основанные на диагностических данных:

Тематические лаборатории с элементами проектного анализа, где выбор темы и сложности задания согласовывался с профилем и выявленными типами мышления [10; 14].

«Физические дебаты», развивающие не только понимание физических законов, но и коммуникативные навыки, умение аргументировать свою точку зрения, что особенно важно для гуманитарных и социально-экономических профилей [10; 15].

Интерактивные опыты, требующие установления межпредметных связей с биологией, экологией, информатикой и математикой, что способствует развитию комбинаторного и системного мышления.

Такой дифференцированный и диагностически обоснованный подход позволил в течение учебного года повысить не только среднюю успеваемость по предмету, но и зафиксировать рост показателей когнитивного развития на контрольной диагностике на 10–12 %.

Выводы

Проведённое исследование показало, что диагностика готовности учащихся по методике Л. А. Ясюковой является высокоэффективным и валидным инструментом повышения качества преподавания физики в условиях профильной школы. Она позволяет перейти от интуитивного понимания особенностей класса к объективному, данные-ориентированному анализу структуры когнитивных и личностных особенностей школьников.

Результаты диагностики демонстрируют существенные различия в уровне развития когнитивных компетенций и структуре мышления между учащимися разных профилей, а также выявляют «слабые звенья» в общепрофильной психологической готовности, такие как эмоционально-волевой компонент. Установленная прямая корреляция между уровнем когнитивного развития и успешностью в освоении физики подтверждает необходимость учета этих факторов в педагогическом планировании.

Включение результатов диагностики в практику преподавания позволяет выстроить адресное педагогическое сопровождение, адаптировать содержание и методы обучения под реальные потребности и возможности учащихся, целенаправленно развивать функциональную грамотность и метапредметные компетенции. Это способствует не только росту предметных результатов, но и повышению исследовательской мотивации и осознанному самоопределению старшеклассников.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку детализированной интегрированной модели педагогической поддержки, включающей регулярный мониторинг по методике Л. А. Ясюковой, алгоритмы построения индивидуальных траекторий и интеграцию этих инструментов в цифровые образовательные среды для автоматизации анализа и рекомендаций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Полат, Е. С.** Новые педагогические и информационные технологии в системе образования. – М. : Академия, 2021. – 247 с.
- 2 **Тимофеева, Н. М., Медведева, Л. М.** О формировании функциональной грамотности школьников на уроках информатики // Развитие научно-технического творчества детей и молодежи: сб. материалов VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании. – 2022. – С. 79–84. – [Электронный ресурс]. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=48199101>
- 3 **Власова, В. Н.** Психолого-педагогические основы обучения физике в профильной школе. – СПб. : Речь. – 2019. – 267 с.
- 4 **Ясюкова, Л. А.** Методика диагностики психологической готовности к обучению. – М. : Центр педагогической психологии, 2018. – 192 с.
- 5 **Вьюнова, Н. В.** Психолого-педагогические основы профильного обучения. – М. : Просвещение. – 2017. – 208 с.
- 6 **Тимофеева, Л. Л., Бутримова, И. В.** Designing Tasks Aimed at Developing the Fundamentals of Functional Literacy in Primary Schoolchildren // Primary Education. – 2023. – Vol. 11. – № 5. – С. 11–18. – <https://doi.org/10.12737/1998-0728-2023-11-5-11-18>
- 7 **Ясюкова Л. А.** Диагностика готовности учащихся к обучению. – СПб. : Речь, 2012. – 256 с.
- 8 **Эльконин Д. Б.** Как научить детей читать // Психическое развитие в детских возрастах: избранные психологические труды, под ред. Д. И. Фельдштейна. – Москва, Воронеж. – 2001. – С. 323–349.

- 9 **Давыдов В. В.** Теория развивающего обучения. – М. : ИНТОР. – 1996. – 542 с.
- 10 **Хуторской А. В.** Методология инновационной практики в образовании. – М. : Ридеро, 2021. – 162 с.
- 11 **Левитов Н. Д.** Психологические особенности мышления учащихся при обучении физике. – М. : Педагогика, 1982. – 215 с.
- 12 **Атанов Г. А.** Методика преподавания физики в старшей школе. – М. : Академкнига, 2020. – 231 с.
- 13 **Беликова Р. М., Новолодская Е. Г.** Развитие естественнонаучной грамотности обучающихся средствами дополнительного образования // Педагогическая перспектива. – 2022. – № 1. – С. 57–63.
- 14 **Шаповалов А. А.** Подходы к конструированию модели смешанного обучения методике преподавания физики // Вестник Алтайского государственного педагогического университета. – 2021. – № 4. – С. 37–42. – <https://doi.org/10.37386/2413-4481-2021-4-37-42>
- 15 **Parziyeva M., Turekhanova K., Kuralbek R., Akimkhanova Z.** Особенности преподавания физики в дистанционном формате обучения // Journal of Educational Sciences. – 2021. – Vol. 67. – № 2. – <https://doi.org/10.26577/JES.2021.v67.i2.15>

REFERENCES

- 1 **Polat E. S.** Novy`epedagogicheskieiinformacionny`etexnologii v sistemeobrazovaniya. – М.: Akademiya, 2021. – 247 p.
- 2 **Timofeeva N. M., Medvedeva L. M.** O formirovaniifunktional`nojgramotnostishkol`nikovnaurokaxinformatiki // Razvitienauchno-texnicheskogotvorchestvadetejimolodezhi: sb. materialov VI Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. Kirov: Mezhhregional`ny`jcentrinnovacionny`xtexnologij v obrazovanii. – 2022. – P. 79–84. [Electronic resource]. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=48199101>
- 3 **Vlasova V. N.** Psixologo-pedagogicheskieosnovy` obucheniya fizike v profil`nojshkole. – SPb.: Rech`. – 2019. – 267 p.
- 4 **Yasyukova L. A.** Metodikadiagnostikipsixologicheskogotovnosti k obucheniyu. – М.: Centrpedagogicheskojpsixologii, 2018. – 192 p.
- 5 **Vyunova N. V.** Psixologo-pedagogicheskieosnovy` profil`nogoobucheniya. – М.: Prosveshhenie. – 2017. – 208 p.
- 6 **Timofeeva L. L., Butrimova I. V.** Designing Tasks Aimed at Developing the Fundamentals of Functional Literacy in Primary Schoolchildren // Primary Education. – 2023. – Vol. 11. – № 5. – P. 11–18. – <https://doi.org/10.12737/1998-0728-2023-11-5-11-18>

- 7 **Yasyukova L. A.** Diagnostikagotovnostiuchashhixsya k obucheniyu. – SPb.: Rech`, 2012. – 256 p.
- 8 **E`l`konin D. B.** Kaknauchit` detejchitat` // Psixicheskoe razvitie v detskixvozrastax: izbranny`epsixologicheskietrudyy`, pod red. D. I. Fel`dshtejna. – Moskva, Voronezh. – 2001. – P. 323–349.
- 9 **Davy`dov V. V.** Teoriyarazvivayushhegoobucheniya. – М.: INTOR. – 1996. – 542 p.
- 10 **Xutorskoj A. V.** Metodologiyainnovacionnojpraktiki v obrazovanii. – М.: Ridero, 2021. – 162 p.
- 11 **Levitov N. D.** Psixologicheskie osobennosti my`shleniyauchashhixsya priobucheniifizike. – М.: Pedagogika, 1982. – 215 p.
- 12 **Atanov G. A.** Metodikapredopavaniyafiziki v starshejskole. – М.: Akademkniga, 2020. – 231 p.
- 13 **Belikova R. M., Novolodskaya E. G.** Razvitie estestvenno nauchno gramotnosti obuchayushhixsya sredstv amidopolnitel`nogoobrazovaniya // Pedagogicheskaya perspektiva. – 2022. – № 1. – P. 57–63.
- 14 **Shapovalov A. A.** Podxody` k konstruirovaniyu modeli smeshannogo obucheniya metodike prepodavaniyafiziki // VestnikAltajskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogouniversiteta. – 2021. – № 4. – P. 37–42. – <https://doi.org/10.37386/2413-4481-2021-4-37-42>
- 15 **Parziyeva M., Turekhanova K., Kuralbek R., Akimkhanova Z.** Osobennosti prepodavaniya fiziki v distancionnom формате obucheniya // Journal of Educational Sciences. – 2021. – Vol. 67. – № 2. – <https://doi.org/10.26577/JES.2021.v67.i2.15>

Поступило в редакцию 27.02.26.
Поступило с исправлениями 03.02.26.
Принято в печать 19.03.26.

*А. А. Трищенко¹

¹Смоленск мемлекеттік университеті, Смоленск мемлекеттік бюджеттік жоғары кәсіби білім беру мекемесінің (СМБЖКББМ) Кирилл және Мефодий лицейі, Ресей Федерациясы, Смоленск қ. 27.02.26 ж. баспаға түсті. 03.02.26 ж. түзетулерімен түсті. 19.03.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

**Л. А. ЯСЮКОВА ӘДІСТЕМЕСІН ҚОЛДАНУ НЕГІЗІНДЕ
ФИЗИКАНЫ ОҚЫТУДА БЕЙІНДІК СЫНЫП
ОҚУШЫЛАРЫНЫҢ ҚҰЗЫРЕТТЕРІНІҢ
ДАМУ ДЕҢГЕЙІН БАҒАЛАУ**

Бұл мақалада Л. А. Ясюкованың психодиагностикалық әдістемесін қолдана отырып, жоғары сынып оқушыларын бейіндік оқыту жағдайында физиканы оқытудың заманауи тәсілдері оқушылардың психологиялық, танымдық және оқу дайындығын кешенді бағалау үшін білім беру процесін диагностикалау және бейімдеу құралы ретінде қарастырылады. Зерттеудің негізгі мақсаты бар: Л. А. Ясюкова әдістемесін физиканы оқу кезінде бейінді сынып оқушыларының оқу құзыреттіліктерін бағалау және дамыту үшін қолдану мүмкіндіктері мен тиімділігін талдау. Әдістеме Л. А. Ясюкова психологиялық-педагогикалық деректерді пәндік диагностика нәтижелерімен үйлестіруге мүмкіндік береді, сайып келгенде, жаратылыстану-математикалық циклдің бейінді сыныптарының физика мұғалімдеріне оқушылар үшін оқытудың, дамытудың дәл траекторияларын құруға және осылайша физиканы оқытудың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Оқу процесі диагноз қойылады. Әр түрлі профильдер бойынша диагностикалық деректерді талдау нәтижелері ұсынылған (физика-математикалық, химиялық-биологиялық, әлеуметтік-экономикалық, гуманитарлық). Когнитивті қабілеттердің даму деңгейлері, ойлау түрлері, тұлғалық-мотивациялық компоненттер мен физика пәнін игерудің сәттілігі арасындағы байланыс көрсетілген. Бұл әдістемені қолдану жеке білім беру маршруттарын құруға, оқу материалдарын бейімдеуге, пәнді оқуға деген ынтаны арттыруға және функционалдық сауаттылықты мақсатты түрде қалыптастыруға мүмкіндік беретіні дәлелденді. Жұмыс нәтижелерді диагностикалау интеграциясының тәжірибеге бағытталған моделін ұсына отырып, физиканы оқыту психологиясы мен әдістемесі арасындағы пәнаралық байланысты нығайтады.

Кілтті сөздер: Л. А. Ясюкованың әдістемесі, бейіндік оқыту, физиканы оқыту әдістемесі, когнитивті құзыреттілік, психологиялық дайындық, ойлау түрлері, оқытуды даралау, функционалдық сауаттылық.

*A. A. Trishchenkov¹

Smolensk State University, Smolensk State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education (SSBEIHPЕ) Cyril and Methodius Lyceum Russian Federation, Smolensk.

Received 27.02.26.

Received in revised form 03.02.25.

Accepted for publication 19.03.26.

**PROPAGATION OF ELASTIC WAVES IN
ANISOTROPIC THERMOELASTIC MEDIA:
MODELING IN WOLFRAM MATHEMATICA 11**

This article examines modern approaches to teaching physics in the context of specialized education of high school students using L. A. Yasyukova's psychodiagnostic methodology as a tool for diagnosing and adapting the educational process, for a comprehensive assessment of psychological, cognitive and educational readiness of students. The main purpose of the study is to analyze the possibilities and effectiveness of applying L. A. Yasyukova's methodology for assessing and developing the educational competencies of students in specialized classes in the study of physics. The methodology of L. A. Yasyukova makes it possible to combine psychological and pedagogical data with the results of subject diagnostics, ultimately allowing physics teachers of specialized classes of the natural and mathematical cycle to build more accurate learning and development trajectories for students and thus increase the effectiveness of teaching physics. The learning process is becoming more diagnosable. The results of the analysis of diagnostic data on various profiles (physico-mathematical, chemical-biological, socio-economic, humanitarian) are presented. The relationship between the levels of development of cognitive abilities, types of thinking, personal and motivational components and the success of mastering the subject of physics is shown. It is proved that the use of these methods allows you to build individual educational routes, adapt educational materials, increase motivation to study the subject and purposefully form functional literacy. The work strengthens interdisciplinary links between psychology and the methodology of teaching physics, offering a practice-oriented model for integrating diagnostic results.

Keywords: L. A. Yasyukova's methodology, specialized education, methods of teaching physics, cognitive competencies, psychological readiness, types of thinking, individualization of learning, functional literacy.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Абдуллаева Жансая Бақытжанқызы, «Физика» мамандығы бойынша докторант, Физика, математика және цифрлық технологиялар институты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: abdullaeva.zhansaya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8282-7381>

Адамова Айгуль Дюсенбиновна, PhD, қауымд.профессор, «Есептеу техникасы және бағдарламалық қамтамасыз ету» мамандығы, Компьютерлік инженерия мектебі, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aigul.adamova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7773-9522>

Айтимова Ұлдада Жолдасбековна, қауымд.профессор, Бизнес және цифрлық технологиялар институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: zada@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0803-7137>

Ақылбекова Айман Дүйсембаевна, PhD, техникалық физика кафедрасының доцент м.а., Физика-техникалық ғылымдар институты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 011000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aiman88_88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1211-8877>

Ақжолова Әлия Әбдірайымқызы, PhD, қауымд.профессоры, Физика кафедрасы, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, 050000, e-mail: aaa_25.04.79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2568-503X>

Алиева Молдир Ермекбаевна, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Физика кафедрасы, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050000, e-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>

Асембаева Мансия Кабыловна, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасының доценті, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: MAsembaeva@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2022-3888>

Ахметов Калижан Жандосович, «Программалық инженерия мектебі» мамандығы бойынша магистрант, Astana IT University, Астана қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 242853@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-5488-0329>

Әбдіжәлел Махаббат, «Сапа менеджменті және диагностика әдістері мен жүйелері (салалар бойынша)» мамандығы бойынша 1-курс студенті,

Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kanatkyzy_24@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8878-7832>

Әділбек Назым Жасұланқызы, «7M01504 – Физика» білім беру бағдарламасының магистранты, «Математика, физика және информатика» факультеті, Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық университеті, Алматы қ., 050010, Қазақстан Республикасы, e-mail: addilbekovva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-5640-6680>

Бакранов Нұрлан Болатұлы, PhD, Бас ғылыми қызметкер «Research Group altAir nanolab», Алматы қ., 050043, Қазақстан Республикасы, Бас академиялық қызметкері, Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, Алматы, 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bakranov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4577-6510>

Бакранова Дина Игоревна, PhD, қауымдастырылған профессор СДУ университеті, Ақпараттық технологиялар және қолданбалы математика мектебі, 040900, Қаскелең қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: dinabakranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0793-9905>

Балапанов Малик Хамитович, физика-математика ғылымдарының докторы, «Жалпы физика» кафедрасының профессоры, Физика институты, Уфа ғылым және технологиялар университеті, Уфа қ., 450076, Ресей Федерациясы, e-mail: balapanovmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7885-9462>

Баширов Александр Витальевич, техника ғылымдарының кандидаты, зертхана басшысы, Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті, Қарағанды қ., 100024, Қазақстан Республикасы, e-mail: bashirov_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1275-8989>

Брекешев Бақтияр Альвийұлы, Ақылды қалалар және ақылды жүйелер мамандығының магистранты, Ақпараттық технологиялар және инженерия мектебі, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: b.narbai27@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9200-1826>

Ережеп Дархан, PhD, Satbayev University университетінің жетекші ғылыми қызметкері, Almaty Management University жанындағы Коммерцияландыру және технологиялар орталығының директоры, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: darhan_13@physics.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

Естебек Раш Нұрдаулетұлы, «Компьютерлік ғылымдар және инженерия» мамандығы бойынша магистранты, Компьютерлік инженерия

мектебі, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 242954@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-8073-5263>

Жұмабеков Алмар Жұмағалиұлы, PhD, профессор, Информатика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: almar89-89@mail.ru

Жанатов Архат Кайратович, магистрант, «Computer Science» факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Arkhat.zhanatov.01@mail.ru

Жантлеуов Кенжебек Қожанұлы, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің доценті м.а., Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050000, e-mail: Kzhantleuov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6658-1165>

Зәкиева Жадра Ермекқызы, PhD, физика-математика пәндері мен информатика кафедрасының оқытушысы, Астана халықаралық университеті, Педагогикалық институт, Астана қ., 010017, Қазақстан Республикасы, e-mail: jadira.zakieva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9777-9943>

Зайнул Абиден Аббат, аға оқытушы, дәнекерлеу және өндірістік инженерия технологиялары кафедрасы, Кано Мемлекеттік политехникалық институты, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Зейтова Шолпан Сериковна, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, «Computer Science» факультеті, физика, математика және аспап жасау кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zeitova_sholpan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1880-6737>

Заурбекова Нурбике Джумабаевна, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Физика, математика және цифрлық технологиялар институты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Nurbikezaurbekova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4657-8989>

Ибрахим Абдуллахи, профессор, Канодағы Байеро университетінің машина жасау факультеті, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Искакова Анаргүль Батырбаевна, PhD, қауымд.профессор, «Computer Science» факультеті, физика, математика және аспап жасау кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: anar_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-8949>

Испулов Нурлыбек Айдарғалиевич, физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, «Computer Science» факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurlybek_79@mail.ru

Кайбасова Динара Женисбековна, PhD, қауымд.профессор, «Программалық инженерия мектебі», Astana IT University, Астана қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinara.kaibasova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8410-7758>

Калинин Алексей Анатольевич, PhD, бөлім меңгерушісі, Инновациялық технологиялар факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.kalinin@kstu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4699-7240>

Караджа Джелал, PhD, профессор, Ақсарай университеті, Ақсарай қ., 68100, Түркия Республикасы, e-mail: celalkaraca@aksaray.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4082-2207>

Қауанова Дилназ Әділқызы, 6В01509 «Физика–информатика» білім беру бағдарламасының 4-курс студенті, математика, физика және технология факультеті, С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., 070020, Қазақстан Республикасы, e-mail: adilqzydilnaz04@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6194-7914>

Қыдыралина Лазат Мухтаровна, PhD, доцент м.а., Физика және информатика кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: lazat_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2836-0919>

Кубенова Маржан Маликовна, PhD, «Стандарттау, сертификаттау және метрология» кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Көлік-энергетика факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: kubanova.m@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2012-2702>

Кутыбаева Айнур Ермеккалиевна, қауымд.профессор, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.kutybayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Көшкінбаев Сәулетбек Жолдықараұлы, PhD, қауымд.профессоры, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, «Мирас» университеті, Шымкент қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: koshkinbaev_s@miras.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5188-9549>

Қоштыбаев Талгат Бектасович, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті физика кафедрасының доценті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050000, e-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>

Камал Болат Әзизұлы, педагогика ғылымдарының магистрі, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті физика кафедрасының

оқытушысы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050000, e-mail: Kamal.b68@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6056-5427>

Құрбанғалиев Ұлан Бекболатұлы, педагогика ғылымдарының магистрі, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті физика кафедрасының оқытушысы, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050000, e-mail: Mr.kurbangaliyev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8811-4488>

Кутербеков Кайрат Атажанович, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасы, Физика-техникалық ғылымдар институты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: kkuterbekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5421-271X>

Құрманов Алмас Асқарұлы, физика магистрі, аға оқытушы, Торайғыров университеті, «Computer Science» факультеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: almaskurmanov@mail.ru

Құли Жансерік Тілеубердіұлы, PhD, Наноматериалдар және нанотехнологиялар бойынша докторант, Қазақстан-Британ техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, Кіші ғылыми қызметкер, «Research Group altAir nanolab», Алматы, 050043, Қазақстан Республикасы, e-mail: z.kuli@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0007-5726-7899>

Маратова Индира Маратовна, техникалық физика кафедрасының студенті, Физика-техникалық ғылымдар институты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 011000, Қазақстан Республикасы, e-mail: imaratova7@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8522-2396>

Мансурова Мадина, профессор, «Жасанды интеллект және үлкен деректер (Big Data)» кафедрасының меңгерушісі; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, 050060, Қазақстан Республикасы, e-mail: madina.mansurova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9680-2758>

Мұқаш Жанар Орманбекқызы, PhD, ассистент профессор, Білім беру және гуманитарлық ғылымдар мектебі, СДУ университеті, Қаскелең қ., 040900, Қазақстан Республикасы, e-mail: janmukash@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-7713-3925>

Муртазин Ермек, PhD, У. М. Ахмедсафин атындағы гидрогеология және геоэкология институтының жетекші ғылыми қызметкері, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ye_murtazin@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7404-4298>

Мұханова Жамал Әбдешқызы, «Ядролық физика» мамандығы бойынша докторант, Физика-техникалық ғылымдар институты, Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар халықаралық кафедрасы,

Физика-техникалық ғылымдар институты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: mukhan.zhamal@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9148-5950>

Мукашева Аяулым Жанабековна, «Физика және нанотехнологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, физика-техникалық факультеті, академик Е. А. Бөкетов атындағы Қарағанды ұлттық зерттеу университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ayaulu_jan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2771-0411>

Молдабекова Майра Саметовна, педагогика ғылымдарының докторы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасының профессоры, Алматы қ., 050040, Қазақстан Республикасы, e-mail: aaa_25.04.79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0652-0253>

Нургасымова Балжан Быржанқызы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, 8D07106-Теплоэнергетика БББ докторанты, Алматы қ., Достық, 13., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurgassymova.b@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-0917-7834>

Нүркенов Серік Амангелдіұлы, PhD, Физика математика ғылымдарын кандидаты, қауымдастырылған профессор, физика-математика пәндері мен информатика кафедрасының меңгерушісі, Педагогикалық институт, Астана Халықаралық университеті, Астана қ., 010017, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.nurkenov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7116-1520>

Сарқытов Әділхан Нуржанович, 7M01503 – «Информатика» БББ магистранты, Физика және информатика кафедрасы, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071400, Қазақстан Республикасы, e-mail: sarkytov7@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-3952-3495>

Сүле Назиф Юсуф, аға оқытушы, машина жасау департаменті, Кано мемлекеттік политехникалық институты, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Олейникова Алла Васильевна, аға оқытушы, техника ғылымдарының магистрі, Инновациялық технологиялар факультеті, Әбілқас Сағынов атындағы қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100012, Қазақстан Республикасы, e-mail: alla_ole@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6387-3568>

Ошибаева Айнаш, медицина ғылымдарының кандидаты, профилактикалық медицина кафедрасының профессоры, стратегиялық даму және ғылым жөніндегі проректор; Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, 161200, Қазақстан Республикасы, e-mail: ainash.oshibayeva@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5655-5465>

Сагир Лаван Вазир, аға оқытушы, машина жасау департаменті, Кано мемлекеттік политехникалық институты, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Сарсембаева Талшын, «Жасанды интеллект және Big Data» кафедрасының аға оқытушысы; әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050060, Қазақстан Республикасы, e-mail: talshyn.sagdatbek@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7668-2640>

Сейтханова Айнура Кусбековна, PhD, қауым.профессоры, Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, 140008, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3596-8831>

Смайлов Нуржигит Куралбаевич, PhD, профессор, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Трищенко Алексей Александрович, аспирант, Смоленск мемлекеттік университеті, Смоленск мемлекеттік бюджеттік жоғары кәсіби білім беру мекемесінің (СМБЖКБМ) «Кирилл және Мефодий» лицейі, Ресей Федерациясы, Смоленск қ., e-mail: youtriyaz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6780-2572>

Тажиев Сұлтан, PhD, У. М. Ахмедсафин атындағы гидрогеология және геоэкология институтының аға ғылыми қызметкері, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sula_tashiev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5920-7757>

Хиндату Идрис Омар, аға оқытушы, тоқыма және полимерлік технологиялар департаменті, Кано мемлекеттік политехникалық институты, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Ханов Талгат Ахматзиевич, ғылымдарының докторы, профессор, ФЗИГЗИ директоры, Қазтұтынуодағы Қарағанды университеті, Қарағанды қ., 100024, Қазақстан Республикасы, e-mail: thanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4288-699X>

Хабсихова Дильназ Жансихқызы, «Ақпараттық жүйелер және IT сала бойынша шешімдер» мамандығы бойынша магистрант, «Бизнес және цифрлық технологиялар» институты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: dilnaz.zhansikh@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6759-3211>

Шәкір Айбын, бакалавриат студенті, жас зерттеуші, «Жасанды интеллект және Big Data» кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық

университеті, Алматы қ., 040714, Қазақстан Республикасы, e-mail: 15012005sa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2605-2569>

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының докторанты, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: kidir200091@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-2585-2688>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Айтимова Ұлда Жолдасбековна, ассоц.профессор, Институт «Бизнес и цифровые технологии», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: zada@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0803-7137>

Абдуллаева Жансая Бакытжановна, докторант по специальности «Физика», Институт физики, математики и цифровых технологий, Казахский Национальный женский педагогический университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: abdullaeva.zhansaya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8282-7381>

Ақжолова Әлия Әбдірайымқызы, PhD, ассоц.профессор кафедры физики Казахского национального педагогического университета имени Абая, г. Алматы, 050000, e-mail: aaa_25.04.79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2568-503X>

Акылбекова Айман Дуйсембаевна, и.о. доцента кафедры Технической физики, институт физико-технических наук, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 011000, Республика Казахстан, e-mail: aiman88_88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1211-8877>

Алиева Молдир Ермекбаевна, магистр естественных наук, старший преподаватель кафедры физики Казахского национального педагогического университета имени Абая, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, e-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>

Адамова Айгуль Дюсенбиновна, PhD, ассоц.профессор по специальности «Вычислительная техника и программное обеспечение», Школа компьютерной инженерии, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: aigul.adamova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7773-9522>

Асембаева Мансия Кабыловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Теплофизики и технической физики Казахского национального университета имени Аль-Фараби, г. Алматы, 050040, e-mail: MAsembaeva@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2022-3888>

Ахметов Калижан Жандосович, магистрант по специальности «Школа программной инженерии», Astana IT University, г. Астана, 100000, Республика Казахстан, e-mail: 242853@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-5488-0329>

Әбдіжәлел Махаббат, магистрант 1-го курса по специальности «Управление качеством и методы, системы диагностики (по отраслям)», Казахский национальный исследовательский технический университет

имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: kanatkyzy_24@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8878-7832>

Әділбек Назым Жасұланқызы, магистрант образовательной программы «7M01504 – Физика», факультет «Математики, физики и информатики», Казахский Национальный Педагогический университет имени Абая, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан, e-mail: adilbekovva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-5640-6680>

Балапанов Малик Хамитович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Общая физика, Физический институт, Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, 450076, Российская Федерация, e-mail: balapanovmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7885-9462>

Баширов Александр Витальевич, кандидат технических наук, руководитель лаборатории, Карагандинский университет Казпотребсоюза, г. Караганда, 100024, Республика Казахстан, e-mail: bashirov_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1275-8989>

Бакранов Нурлан Болатович, PhD, Главный научный сотрудник «Research Group altAir nanolab» г. Алматы, 050043, Республика Казахстан, Главный академический сотрудник, Национальная академия наук Президенте Республики Казахстан, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: bakranov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4577-6510>

Бакранова Дина Игоревна, PhD, ассоц.профессор SDU University, Школа информационных технологий и прикладной математики, г. Каскелен, 040900, Республика Казахстан, e-mail: dinabakranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0793-9905>

Естебек Раш Нурдаулетулы, магистрант по специальности «Компьютерные науки и инженерия», Школа компьютерной инженерии, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: 242954@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-8073-5263>

Ережеп Дархан, PhD, ведущий научный сотрудник Satbayev University, директор Центра коммерциализации и технологий Almaty Management University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: darhan_13@physics.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

Жантлеуов Кенжебек Қожанович, кандидат физико-математических наук, и.о. доцента Казахского национального педагогического университета имени Абая, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, e-mail: Kzhanntleuov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6658-1165>

Жанатов Архат Кайратович, магистрант, Торайғыров университет, факультет «Computer Science», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Arkhat.zhanatov.01@mail.ru

Жумабеков Алмар Жумағалиевич, PhD, профессор, Торайғыров университет, факультет «Computer Science», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: almar89-89@mail.ru

Зайнул Абидин Аббати, ст.преподаватель, кафедра сварки и технологии изготовления изделий, Государственный политехнический институт Кано, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Зейтова Шолпан Сериковна, магистр естественных наук, ст. преподаватель, Факультет Computer Science, кафедра физики, математики и приборостроения, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: zeitova_sholpan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1880-6737>

Заурбекова Нурбике Джумабаевна, кандидат технических наук, профессор, Институт физики, математики и цифровых технологий, Казахский Национальный женский педагогический университет, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: Nurbikezaurbekova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4657-8989>

Зәкиева Жадыра Ермекқызы, PhD, преподаватель кафедры физико-математических дисциплин и информатики Педагогического института, Международный университет, г. Астана, 010017, Республика Казахстан, e-mail: jadira.zakieva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9777-9943>

Искакова Анаргүль Батырбаевна, PhD, асоц.профессор, факультет «Computer Science», кафедра физики, математики и приборостроения, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: anar_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-8949>

Испулов Нурлыбек Айдарғалиевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Торайғыров университет, факультет «Computer Science», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: nurlybek_79@mail.ru

Ибрагим Абдуллахи, профессор, Факультет машиностроения, университет Байеро в Кано, Нигерия, hod.mec@buk.edu.ng

Кайбасова Динара Женисбековна, PhD, асоц.профессор, «Школа программной инженерии», Astana IT University, г. Астана, 100000, Республика Казахстан, e-mail: dinara.kaibasova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8410-7758>

Караджа Джелал, PhD, профессор, Аксарайский университет, г. Аксарай, 68100, Турция, e-mail: celalkaraca@aksaray.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4082-2207>

Кыдыралина Лазат Мухтаровна, PhD, и.о. доцента, кафедра физики и информатики, университет Шәкәрім, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: lazat_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2836-0919>

Кутыбаева Айнур Ермеккалиевна, асоц.профессор кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.kuttybayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Коштыбаев Талгат Бектасович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Казахского национального женского педагогического университета, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, e-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>

Курбанғалиев Улан Бекболатович, магистр педагогических наук, преподаватель кафедры физики Казахского национального женского педагогического университета, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, e-mail: Mr.kurbangaliev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8811-4488>

Камал Болат Азизович, магистр педагогических наук, преподаватель кафедры физики Казахского национального педагогического университета имени **Абая, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000**, e-mail: Kamal.b68@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6056-5427>

Қауанова Дилназ Әділқызы, студентка 4 курса образовательной программы 6В01509 «Физика–информатика», Факультет математики, физики и технологий, Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, 070020, Республика Казахстан, e-mail: adilqyzydilnaz04@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6194-7914>

Калинин Алексей Анатольевич, PhD, заведующий кафедрой, Факультета инновационных технологий, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: a.kalinin@kstu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4699-7240>

Кубенова Маржан Маликовна, PhD, Преподаватель-исследователь кафедры «Стандартизация, сертификация и метрология», Транспортно-энергетический факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: kubanova.m@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2012-2702>

Кутербеков Кайрат Атажанович, доктор физико-математических наук, профессор международной кафедры «Ядерная физика, новые материалы и технологий», Институт физико-технических наук, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010008, Республика Казахстан, e-mail: kkuterbekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5421-271X>

Құли Жансерік Тілеубердіұлы, PhD, докторант по специальности «Наноматериалы и нанотехнологии», Казахстанско-Британский технический университет, Республика Казахстан, г. Алматы, 050000, Республика

Казахстан, Младший научный сотрудник, «Research Group altAir nanolab» г. Алматы, 050043, Республика Казахстан, e-mail: z.kuli@satbayev.university.kz, <https://orcid.org/0009-0007-5726-7899>

Курманов Алмас Аскарлович, магистр физики, ст.преподаватель, Торайғыров университет, факультет «Computer Science», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: almaskurmanov@mail.ru

Көшкінбаев Сәулетбек Жолдықараұлы, PhD, асоц.профессор, Казахский национальный технический университет имени К. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан, университет «Мирас», г. Шымкент, Республика Казахстан, 050013, e-mail: koshkinbaev_s@miras.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5188-9549>

Муртазин Ермек, PhD, ведущий научный сотрудник в Институте гидрогеологии и геоэкологии имени У. М. Ахмедсафина, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: ye_murtazin@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7404-4298>

Муханова Жамал Абдешкызы, докторант по специальности «Ядерная физика», Международная кафедра ядерной физики, новых материалов и технологий, Институт физико-технических наук, Евразийский национальный университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: mukhan.zhamal@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9148-5950>

Мукашева Аяулым Жанабековна, старший преподаватель кафедры «физики и нанотехнологий», Факультет физико-технический, Карагандинский национальный исследовательский университет имени Е. А. Букетова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: ayaulyjan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2771-0411>

Молдабекова Майра Саметовна, доктор педагогических наук, профессор кафедры Теплофизики и технической физики Казахского национального университета имени Аль-Фараби, г. Алматы, 050040, e-mail: aaa_25.04.79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0652-0253>

Мукаш Жанар Орманбековна, PhD, ассистент профессор, Школа образования и гуманитарных наук, университет СДУ, г. Каскелен, 040900, Республика Казахстан, e-mail: janmukash@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-7713-3925>

Маратова Индира Маратовна, студент кафедры Технической физики, институт физико-технических наук, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 011000, Республика Казахстан, e-mail: imaratova7@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8522-2396>

Мансурова Мадина, профессор, заведующая кафедрой «Искусственный интеллект и большие данные», Казахский национальный университет

имени аль-Фараби, г. Алматы, 050060, Республика Казахстан, e-mail: madina.mansurova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9680-2758>

Нуркенов Серик Амангельдинович, PhD, кандидат физико-математических наук, асоц.профессор, заведующий кафедрой физико-математических дисциплин и информатики, Педагогический институт, Международный университет, г. Астана, 010017, Республика Казахстан, e-mail: s.nurkenov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7116-1520>

Нургасымова Балжан Быржанкызы, докторант ОП 8D07106-Теплоэнергетика, Казахского национального университета имени Аль-Фараби, г. Алматы, 050000, e-mail: nurgassymova.b@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-0917-7834>

Назиф Юсуф Суле, ст.преподаватель, Факультет машиностроения, Государственный политехнический институт Кано, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Олейникова Алла Васильевна, ст.преподаватель, магистр технических наук, Факультета инновационных технологий, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100012, Республика Казахстан, e-mail: alla_ole@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6387-3568>

Ошибаева Айнаш, кандидат медицинских наук, профессор кафедры профилактической медицины, проректор по стратегическому развитию и науке; Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, 161200, Республика Казахстан; e-mail: ainash.oshibayeva@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5655-5465>

Саркытов Адильхан Нуржанович, магистрант ОП 7M01503 – «Информатика», кафедра физики и информатики, университет Шәкәрім, г. Семей, 071400, Республика Казахстан, e-mail: sarkytov7@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-3952-3495>

Сейтханова Айнура Кусбековна, PhD, асоц.профессор, Павлодарский педагогический университет имени Ә. Марғұлан, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3596-8831>

Смайлов Нуржигит Куралбаевич, PhD, профессор, доктор кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: n.smailov@satbayev.university.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Сагир Лаван Вазири, ст.преподаватель, Факультет машиностроения, Государственный политехнический институт Кано, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Сарсембаева Талшын, ст.преподаватель кафедры «Искусственный интеллект и Big Data», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 050060, Республика Казахстан, e-mail: talshyn.sagdatbek@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7668-2640>

Трищенко Алексей Александрович, аспирант, Смоленский государственный университет, СОГБОУИ Лицей имени Кирилла и Мефодия, Российская федерация, г. Смоленск, e-mail: youtriyaz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6780-2572>

Тажиев Султан, PhD, ст.научный сотрудник в институте гидрогеологии и геоэкологии имени У. М. Ахмедсафина, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: sula_tashiev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5920-7757>

Хиндату Идрис Умар, ст.преподаватель, кафедра текстильной и полимерной технологии, Государственный политехнический институт Кано, Нигерия, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Ханов Талгат Ахматзиевич, доктор юридических наук, профессор, директор НИИЭПИ, Карагандинский университет Казпотребсоюза, г. Караганда, 100024, Республика Казахстан, e-mail: thanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4288-699X>

Хабсихова Дильназ Жансикқызы, магистрант по специальности «Информационные системы и IT решения по отраслям», Институт «Бизнес и цифровые технологии», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: dilnaz.zhansikh@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6759-3211>

Шакир Айбын, студент бакалавриата, молодой исследователь кафедры «Искусственный интеллект и Big Data», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 040714, Республика Казахстан; e-mail: 15012005sa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2605-2569>

Бсырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы, докторант кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: kidir200091@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-2585-2688>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Adilbek Nazym, Master's student of the educational program «7M01504 – Physics», Faculty of Mathematics, Physics and Computer Science, The National Pedagogical University named after Abay, Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan, e-mail: adilbekovva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-5640-6680>

Akylbekova Aiman, Acting Associate Professor, Department of Technical Physics, Institute of Physical and Technical Sciences, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 011000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aiman88_88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1211-8877>

Aitimova Ulzada Zholdasbekovna, Associate Professor, Institute of «Business and Digital Technologies», Kazakh Agro Technical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: zada@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0803-7137>

Abdullayeva Zhansaya Bakytzhankyzy, Doctoral student in «Physics», Institute of Physics, Mathematics and Digital Technologies, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: abdullaeva.zhansaya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8282-7381>

Abdizhalel Makhabbat, Master's degree student (1st year) in Quality control and diagnostic methods and systems, K. I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kanatkyzy_24@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8878-7832>

Asembaeva Mansiya, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermophysics and Technical Physics of the Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, e-mail: MAsembaeva@kaznu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2022-3888>

Akzholova Aliya, PhD, Associate Professor of the Physics Department of the Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, 050000, e-mail: aaa_25.04.79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2568-503X>

Aliyeva Moldir, Master of Sciences, Senior lecturer of the Physics Department of the Abai Kazakh National Pedagogical University, Republic of Kazakhstan, Almaty, 050000, e-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>

Adamova Aigul Dyusenbinovna, Associate Professor, PhD of «Computing and Software», School of Computer Engineering, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aigul.adamova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7773-9522>

Bashirov Alexander Vitalievich, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, Karaganda University of Kazpotreboysuz, Karaganda, 100024, Republic of Kazakhstan, e-mail: bashirov_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1275-8989>

Balapanov Malik Khamitovich, Doctor of physical and mathematical sciences, professor of the Department of General Physics, Physics Institute, Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450076, Russian Federation, e-mail: balapanovmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7885-9462>

Bakranov Nurlan, PhD, Main Scientific Researcher Center «Research Group altAir nanolab», Almaty, 050043, Republic of Kazakhstan, Chief Academic Officer, National Academy of Sciences of Kazakhstan under the President of the Republic of Kazakhstan, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bakranov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4577-6510>

Bakranova Dina, PhD, Associate Professor SDU University, School of Information Technologies and Applied Mathematics, Kaskelen, 040900, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinabakranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0793-9905>

Yestebek Rash Nurdauletuly, Master's student in «Computer Science and Engineering», School of Computer Engineering, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 242954@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-8073-5263>

Yezhep Darkhan, PhD, Leading Researcher at the Satbayev University, Director of the center for commercialization and technology in Almaty Management University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: darhan_13@physics.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

Iskakova Anargul, PhD, Associate Professor, Faculty of Computer Science, Department of Physics, Mathematics and Instrument Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: anar_is@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2142-8949>

Ispulov Nurlybek Aidargalievich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Toraighyrov University, Faculty of Computer Science, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurlybek_79@mail.ru

Ibrahim Abdullahi, Professor, Department of Mechanical Engineering, Bayero University Kano, Nigeria, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Kaibassova Dinara Zhenisbekovna, PhD, Associate Professor, «School of Software Engineering», Astana IT University, Astana, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinara.kaibasova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8410-7758>

Kalizhan Akhmetov, Master's degree student in «School of Software Engineering», Astana IT University, Astana, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 242853@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-5488-0329>

Karaca Celal, PhD, Professor, Aksaray University, Aksaray, Republic of Türkiye, 68100, e-mail: celalkaraca@aksaray.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4082-2207>

Kydyralina Lazat Mukhtarovna, PhD, Associate Professor (acting), Department of Physics and Informatics, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: lazat_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2836-0919>

Kuli Zhanserik, Kazakh-British Technical University, Republic of Kazakhstan, Almaty, PhD student in Nanomaterials and Nanotechnology, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, Junior Research Fellow, Research Group altAir nanolab, Almaty, 050043, Republic of Kazakhstan, e-mail: z.kuli@satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0007-5726-7899>

Kubenova Marzhan Malikovna, PhD, Research–teacher, Department of Standardization and Certification, Faculty of Transport and Energy, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kubenova.m@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2012-2702>

Kuterbekov Kairat Atazhanovich, Doctor of physical and mathematical sciences, professor of the International Department of Nuclear Physics, new materials and technologies, Institute of Physical and Technical Sciences, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kkuterbekov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5421-271X>

Koshkinbayev Sauletbek Zholdykaraully, PhD, Associate Professor, K. Satpayev Kazakh National Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan, Miras University, Shymkent, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: koshkinbaev_s@miras.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5188-9549>

Kuttybayeva Ainur Ermekkalievna, Associate Professor, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K. I. Satbayev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.kuttybayeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Koshtybayev Talgat, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics of the Kazakh National Women's Teacher Training University, Republic of Kazakhstan, Almaty, Aiteke bi, 99, 050000, e-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>

Kamal Bolat, Master of Pedagogical Sciences, teacher of the Abai Kazakh National Pedagogical University, Republic of Kazakhstan, Almaty, 050000, e-mail: Kamal.b68@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-6056-5427>

Kurbangaliev Ulan, Master of Pedagogical Sciences, teacher of the Department of Physics of the Kazakh National Women's Teacher Training University, Republic of Kazakhstan, Almaty, 050000, e-mail: Mr.kurbangaliev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8811-4488>

Kauanova Dilnaz, 4th-year student of the educational program 6B01509 «Physics and Informatics», Faculty of Mathematics, Physics, and Technology, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, 070020, Republic of Kazakhstan, e-mail: adilqyzydilnaz04@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6194-7914>

Kalinin Alexey Anatolievich, PhD, Head of Department, Innovation Technology Faculty, Abylka Saginov Karaganda Technical university, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.kalinin@kstu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4699-7240>

Kurmanov Almas Askarovich, Master of Physics, Senior Lecturer, Toraighyrov University, Faculty of Computer Science, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almaskurmanov@mail.ru

Khabsikhova Dilnaz Zhansikhkyzy, Master's degree student in «Information systems and IT solutions by industry», Institute of «Business and Digital Technologies», Kazakh Agro Technical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: dilnaz.zhansikh@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6759-3211>

Khanov Talgat Akhmatzievich, Doctor of Law Sciences, Professor, Director of NIIPI, Karaganda University of Kazpotrebo soyuz, Karaganda, 100024, Republic of Kazakhstan, e-mail: thanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4288-699X>

Oleynikova Alla Vasilievna, Senior lecturer, Master of Engineering Sciences, Innovation Technology Faculty, Abylka Saginov karaganda technical university, Karaganda, 100012, Republic of Kazakhstan, e-mail: alla_ole@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6387-3568>

Oshibayeva Ainash, Candidate of Medical Sciences, Professor of the Department of Preventive Medicine, Vice Rector for Strategic Development and Science; Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, 161200, Republic of Kazakhstan; e-mail: ainash.oshibayeva@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-5655-5465>

Maratova Indira Maratovna, Student of the Department of Technical Physics, Institute of Physical and Technical Sciences, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 011000, Republic of Kazakhstan, e-mail: imaratova7@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-8522-2396>

Mansurova Madina, Professor, Head of the Department of «Artificial Intelligence and Big Data», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty,

050060, Republic of Kazakhstan, e-mail: madina.mansurova@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9680-2758>

Murtazin Yermek, PhD, leading researcher at the Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U. M. Akhmedsafin, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ye_murtazin@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7404-4298>

Mukhanova Zhamal Abdeshkyzy, Doctoral student in «Nuclear Physics», International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, Institute of Physical and Technical Sciences, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: mukhan.zhamal@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9148-5950>

Mukasheva Ayaulym Zhanabekovna, Senior Lecturer of the Department of Physics and Nanotechnology, Faculty of Physics and Technology, Karaganda Buketov National Research University, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ayaulym_jan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2771-0411>

Moldabekova Maira, Doctor of pedagogical sciences, professor of the Department of Thermophysics and Technical Physics of the Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, e-mail: aaa_25.04.79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0652-0253>

Mukash Zhanar, PhD, Assistant Professor, School of Education and Humanities, SDU University, Kaskelen 040900, Republic of Kazakhstan, e-mail: janmukash@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-7713-3925>

Nurgassymova Balzhan, Student of the Educational Program 8D07106-Thermal Power engineering, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050040, e-mail: nurgassymova.b@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-0917-7834>

Nurkenov Serik, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Physical and Mathematical Sciences and Informatics, Pedagogical Institute, Astana International University, Astana, 010017, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.nurkenov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7116-1520>

Nazif Yusuf Sule, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Kano State Polytechnic, Nigeria, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Sarkytov Adilkhan Nurzhanovich, Master's student in the educational program 7M01503-«Informatics», Department of Physics and Informatics, Shakarim University, Semey, 071400, Republic of Kazakhstan, e-mail: sarkytov7@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-3952-3495>

Sagir Lawan Waziri, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Kano State Polytechnic, Nigeria, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Smailov Nurzhigit Kuralbaevuch, PhD, Professor, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K. I. Satbayev, Republic of Kazakhstan,

Almaty, 050013, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Seitkhanova Ainur Kusbekovna, PhD, Associate Professor, A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3596-8831>

Sarsembayeva Talshyn, Senior Lecturer of the Department of «Artificial Intelligence and Big Data», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan; e-mail: talshyn.sagdatbek@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7668-2640>

Shakir Aibyn, Bachelor's student, young researcher of the Department of «Artificial Intelligence and Big Data», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 040714, Republic of Kazakhstan, e-mail: 15012005sa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-2605-2569>

Trishchenkov Alexey Alexandrovich, PhD student, Smolensk State University, Smolensk State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education (SSBEIHPE) «Cyril and Methodius» Lyceum Russian Federation, Smolensk, e-mail: youtriyaz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-6780-2572>

Tazhiyev Sultan, PhD, Senior Researcher at the Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U. M. Akhmedsafin, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sula_tashiev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5920-7757>

Hindatu Idris Umar, Senior Lecturer, Department of Textile and Polymer Technology, Kano State Polytechnic, Nigeria, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Yssyraiyl Kydyrali Musakhanuly, Doctoral Student of Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K. I. Satbayev, Republic of Kazakhstan, Almaty, 050013, e-mail: [kdir200091@gmail.com](mailto:kidir200091@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0004-2585-2688>

Zakiyeva Zhadyra, PhD, Lecturer of the Department of Physical and Mathematical Sciences and Informatics, Pedagogical Institute, Astana International University, Astana, 010017, Republic of Kazakhstan, e-mail: jadira.zakieva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9777-9943>

Zainul Abideen Abbati, Senior Lecturer, Department of Welding and Fabrication Engineering Technology, Kano State Polytechnic, Nigeria, e-mail: hod.mec@buk.edu.ng

Zhumabekov Almar Zhumagalievich, PhD, Professor, Faculty of Computer Science, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: almar89-89@mail.ru

Zhanatov Arkhat Kairatovich, Master's student, Toraighyrov University, Faculty of Computer Science, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: Arkhat.zhanatov.01@mail.ru

Zhantleuov Kenzhebek, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics and Mathematical Modelling of the Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050000, e-mail: Kzhantleuov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6658-1165>

Zaurbekova Nurbike Jumabaevna, Candidate of Technical Sciences, professor, Institute of Physics, Mathematics and Digital Technologies, Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Nurbikezaurbekova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4657-8989>

Zeitova Sholpan, Master of Science, Senior Lecturer, Faculty of Computer Science, Department of Physics, Mathematics and Instrument Engineering, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: zeitova_sholpan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1880-6737>

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ
«ВЕСТНИК ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА.
СЕРИЯ: ФИЗИКА, МАТЕМАТИКА И
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ»**

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

* В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.

* Количество соавторов одной статьи не более 5.

* Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 % (согласно решению редакционной коллегии).

* Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.

* Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.

* Двойное рецензирование (слепое) проводится конфиденциально, автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.

* Квитанция об оплате предоставляется после принятия статей к публикации. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге.

* докторантам НАО «Торайғыров университет» и иностранным авторам (без казахстанских соавторов) публикация в журнале бесплатно.

* Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензирования 1 раз. Ответственность за содержание статьи несет автор.

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления. Журнал формируется исходя из количества не более 30 статей в одном номере.

Периодичность издания журналов – 4 раза в год (ежеквартально).

Сроки подачи статьи:

- первый квартал до 10 февраля;
- второй квартал до 10 мая;
- третий квартал до 10 августа;
- четвертый квартал до 10 ноября.

Научный журнал «Вестник Торайғыров университета», «Наука и техника Казахстана» выпускается с периодичностью 4 раза в год в сетевом (электронном) формате в следующие установленные сроки выхода номеров журнала:

- первый номер выпускается до 30 марта текущего года;
- второй номер – до 30 июня;
- третий номер – до 30 сентября;
- четвертый номер – до 30 декабря.

Статью (электронную версию и квитанции об оплате) следует направлять на сайтах:

- <https://vestnik.tou.edu.kz/>
- <https://vestnik-pm.tou.edu.kz/>

Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

Автор, который внес наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и обозначается «*».

Авторы из разных учебных заведений указываются цифрами ^{1,2}.

Для осуществления процедуры двойного рецензирования (слепого), авторам необходимо отправлять два варианта статьи: первый – с указанием личных данных, второй – без указания личных данных. При нарушении принципа слепого рецензирования статья не рассматривается.

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, в электронном варианте со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для Windows» (в форматах .doc, .docx, .rtf).

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы должен составлять **не менее 7 и не более 12 страниц печатного текста**. Поля страниц – 30 мм со всех сторон листа; Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).

Структура научной статьи включает название, аннотация, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список использованных источников (литературы) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.

Статья должна содержать:

1. **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2. **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3. **Инициалы** (имя, отчество) **Фамилия** автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках (жирным шрифтом, по центру);

Автор, который внес наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и обозначается «*».

Авторы из разных учебных заведений указываются цифрами^{1,2}.

4. **Аффилиация** (организация (место работы (учебы)), страна, город) – на казахском, русском и английском языках. Полные данные об аффилиации авторов представляются в конце журнала;

5. **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность (не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий);

6. **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (рекомендуемый объем аннотации на языке публикации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец);

7. **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования (оформляются на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.). Рекомендованное количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке (см. образец);

8. **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- **Введение** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов). Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании** (при наличии) (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).

- **Выводы** (абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов).

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников** (жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре) включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 (см. образец).

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. *Объем не менее 10, не более чем 20 наименований* (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки), преимущественно за последние 10–15 лет.

В случае наличия в списке использованных источников работ на кириллице (на казахском и русском языках), необходимо представить список литературы в двух вариантах: 1) в оригинале (указываются источники на русском, казахском и английском либо немецком языках); 2) романизированный вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках), то есть транслитерация латинским алфавитом. см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) *Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Онлайн сервис Транслитерация по ГОСТу – <https://transliteration-online.ru/>

Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом: автор(-ы) (транслитерация либо англоязычный вариант при его наличии) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название при его наличии) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

• **Иллюстрации, перечень рисунков** и подрисуночные надписи к ним представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

• **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)

В электронном варианте приводятся **полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail** (номера телефонов для связи редакции с авторами, не публикуются);

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

ОБРАЗЕЦ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

МРНТИ 04.51.59

DOI xxxxxxxxxxxxxxx

С. К. Антикеева*, С. К. Ксембаева

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ

В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомым компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.

Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.

Введение

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

- 1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.
- 2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХКИППК ПК, 2001. – 152 с.
- 3 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.
- 4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

- 5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университеті, 2015. – 246 с.
- 6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.
- 7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.
- 8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование: монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.
- 9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.
- 10 **Арын, Е. М., Пфайфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиСим. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

- 1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie: suschnost, effektivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogу. – 2003. – № 4. – P. 22.
- 2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitie metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.
- 3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod k ecologicheskomu obrazovaniyu i vospitaniyu (Na materiale selskih shkol) [The systematic approach to environmental education and upbringing (Based on the material of rural schools)] [Text] – Minsk, 1994. – 212 p.
- 4 **Shtoff, V. A.** Rol modelei v poznanii [The role of models in cognition] [Text] – L. : LGU, 1963. – 128 p.
- 5 **Taubayeva, Sh.** Metodologiya i metodika didakticheskogo issledovaniya : uchebnoe posobie [Methodology and methods of educational research : a tutorial] [Text] – Almaty : Kazak University, 2015. – 246 p.
- 6 **Dahin, A. N.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovaniya [Modeling the competence of open education participants] [Text] – Moscow : NII shkolnyh tehnologii, 2009. – 290 p.
- 7 **Dahin, A. N.** Modelirovanie v pedagogike [Modeling in pedagogy] [Text]. In Idei i idealy. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – P. 11–20.

- 8 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : monographia [Pedagogical modeling : monograph] [Text]. – Novosibirsk : Izd-vo NIPKiPRO, 2005. – 230 p.
- 9 **Aubakirova, S. D.** Formirovaniye deontologicheskoi gotovnosti buduschih pedagogov k rabote v usloviyah inklusivnogo obrazovaniya : dissertaciya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D010300 – Pedagogika i psihologiya. [Formation of deontological readiness of future teachers to work in inclusive education : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D010300- Pedagogy and psychology] [Text] – Pavlodar, 2017. – 162 p.
- 10 **Aryn, E. M., Pfeifer, N. E., Burdina, E. I.** Teoreticheskie aspekty professionalnoi podgotovki pedagoga XXI veka : ucheb. posobie [Theoretical aspects of professional training of a teacher of the XXI century : textbook] [Text] – Pavlodar : PGU im. S. Toraiyrov PSU; St.Petersburg. : GAFKiS im. P. F. Lesgafta, 2005. – 270 p.

С. К. Антикеева, С. К. Ксембаева*
Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

БІЛІКТІЛІКТІ АРТТЫРУ КУРСТАРЫ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ ҚҰЗІРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзіреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзіреттілігін қалыптастырудың теориялық моделі ұсынылған. Мақалада модельдеу процесінің педагогикалық аспектілері, педагогикалық модельдеудің кезеңдері келтірілген. Модельдің әдіснамалық, процессуалдық (технологиялық) және аспаптық деңгейлері, оның мақсаты, қажетті құзыреттердің қалыптасу мониторингі, сондай-ақ нәтижесі ұсынылған. Модельде құзыреттілікке, тұлғаға бағытталған және практикаға бағытталған педагогикалық тәсілдер, таңдалған құзыреттерді қалыптастыру заңдылықтары, қағидаттары, шарттары көрсетілген; қалыптасу процесін іске асыру кезеңдері, жеке және кәсіби құзыреттердің қалыптасу деңгейлері сипатталған. Практикалық дайындық бөлімінде тыңдаушы-оқытушы-топ жүйесінде интерактивті жұмыс ұсынылады, ол әр маманның жеке қатысуын, сондай-ақ елімізде алғашқы «кәсіби әлеуметтік қызметкерлердің ұлттық альянсы» республикалық қоғамдық бірлестігінің ашылуын білдіреді. Бұл модель

әлеуметтік қызметкерлердің жеке және кәсіби құзыреттерін одан әрі жетілдіруді және тәуелсіз дамытуды білдіреді. Бұл модельде біліктілікті арттыру курстарын іске асырудың тиімділігін, жұмыс нысандары, әдістері мен құралдарын көруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: теориялық модель, құзыреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.

S. K. Antikeyeva*, S. K. Ksembaeva
Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES

This article presents a theoretical model for the formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, which was developed in the framework of the doctoral dissertation «Formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses». The article presents the pedagogical aspects of the modeling process itself, and lists the stages of pedagogical modeling. The methodological, procedural (technological) and instrumental levels of the model, its purpose, monitoring the formation of the required competencies, as well as the result are presented. The model shows competence-based, personality-oriented and practice-oriented pedagogical approaches, patterns, principles, conditions for the formation of selected competencies; describes the stages of the formation process, the levels of formation of personal and professional competencies. The practical training section offers interactive work in the listener-teacher-group system, which implies the personal participation of each specialist, as well as the opening of the first Republican public Association in our country, the national Alliance of professional social workers. This model implies further improvement and independent development of personal and professional competencies of social workers. This allows you to see in the model the effectiveness of the implementation of advanced training courses, forms, methods and means of work.

Keywords: theoretical model, competencies, professional development, social workers.

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Антикеева Самал Канатовна «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант Торайғыров университеті, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология», Торайғыров университет, Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology», Toraighyrov University, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

**ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА
В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ
«ВЕСТНИК ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА»
СЕРИЯ: ФИЗИКА, МАТЕМАТИКА И
КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ»**

Редакционная коллегия научных журналов НАО «Торайғыров университет» «Вестник Торайғыров университета», «Наука и техника Казахстана» и научно-популярного журнала «Краеведение» в своей профессиональной деятельности придерживаются принципов и норм Публикационной этики научных журналов НАО «Торайғыров университет». Публикационная этика разработана в соответствии с международной публикационной этической нормой Комитета по публикационной этике (COPE), этическими принципами публикации журналов Scopus (Elsevier), Кодекса академической честности НАО «Торайғыров университет».

Публикационная этика определяет нормы, принципы и стандарты этического поведения редакторов, рецензентов и авторов, меры по выявлению конфликтов интересов, неэтичного поведения, инструкции по изъятию (ретракции), исправлению и опровержению статьи.

Все участники процесса публикации, соблюдают принципы, нормы и стандарты публикационной этики.

Качество научного журнала обеспечивается исполнением принципов участников процесса публикации: равенства всех авторов, принцип конфиденциальности, однократные публикации, авторства рукописи, принцип оригинальности, принцип подтверждения источников, принцип объективности и своевременности рецензирования.

Права и обязанности членов редакционных коллегий научных журналов НАО «Торайғыров университет» «Вестник Торайғыров университета», «Наука и техника Казахстана» и научно-популярного журнала «Краеведение» определены СО СМК 8.12.3-20 Управление научно-издательской деятельностью.

Права и обязанности рецензентов

Рецензенты научных журналов «Вестник Торайғыров университета», «Наука и техника Казахстана», научно-популярного журнала «Краеведение», обязаны руководствоваться принципом объективности.

Персональная критика в адрес автора(-ов) рукописи недопустима. Рецензент должен аргументировать свои замечания и обосновывать свое решение о принятии рукописи или о ее отклонении.

Национальность, религиозная принадлежность, политические или иные взгляды автора(-ов) не должны приниматься во внимание и учитываться в процессе рецензирования рукописи рецензентом(-ами).

Экспертная оценка, составленная рецензентом должна способствовать принятию решения редакцией о публикации и помогать автору улучшить рукопись.

Решение о принятии рукописи к публикации, возвращение работы автору на изменение или доработку, либо решение об отклонении от публикации принимается редколлегией опираясь на результаты рецензирования.

Принцип своевременности рецензирования. Рецензент обязан предоставить рецензию в срок, определенный редакцией, но не позднее 2-4 недель с момента получения рукописи на рецензирование. Если рассмотрение статьи и подготовка рецензии в назначенные сроки невозможны, то рецензент должен незамедлительно уведомить об этом научного редактора.

Рецензент, который считает, что его квалификация не соответствует либо недостаточна для принятия решения при рецензировании предоставленной рукописи должен незамедлительно сообщить об этом научному редактору и отказаться от рецензирования рукописи.

Принцип конфиденциальности со стороны рецензента. Рукопись, предоставленная рецензенту на рецензирование должна рассматриваться как конфиденциальный материал. Рецензент имеет право демонстрировать ее и/или обсуждать с другими лицами только после получения письменного разрешения со стороны научного редактора журнала и/или автора(-ов).

Информация и идеи научной работы, полученные в ходе рецензирования и обеспечения публикационного процесса, не должны быть использованы рецензентом(-ами) для получения личной выгоды.

Принцип подтверждения источников. Рецензент должен указать научные работы, которые оказали бы влияние на исследовательские результаты рассматриваемой рукописи, но не были приведены автором(-ами). Также рецензент обязан обратить внимание научного редактора на значительное сходство или совпадение между рассматриваемой рукописью и ранее опубликованной работой, о котором ему известно.

Если у рецензента имеются достаточные основания полагать, что в рукописи содержится плагиат, некорректные заимствования, ложные и сфабрикованные материалы или результаты исследования, то он не должен допустить рукопись к публикации и проинформировать научного редактора журнала о выявленных нарушениях принципов, стандартов и норм публикационной и научной этики.

Права и обязанности авторов

Публикационная этика базируется на соблюдении принципов:

Однократность публикации. Автор(-ы) гарантируют что представленная в редакцию рукопись статьи не была представлена для рассмотрения в другие издания. Представление рукописи одновременно в нескольких журналах/изданиях неприемлемо и является грубым нарушением принципов, стандартов и норм публикационной этики.

Авторство рукописи. Лицо, которое внесло наибольший интеллектуальный вклад в подготовку рукописи (при двух и более соавторах), является автором-корреспондентом и указывается первым в списке авторов.

Для каждой статьи должен быть назначен автор для корреспонденции, который отвечает за подготовку финальной версии статьи, коммуникацию с редколлекцией, должен обеспечить включение всех участников исследования (при количестве авторов более одного), внесших в него достаточный вклад, в список авторов, а также получить одобрение окончательной версии рукописи от всех авторов для представления в редакцию для публикации. Все авторы, указанные в рукописи/статье, несут ответственность за содержание работы.

Принцип оригинальности. Автор(-ы) гарантирует, что результаты исследования, изложенные в рукописи, представляют собой оригинальную самостоятельную работу, и не содержат некорректных заимствований и плагиата, которые могут быть выявлены в процессе.

Авторы несут ответственность за публикацию статей с признаками неэтичного поведения, плагиата, самоплагиата, самоцитирования, фальсификации, фабрикация, искажения данных, ложного авторства, дублирования, конфликта интересов и обмана.

Принцип подтверждения источников. Автор(ы) обязуется правильно указывать научные и иные источники, которые он(и) использовал(и) в ходе исследования. В случае использования каких-либо частей чужих работ и/или заимствования утверждений другого автора(-ов) в рукописи должны быть указаны библиографические ссылки с указанием автора(-ов) первоисточника. Информация, полученная из сомнительных источников не должна использоваться при оформлении рукописи.

В случае, если у рецензентов, научного редактора, члена(-ов) редколлекции журнала возникают сомнения подлинности и достоверности результатов исследования, автор(-ы) должны предоставить дополнительные материалы для подтверждения результатов или фактов, приводимых в рукописи.

Исправление ошибок в процессе публикации. В случае выявления ошибок и неточностей в работе на любой стадии публикационного процесса авторы обязуются в срочном порядке сообщить об этом научному редактору и оказать помощь в устранении или исправлении ошибки для публикации

на сайте журнала соответствующей коррекции (Erratum или Corrigendum) с комментариями. В случае обнаружения грубых ошибок, которые невозможно исправить, автор(-ы) должен(-ны) отозвать рукопись/статью.

Принцип соблюдения публикационной этики. Авторы обязаны соблюдать этические нормы, связанные с критикой или замечаниями в отношении исследований, а также в отношении взаимодействия с редакцией по поводу рецензирования и публикации. Несоблюдение этических принципов авторами расценивается как грубое нарушение этики публикаций и дает основание для снятия рукописи с рецензирования и/или публикации.

Конфликт интересов

Конфликт интересов, по определению Комитета по публикационной этике (COPE), это конфликтные ситуации, в которых авторы, рецензенты или члены редколлекции имеют неявные интересы, способные повлиять на их суждения касательно публикуемого материала. Конфликт интересов появляется, когда имеются финансовые, личные или профессиональные условия, которые могут повлиять на научное суждение рецензента и членов редколлекции, и, как результат, на решение редколлекции относительно публикации рукописи.

Главный редактор, член редколлекции и рецензенты должны оповестить о потенциальном конфликте интересов, который может как-то повлиять на решение редакционной коллегии. Члены редколлекции должны отказаться от рассмотрения рукописи, если они состоят в каких-либо конкурентных отношениях, связанных с результатами исследования автора(-ов) рукописи, либо если существует иной конфликт интересов.

При подаче рукописи на рассмотрение в журнал, автор(-ы) заявляет о том, что в содержании рукописи указаны все источники финансирования исследования; также указывают, какие имеются коммерческие, финансовые, личные или профессиональные факторы, которые могли бы создать конфликт интересов в отношении поданной на рассмотрение рукописи. Автор(ы), в письме при наличии конфликта интересов, могут указать ученых, которые, по их мнению, не смогут объективно оценить их рукопись.

Рецензент не должен рассматривать рукописи, которые могут послужить причинами конфликта интересов, проистекающего из конкуренции, сотрудничества или других отношений с кем-либо из авторов, имеющих отношение к рукописи.

В случае наличия конфликта интересов с содержанием рукописи, ответственный секретарь должен известить об этом главного редактора, после чего рукопись передается другому рецензенту.

Существование конфликта интересов между участниками в процессе рассмотрения и рецензирования не значит, что рукопись будет отклонена.

Всем заинтересованным лицам необходимо, по мере возможности избегать возникновения конфликта интересов в любых вариациях на всех этапах публикации. В случае возникновения какого-либо конфликта интересов тот, кто обнаружил этот конфликт, должен незамедлительно оповестить об этом редакцию. То же самое касается любых других нарушений принципов, стандартов и норм публикационной и научной этики.

Неэтичное поведение

Неэтичным поведением считаются действия авторов, редакторов или издателя, в случае самостоятельного предоставления рецензии на собственные статьи, в случае договорного и ложного рецензирования, в условиях обращения к агентским услугам для публикации результатов научного исследования, лжеавторства, фальсификации и фабрикация результатов исследования, публикация недостоверных псевдо-научных текстов, передачи рукописи статей в другие издания без разрешения авторов, передачи материалов авторов третьим лицам, условия когда нарушены авторские права и принципы конфиденциальности редакционных процессов, в случае манипуляции с цитированием, плагиатом.

Теруге 01.03.2026 ж. жіберілді. Басуға 31.03.2026 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа
7,50 Mb RAM

Шартты баспа табағы 20,08. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс № 4521

Сдано в набор 01.03.2026 г. Подписано в печать 31.03.2026 г.

Электронное издание
7,50 Mb RAM

Усл.печ.л. 20,08. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка Е. Е. Калихан
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4521

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университеті» КЕ АҚ
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
«Торайғыров университеті» КЕ АҚ
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
+7(718)267-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik.tou.edu.kz
<https://vestnik-pm.tou.edu.kz/>