

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

№ 2 (2026)
Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА
Серия: Физика, математика и компьютерные науки

СВИДЕТЕЛЬСТВО
Тематическая направленность Подписной индекс – 76208

Бас редакторы – главный редактор *д.ф.-м.н., профессор* *PhD*
доктор Редакция алқасы – Редакционная коллегия *Esref Adali* *доктор*
PhD, профессор (Турция);

<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>Жумадиллаева 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>Шокубаева З. Ж.</i>	<i>(технический редактор)</i>

МАЗМҰНЫ

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

Агитаев И. А., Найманова Д. С.

Статистическая оценка эффективности системы распознавания объектов на основе нейронной сети YOLOV8

Aitbekov B., Zhartybayeva M.

LSTM-based forecasting in volatile and data-scarce environments

Bakytzhan A., Kaibassova D.

A dataset of kazakh handwritten characters

Khan S. V., Aliyev Y. N.

Class prototype alignment through optimal transport of barycenters for unsupervised domain adaptation

Маликова Ф. У., Шинов В. А.

Обеспечение неизменности данных в децентрализованных системах на базе WEB3

Nadirov N. K., Taubakabyl N. M.

Modular Web platform architecture for machine learning-based flood forecasting in Kazakhstan regions

Рымғалиев Ә. Е., Токжигитова Н. К., Рымғалиева Ә. Е.

Пайдаланушыларға қызмет көрсету тиімділігін арттыру үшін Web-сайт функционалына жасанды интеллектті интеграциялау

Smailov N., Kengesbayeva S., Zhamangarin D., Baqytqali A.

Modeling and analysis of the performance of c-ran architecture in 5G networks

Татенов А. А., Оспанова Н. Н.

Жасанды интеллект едістеріне негізделген «Медициналық кеңесші» қосымшасын өзірлеу

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

**Бакранова Д. И., Абдылдаева Н. Е., Рахымбай Л. С.,
Шабдан Е., Идрисова Т. К.**

Удельная поверхностная скорость удаления как универсальная метрика оценки фотокаталитической очистки воздуха

**Батешов Е. А., Ибатаев Ж. А., Жукенов М. К.,
Хамзина Б. Е. Хуанбай Е.**

Ретроспективная проверка гравитационно-инерционной методики Субханкулова прогноза землетрясений Алматы

**Жумабекова В. Н., Ержан Б.,
Оразмұхамет Н. Н., Кувандиқова А. С.**

Әлсіз өзара әрекеттесулердегі жұптылықтың сақталмауын зерттеу

**Касенова Т. К., Бештаева Р. А., Дүйсебаева Г. К.,
Егемберді Ш. Қ., Айтказина А. М.**

Стратификацияланған сұйықтықтағы ішкі толқындардың
стационар емес теориясы

**Kulikov A. A., Zhumabekov A. Zh., Ispulov N. A.,
Kissabekova A. A., Abdul Kadir Rahmoon**

Investigation of the performance of a photovoltaic system using a boost
converter in environments with dynamic shading

Қоштыбаев Т. Б., Алиев Ш., Жавлиева А. Т., Алиева М. Е.

Өрістер теориясының лагранждық формализміне
Ковариантты-геометриялық көзқарас

**Опахай С., Бекмырза К. Ж., Сырлыбекқызы С.,
Койшина А. И., Пангалиев Е.**

Платина катализаторлары негізінде мембраналық-электродтық
блоктың сипаттамаларын зерттеу

**Оспанова Ж. Д., Акилбеков А. Т., Карипбаев Ж. Т.,
Аралбаева Г. М., Какимов А. Б.**

Рентгеноструктурное исследование монокристаллов
TiO₂ после облучения K_g ионами

Рахадиллов Б. Қ., Сейтханова А. К., Кәкімжанов Д. Н., Мұрал А.

Влияние параметров детонационного напыления на морфологию и
фазовый состав оксидных покрытий CR₂O₃

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

**Akzholova A. A., Kossov V. N., Moldabekova M. S.,
Rimantas Z., Sakibayeva B. R.**

Developing research competencies of future physics teachers

Даниярова Ж. К., Сарбасова Н. Д., Бокаева М. С.

Мектеп-лицейдің 11-сыныбына арналған «Дифференциалдық теңдеулер»
тақырыбы бойынша жиынтық бағалау үшін есептер құрастыру әдістемесі

Тайболдина Қ. Р., Оспанова Д. М. Сыдықова А. Р., Асқар Ш. Ұ.

Олимпиадалық есептер арқылы дарынды оқушылардың логикалық
ойлауын дамытудың әдістемелік моделі

Авторлар туралы ақпарат
Информация об авторах
Information about the authors

Авторларға арналған ережелер
Правила для авторов
Rules for authors

Жарияланым этикасы
Публикационная этика
Publication ethics

«КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАР» СЕКЦИЯСЫ

МРНТИ 28.23.15

DOI

***И. А. Агимаев¹, Д. С. Найманова²**

^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8655-7183>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4434-4852>

*e-mail: colesattac@gmail.com

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ YOLOV8

В статье представлены результаты оценки эффективности системы распознавания объектов Vision Assist, разработанной для помощи людям с нарушением зрения. Целью исследования являлся сравнительный анализ пяти вариантов нейронной сети семейства YOLOv8 (YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x) по критериям скорости обработки и потребления вычислительных ресурсов. Тестирование проводилось на специализированном стенде с процессором AMD Ryzen 5 5600X и видеокартой Nvidia GeForce RTX 3070. В качестве метрик оценки использовались частота кадров (FPS), время инференса (мс) и количество параметров модели. По результатам тестирования установлено, что модель YOLOv8n демонстрирует наивысшую производительность (FPS – 77,5, время инференса – 12,9 мс), тогда как модель YOLOv8s обеспечивает оптимальный баланс между скоростью и точностью. Тяжёлые модели (YOLOv8l, YOLOv8x) признаны непригодными для применения на мобильных устройствах в режиме реального времени. Дополнительно представлена теоретическая оценка производительности на конфигурации начального уровня с RTX 3050 8 ГБ на основе публично доступных сравнительных характеристик GPU. На основании полученных результатов модель YOLOv8s выбрана в качестве основы системы Vision Assist.

Ключевые слова: распознавание объектов, YOLOv8, нейронная сеть, оценка эффективности, FPS, время инференса, слабовидящие.

Введение

Проблема обеспечения самостоятельности людей с нарушением зрения при ориентировании в окружающей среде остаётся одной из актуальных задач современных ассистивных технологий. По данным Всемирной организации здравоохранения, в мире насчитывается более 2,2 миллиарда человек с нарушениями зрения различной степени тяжести, из которых не менее 1 миллиарда случаев можно было предотвратить или они остаются недостаточно коррективными [1]. Значительная часть этих людей испытывает серьёзные трудности при распознавании окружающих объектов, чтении текстов и самостоятельном перемещении в незнакомой обстановке.

Развитие методов глубокого обучения и компьютерного зрения открыло принципиально новые возможности для создания ассистивных систем, способных в режиме реального времени анализировать визуальную среду и предоставлять пользователю голосовую обратную связь. Первые системы подобного рода, такие как VizWiz, показали принципиальную применимость методов компьютерного зрения в задачах помощи слабовидящим [2]. Однако существующие коммерческие решения – Microsoft Seeing AI, Google Lookout, Envision AI – обладают рядом существенных ограничений: зависимость от стабильного интернет-соединения, высокая стоимость, отсутствие поддержки казахского и русского языков, закрытость архитектуры, не позволяющая адаптировать систему под нужды конкретной аудитории [2].

В рамках настоящего исследования разработана система Vision Assist – Progressive Web Application (PWA) с открытой архитектурой на базе нейронной сети YOLOv8, ориентированная на русско- и казахскоязычную аудиторию. Семейство YOLOv8 представляет актуальное поколение одноэтапных детекторов объектов, сочетающих высокую скорость инференса с конкурентоспособной точностью распознавания [3]. При этом выбор конкретной версии модели из данного семейства непосредственно определяет ключевые эксплуатационные характеристики системы. Более тяжёлые модели обеспечивают более высокую точность за счёт большей ёмкости, однако требуют значительно больших вычислительных ресурсов, что может сделать их неприменимыми на мобильных устройствах без специализированного аппаратного ускорения [4].

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа производительности пяти вариантов архитектуры YOLOv8 по критериям скорости обработки и ресурсоёмкости, а также теоретическая оценка применимости выбранной модели на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Материалы и методы

Теоретические основы оценки производительности детекторов объектов. Оценка производительности систем детекции объектов в реальном времени предполагает анализ двух взаимосвязанных групп характеристик: метрик качества распознавания и метрик вычислительной эффективности. К первой группе относятся precision (точность), recall (полнота) и производная от них метрика Average Precision (AP), а также агрегированная метрика mean Average Precision (mAP) [5]. Ко второй группе относятся частота кадров (FPS), время инференса и потребление вычислительных ресурсов.

Метрика precision определяет долю истинно положительных срабатываний среди всех положительных предсказаний модели и вычисляется как отношение числа истинно положительных предсказаний к сумме истинно положительных и ложно положительных. Метрика recall определяет долю обнаруженных объектов среди всех объектов в наборе данных и равна отношению числа истинно положительных предсказаний к сумме истинно положительных и ложно отрицательных [5]. Между precision и recall существует фундаментальный компромисс: повышение порога достоверности увеличивает точность, но снижает полноту, и наоборот. Кривая Precision-Recall графически отображает этот компромисс для различных значений порога, а площадь под данной кривой – Average Precision – служит интегральной мерой качества детектора для конкретного класса объектов.

Метрика mAP вычисляется как среднее значение AP по всем классам объектов. В зависимости от порога IoU (Intersection over Union), применяемого при определении истинно положительных срабатываний, различают mAP@50 (IoU $\geq 0,5$) и mAP@50-95, усредняющую результаты по диапазону порогов от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05 [5]. Последняя метрика является более строгой и в большей степени отражает качество локализации объектов.

Вычислительная эффективность детектора характеризуется временем инференса – средним временем обработки одного изображения, включая препроцессинг, прямой проход через сеть и постпроцессинг (применение алгоритма Non-Maximum Suppression). Частота кадров FPS является обратной величиной ко времени инференса и непосредственно характеризует пригодность детектора для работы в реальном времени. Согласно устоявшейся практике в области компьютерного зрения, значение FPS не менее 24 считается достаточным для плавной обработки видеопотока, а значение FPS свыше 30 – комфортным для интерактивных приложений [6]. При развёртывании детектора на мобильных устройствах критически важным параметром также является объём потребляемой видеопамати,

поскольку мобильные GPU располагают существенно меньшими ресурсами по сравнению с серверными ускорителями [7].

Тестирование моделей семейства YOLOv8 проводилось на специализированном стенде, конфигурация которого представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики тестового стенда

Компонент	Характеристика
Процессор	AMD Ryzen 5 5600X (6 ядер, 12 потоков, 3.7–4.6 ГГц)
Оперативная память	32 ГБ DDR4 (3200 МТ/с)
Видеокарта	Nvidia GeForce RTX 3070 (8 ГБ GDDR6)
CUDA	Версия 11.8
PyTorch	Версия 2.7.1+cu118

Использование видеокарты Nvidia GeForce RTX 3070 с поддержкой CUDA 11.8 обеспечивало аппаратное ускорение вычислений через технологию CUDA (Compute Unified Device Architecture), позволяющую выполнять операции глубокого обучения на тысячах параллельных вычислительных ядер GPU [8]. Фреймворк PyTorch версии 2.7.1 обеспечивал автоматическое управление вычислительным графом и оптимизированные реализации операций глубокого обучения.

Описание исследуемых моделей. Для тестирования использовались пять официальных предобученных моделей семейства YOLOv8: YOLOv8n (nano), YOLOv8s (small), YOLOv8m (medium), YOLOv8l (large) и YOLOv8x (extra-large). Все модели были предобучены на наборе данных COCO (Common Objects in Context), содержащем более 330 тысяч изображений с разметкой 80 классов объектов повседневной среды [9]. Набор данных COCO является международным стандартом для оценки детекторов объектов и обеспечивает воспроизводимость результатов между различными исследованиями. Модели семейства YOLOv8 различаются глубиной и шириной нейронной сети: от минималистичной YOLOv8n с 3,15 миллиона параметров до полноразмерной YOLOv8x с 68,20 миллиона параметров. Все варианты используют единую трёхкомпонентную архитектуру backbone-neck-head с anchor-free подходом к регрессии координат боксов, однако различаются масштабом – количеством каналов и глубиной отдельных блоков [3]. Входное разрешение для всех моделей было зафиксировано на значении 640×640 пикселей в соответствии с рекомендациями разработчиков [3].

Методика тестирования

Каждая модель тестировалась в идентичных условиях: 100 последовательных инференсов на одном и том же тестовом изображении, после чего вычислялось среднее значение времени обработки. Первые 10 инференсов исключались из расчёта для устранения эффекта прогрева GPU (warm-up), связанного с компиляцией CUDA-ядер и заполнением кэша GPU при первых запусках. Измерения проводились с использованием встроенных инструментов профилирования библиотеки Ultralytics YOLOv8 [3]. Потребление видеопамати фиксировалось утилитой nvidia-smi в момент устойчивой нагрузки.

Результаты и обсуждение

Результаты сравнительного тестирования пяти моделей семейства YOLOv8 на основном стенде (RTX 3070) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты тестирования моделей YOLOv8 при входном разрешении 640×640 пикселей (RTX 3070)

Модель	Параметры (млн)	FPS	Время инференса (мс)	Память (МБ)
YOLOv8n	3,15	77,5	12,9	63,6
YOLOv8s	11,16	75,8	13,19	115,2
YOLOv8m	25,89	65,7	15,22	235,3
YOLOv8l	43,67	50,9	19,64	271,7
YOLOv8x	68,20	37,3	26,78	551,2

Анализ зависимости производительности от размера модели. Анализ данных таблицы 2 позволяет выявить ряд закономерностей. Наблюдается монотонное снижение производительности по мере увеличения размера модели. Переход от YOLOv8n к YOLOv8x сопровождается увеличением числа параметров в 21,7 раза (с 3,15 до 68,20 млн), тогда как FPS снижается лишь в 2,08 раза (с 77,5 до 37,3). Зависимость между размером модели и скоростью инференса носит нелинейный сублинейный характер. Данный феномен объясняется высокой степенью параллелизации вычислений на GPU: современные графические процессоры способны одновременно выполнять тысячи операций над тензорами, что позволяет более крупным моделям эффективно использовать дополнительные вычислительные ядра [8].

Потребление видеопамати нарастает также нелинейно: YOLOv8x потребляет в 8,67 раза больше памяти, чем YOLOv8n. Это объясняется тем, что в процессе инференса в видеопамати хранятся не только веса модели, но и промежуточные карты признаков, объём которых прямо пропорционален числу фильтров в каждом слое [10].

Сравнительный анализ моделей YOLOv8n и YOLOv8s

При трёхкратном увеличении числа параметров (с 3,15 до 11,16 млн) снижение FPS составляет всего 2,2% (с 77,5 до 75,8), а увеличение времени инференса – лишь 0,29 мс. Обе модели работают в режиме, при котором вычислительные ядра RTX 3070 загружены не полностью, что и объясняет незначительную разницу в скорости [8]. Вместе с тем YOLOv8s обеспечивает существенно более высокое качество распознавания: согласно официальной документации Ultralytics, YOLOv8s достигает mAP@50-95 = 44,9 на наборе COCO, тогда как YOLOv8n – 37,3, что соответствует относительному приросту точности на 20,4% при практически идентичной скорости [3].

Анализ тяжёлых моделей. Модели YOLOv8m, YOLOv8l и YOLOv8x демонстрируют нарастающее снижение производительности. Модель YOLOv8m показывает FPS 65,7 и потребляет 235,3 МБ видеопамати, что существенно ограничивает её применимость на мобильных GPU. Модель YOLOv8x с FPS 37,3 и потреблением 551,2 МБ не может быть рекомендована для развёртывания в мобильных ассистивных системах: её требования к памяти делают её практически неприменимой на устройствах без выделенного мощного GPU [7]. Следует также учитывать, что приведённые данные получены на настольном GPU класса RTX 3070, тогда как реальная производительность на мобильных устройствах будет значительно ниже.

Теоретическая оценка производительности на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами

Практическое применение ассистивных систем предполагает их использование не только на высокопроизводительных рабочих станциях, но и на более доступных устройствах. В связи с этим представляет интерес теоретическая оценка производительности моделей семейства YOLOv8 на конфигурации начального уровня – на базе процессора AMD Ryzen 3 1200, 16 ГБ оперативной памяти DDR4 (2666 МТ/с) и видеокарты Nvidia GeForce RTX 3050 8 ГБ. Сравнительные технические характеристики обоих GPU представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение технических характеристик GPU тестового стенда и конфигурации начального уровня

Характеристика	RTX 3070	RTX 3050 (8 GB)
Архитектура	Ampere (GA104)	Ampere (GA106)
CUDA-ядра	5888	2560
Пиковая производительность FP32 (TFLOPS)	20,31	9,10
Пропускная способность памяти (ГБ/с)	448,0	224,0

Объём VRAM (ГБ)	8	8
TDP (Вт)	220	130

Теоретическое соотношение вычислительных мощностей по показателю FP32 составляет $20,31 / 9,10 \approx 2,23$ в пользу RTX 3070 [11]. Вместе с тем для задач инференса нейронных сетей реальное соотношение производительности, как правило, ниже теоретического, поскольку скорость обработки определяется не только числом CUDA-ядер, но и пропускной способностью памяти, эффективностью планировщика задач GPU и степенью насыщения вычислительных ядер при данном размере модели [8]. Пропускная способность памяти RTX 3050 вдвое ниже, чем у RTX 3070 (224 против 448 Гб/с), что является ключевым ограничивающим фактором при инференсе моделей среднего и крупного размера. Согласно опубликованным сравнительным исследованиям производительности GPU в задачах глубокого обучения, практическое соотношение скоростей инференса между картами данного класса составляет порядка $1,5-1,8 \times$ [4]. Исходя из результатов тестирования на основном стенде и применяя коэффициент пересчёта 1,6 (среднее значение диапазона $1,5-1,8$), теоретически ожидаемые значения производительности для RTX 3050 8 Гб представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Теоретически ожидаемые показатели производительности моделей YOLOv8 на конфигурации с RTX 3050 8 Гб

Модель	FPS (RTX 3070, факт.)	FPS (RTX 3050, оценка)	Время инф. RTX 3070 (мс)	Время инф. RTX 3050 (мс)
YOLOv8n	77,5	~48	12,9	~20,6
YOLOv8s	75,8	~47	13,19	~21,1
YOLOv8m	65,7	~41	15,22	~24,4
YOLOv8l	50,9	~32	19,64	~31,4
YOLOv8x	37,3	~23	26,78	~42,8

Анализ расчётных данных показывает, что на конфигурации с RTX 3050 модели YOLOv8n и YOLOv8s сохраняют производительность выше порога реального времени (~48 и ~47 FPS соответственно), тогда как модель YOLOv8x опускается ниже 24 FPS, что делает её применение в интерактивных ассистивных системах нецелесообразным. Модель YOLOv8s при расчётном FPS ~47 обеспечивает приемлемую скорость обработки при сохранении преимущества в точности над YOLOv8n, что подтверждает обоснованность её выбора для системы Vision Assist даже при развёртывании на устройствах начального уровня. Следует подчеркнуть, что приведённые

значения носят оценочный характер и получены на основе публично доступных сравнительных характеристик GPU; для получения достоверных результатов необходимо проведение натурального тестирования на указанной конфигурации с использованием каждой версии модели YOLOv8, т.к. теоретически ожидаемые показатели даже при самых точных расчётах могут различаться с реальными результатами.

На основании совокупного анализа полученных данных для системы Vision Assist выбрана модель YOLOv8s. Аргументация данного выбора строится на нескольких ключевых соображениях. Во-первых, YOLOv8s обеспечивает FPS 75,8 на основном стенде и расчётные ~47 FPS на конфигурации начального уровня, что в обоих случаях существенно превышает минимальный порог реального времени [6]. Это означает значительный запас производительности, необходимый для работы системы на реальных мобильных устройствах. Во-вторых, потребление видеопамати 115,2 Мб является приемлемым для мобильных GPU современных смартфонов среднего и высшего класса. В-третьих, прирост точности по сравнению с YOLOv8n составляет 20,4% по метрике mAP@50-95 при практически идентичной скорости работы [3]. Данный выбор согласуется с результатами независимых сравнительных исследований архитектур семейства YOLO [4].

Выводы

По результатам проведённого сравнительного анализа производительности пяти моделей семейства YOLOv8 сформулированы следующие выводы.

Зависимость между числом параметров модели и скоростью инференса на GPU носит нелинейный сублинейный характер: увеличение числа параметров в 21,7 раза приводит к снижению FPS лишь в 2,08 раза, что обусловлено высоким параллелизмом вычислений на современных графических процессорах.

Модели YOLOv8n и YOLOv8s демонстрируют практически идентичную скорость инференса (разница 0,29 мс) при существенном различии в качестве распознавания (прирост mAP@50-95 на 20,4%), что делает YOLOv8s предпочтительным выбором для приложений с повышенными требованиями к точности.

Модели YOLOv8l и YOLOv8x не рекомендуются к применению в мобильных ассистивных системах ввиду чрезмерного потребления видеопамати и снижения FPS ниже значений, обеспечивающих комфортную работу системы в режиме реального времени.

Теоретическая оценка показывает, что на конфигурации начального уровня с RTX 3050 8 Гб модели YOLOv8n и YOLOv8s сохраняют

производительность выше порога реального времени (~48 и ~47 FPS соответственно), что подтверждает применимость выбранной модели на широком классе потребительских устройств.

Модель YOLOv8s выбрана в качестве основы системы Vision Assist как обеспечивающая оптимальное соотношение скорости, точности и ресурсоёмкости при работе в реальном времени на устройствах различного класса производительности.

REFERENCES

- 1 World Health Organization. World report on vision. – Geneva: WHO, 2019. – 180 p.
- 2 **Bigham, J.P., Jayant, C., Ji, H., Little, G., Miller, A., Miller, R.C., Tatarowicz, A.** VizWiz: nearly real-time answers to visual questions // Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology. – 2010. – P. 333–342.
- 3 **Jocher, G., Chaurasia, A., Qiu, J.** Ultralytics YOLOv8. – GitHub, 2023. – [Electronic resource]. – <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (accessed: 01.03.2025).
- 4 **Terven, J., Córdova-Esparza, D.** A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS // Machine Learning and Knowledge Extraction. – 2023. – Vol. 5. – № 4. – P. 1680–1716.
- 5 **Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., Zisserman, A.** The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge // International Journal of Computer Vision. – 2010. – Vol. 88. – № 2. – P. 303–338.
- 6 **Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A.** You only look once: Unified, real-time object detection // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR). – 2016. – P. 779–788.
- 7 **Howard, A., Sandler, M., Chu, G., Chen, L.-C., Chen, B., Tan, M., Wang, W., Zhu, Y., Pang, R., Vasudevan, V., Le, Q. V., Adam, H.** Searching for MobileNetV3 // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019. – P. 1314–1324.
- 8 **LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G.** Deep learning // Nature. – 2015. – Vol. 521. – № 7553. – P. 436–444.
- 9 **Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Dollár, P., Zitnick, C. L.** Microsoft COCO: Common objects in context // European conference on computer vision (ECCV). – 2014. – P. 740–755.
- 10 **Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A.** Deep learning. – Cambridge: MIT Press, 2016. – 775 p.

11 Nvidia Corporation. NVIDIA GeForce RTX 3050 and RTX 3070 Technical Specifications. – Santa Clara: Nvidia, 2022. – [Electronic resource]. – <https://www.nvidia.com/en-us/geforce/graphics-cards/> (accessed: 01.04.2025).

Поступило в редакцию 04.05.26.
Поступило с исправлениями 06.05.26.
Принято в печать 04.06.26.

*И. А. Азитаев¹, Д. С. Найманова²

^{1,2}Торайғыров университеті, Қазақстан республикасы, Павлодар қ.
04.05.26 ж. баспаға түсті.
06.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖҮЙКЕ ЖЕЛІСІ YOLOV8 НЕГІЗІНДЕГІ ОБЪЕКТИЛЕРДІ ТАҢУ ЖҮЙЕСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН СТАТИСТИКАЛЫҚ БАҒАЛАУ

Бұл мақалада көру қабілеті нашар адамдарға арналған Vision Assist объектілерді таңу жүйесінің тиімділігін бағалау нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің мақсаты — YOLOv8 нейрондық желі отбасының бес нұсқасын (YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x) жылдамдық пен есептеу ресурстарын тұтыну тұрғысынан салыстырмалы талдау жүргізу болды. Тестілеу AMD Ryzen 5 5600X процессоры және Nvidia GeForce RTX 3070 бейнекартасы бар арнайы стендте жүргізілді. Бағалау үшін кадрлар жиілігі (FPS), иференс уақыты (мс) және модель параметрлерінің саны пайдаланылды. Нәтижесінде YOLOv8n моделі ең жоғары өнімділікті көрсетті: FPS – 77,5, иференс уақыты – 12,9 мс, параметрлер саны – 3,15 миллион. YOLOv8s моделі жылдамдық пен дәлдік арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді: FPS – 75,8, параметрлер саны – 11,16 миллион. Ауыр модельдер (YOLOv8l, YOLOv8x) нақты уақыт режимінде мобильді құрылғыларда пайдалануға жарамсыз екені анықталды. Шектеулі есептеу ресурстары бар конфигурациялар үшін RTX 3050 8 ГБ негізіндегі теориялық өнімділік бағасы берілген. Алынған нәтижелер негізінде YOLOv8s моделі Vision Assist жүйесіне негіз ретінде таңдалды.

Кілтті сөздер: объектілерді таңу, YOLOv8, нейрондық желі, тиімділікті бағалау, FPS, иференс уақыты, көру қабілеті нашар адамдар.

*I. A. Agitayev¹, D. S. Naimanova²

^{1,2}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 04.05.26.

Received in revised form 06.05.26.

Accepted for publication 04.06.26.

STATISTICAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF AN OBJECT RECOGNITION SYSTEM BASED ON THE YOLOV8 NEURAL NETWORK

The article presents the results of evaluating the effectiveness of the Vision Assist object recognition system developed to assist people with visual impairments. The study aimed to conduct a comparative analysis of five variants of the YOLOv8 neural network family (YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x) in terms of processing speed and computational resource consumption. Testing was carried out on a dedicated workstation equipped with an AMD Ryzen 5 5600X processor and an Nvidia GeForce RTX 3070 graphics card. Frames per second (FPS), inference time (ms), and the number of model parameters were used as evaluation metrics. The YOLOv8n model demonstrated the highest performance (FPS – 77.5, inference time – 12.9 ms), while YOLOv8s provides an optimal balance between speed and accuracy. Heavier models (YOLOv8l, YOLOv8x) were found unsuitable for real-time use on mobile devices. Additionally, a theoretical performance estimate for an entry-level configuration with RTX 3050 8 GB is provided based on publicly available GPU comparison data. Based on the results, the YOLOv8s model was selected as the basis for the Vision Assist system.

Keywords: object recognition, YOLOv8, neural network, performance evaluation, FPS, inference time, visually impaired.

SRSTI 20.53.19

DOI

*B. S. Aitbekov¹, M. Zhartybayeva²

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

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7861-2201>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3987-9353>

*e-mail: aitbekov.01@gmail.com

LSTM-BASED FORECASTING IN VOLATILE AND DATA-SCARCE ENVIRONMENTS

This research addresses the challenge of exchange rate forecasting in volatile emerging markets. It focuses on the rate between Kazakhstani Tenge (KZT) and the United States Dollar (USD), a market characterized by high volatility and limited data availability. LSTM networks are used often in time series prediction, which includes financial data. While LSTM networks are widely used for time series prediction, their performance under such unstable and data-scarce environments, such as in Kazakhstan, remains unclear. Therefore, a comparative study that focuses on three models: a standalone LSTM model, a CNN LSTM model and a CNN LSTM model with residual correction is proposed. All models are trained on daily KZT and USD exchange rates and Brent oil prices from 2015 to 2024. This period includes major economic events, which increase volatility and provide a strict test for forecasting models. The empirical results show that the standalone LSTM model achieves the best performance. RMSE equals 4.8837, and MAE equals 3.7555. These results are significantly better than the errors of the hybrid models. The CNN LSTM model shows an RMSE of 8.2236, which indicates weaker performance. The residual correction model shows an RMSE of 5.3163, which places it between the two models. The results suggest that simple models may perform better in volatile and data constrained environments. This may be because higher complexity captures noise rather than useful patterns. In other words, carefully tuned simpler architectures may provide more reliable predictions in emerging market conditions.

Keywords: LSTM, Time Series Forecasting, Exchange Rate Prediction, KZT/USD, Emerging Markets.

Introduction

Exchange rate forecasting in emerging markets presents major challenges due to structural breaks, limited data as well as high volatility [1; 2]. The KZT-USD exchange rate is a clear demonstration of these issues, as it is influenced by commodity price shocks, geopolitical tensions in the region, and domestic macroeconomic and monetary policies [3]. Traditional models such as ARIMA and Prophet do not capture the complex nonlinear movements that appear in such volatile series [4; 5].

LSTM networks are used in sequence prediction, which includes financial time series. They show strong performance because long range links in the data are captured [6]. However, standalone LSTM models show limits. These limits appear as sensitivity to hyperparameters, high risk of overfitting in low data settings, and high computational demand [7; 8]. Hybrid models that combine LSTM with CNNs and residual correction methods are proposed in previous studies. They aim to reduce these limits. However, their performance in emerging market settings is not examined in detail [9; 10].

This research contributes to this field in three ways. First, a full empirical evaluation of hybrid deep learning models for KZT and USD forecasting is presented. This assessment fills a knowledge gap in studies that focus specifically on emerging markets. Second, the Diebold Mariano test that verifies differences in forecasting efficiency is implemented for statistical checks. Lastly, comprehensive analysis regarding model architecture and hyperparameters is provided. This reinforces arguments on reproducibility and transparency.

The study investigates whether hybrid CNN and LSTM models have a positive effect on forecasting accuracy for KZT-USD under persistently high volatility setting. The results show that well optimized standalone LSTM models produce better forecasts than more complex hybrid models. This suggests that simpler models may be more suitable in emerging markets, where resources are limited.

2 Materials and methods

2.1 Materials

This work is written to raise several new objectives to financial forecasting research. An evaluation is given of hybrid learning models for KZT and USD forecasting. It is important to note that the data used for analysis and evaluation is taken exclusively from official sources, such as records from the National Bank of Kazakhstan for the period of 10 years, from 2015 to 2025. The study also applies the Diebold Mariano tests, and the statistical significance of diversity between model outcomes is confirmed.

In addition, this paper delivers a detailed study of hyperparameters, the procedures used during training and model performance during several major periods of economic stress. For the latter, these periods include the 2015 oil price

fall, the COVID pandemic, and the 2022 geopolitical conflict. This indicates that the study offers evidence which tests model behavior under conditions displaying high volatility and structural change.

Previous studies state that LSTM networks work sufficiently well for financial time series forecasting. Hybrid models that combine CNNs and LSTMs show satisfactory results, as they capture short term patterns and long-term links [11]. Residual correction methods address systematic bias in model outputs [12]. However, most existing studies focus on developed markets or major currency pairs. They give limited attention to the specific issues that appear in emerging markets [13].

This study fills the gap of knowledge in current literature. It presents evidence from the currency market of Kazakhstan, which shows features that appear in many economies known for dependence on external trades. These features include high volatility, exposure to external factors, and limited data. Discussion shows that simple models perform better than complex hybrid models in such settings. It contributes to the debate on model simplicity and performance in financial forecasting.

2.2 Methodology

The main data points include daily KZT and USD exchange rates from the National Bank of Kazakhstan as well as Brent crude oil prices. The sample includes 3647 observations and covers the period from May 1, 2015 to May 1, 2025. The dataset also takes into account some major geo-economic events, which include the 2015 oil price fall, the COVID-19 pandemic period, and the 2022 geopolitical shock. Consequently, this dataset offers a comprehensive test setting for forecasting models.

Feature engineering is carried out using both technical indicators and external variables. Lagged values of the exchange rate are used for 1, 3, and 7 days. Lagged oil prices are used for 1, 3, and 7 days as well. Rolling statistics are included for the 7 day mean and the 7 day standard deviation. Price changes are calculated, which reflect short term movements. Volatility measures are also used. In fact, each feature aims to add information that affects the KZT and USD exchange rate. In other words, the feature set reflects both internal behavior of the exchange rate and external conditions.

The dataset is normalized through Min-Max scaling. This step ensures that all variables share a common scale.

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

Chronological splitting is also applied as it preserves the time order in the data. Eighty percent of the observations are assigned to the training set, which contains 2917 values. The remaining twenty percent is allocated to the test set that holds 730 values. This design ensures that information from the future does not enter the training process. Hence, the evaluation remains consistent with the actual forecasting conditions.

The study investigates three neural network architectures, each designed with detailed specifications. The first configuration, a standalone LSTM model, consists of a single LSTM layer with 64 units. This number is determined as an appropriate balance between model capacity and computational efficiency, given the available dataset size. To reduce the risk of overfitting while maintaining sufficient learning capacity, a dropout rate of 0.2 is applied to the LSTM layer. In addition, L2 regularization with lambda of 0.001 is implemented on both the kernel and recurrent weights. In total, this model contains 20 289 trainable parameters.

The second architecture, a CNN-LSTM hybrid model, operates on a Conv1D layer with 64 filters as well as kernel size of 3. The latter was selected to detect three-day local patterns in financial time series data, effectively capturing short-term volatility patterns. A MaxPooling layer with pool size of 2 shortens sequence length while keeping vital features. A second Conv1D layer with 32 filters provides additional feature extraction capability. The LSTM layer in this hybrid architecture uses 50 units, which represents a reduction from the standalone model because the CNN layers already perform feature extraction. A higher dropout rate of 0.3 is applied due to the increased model complexity. This architecture contains 25579 trainable parameters

The hybrid CNN LSTM with residual correction uses the same base architecture as the CNN LSTM model. Final sequence features apply a residual model based on linear regression. To adjust systematic errors, the adjusted prediction is expressed as Y_{final} equals the summ of CNN LSTM prediction and the estimated error term.

Across all the implemented models, the Adam optimizer (learning_rate=0.001) is used in combination with Mean Squared Error loss function. To mitigate possible overfitting, training incorporates early stopping (patience=15 epochs) and learning rate reduction (patience=10 epochs, factor=0.5).

RMSE and MAE are used to measure squared prediction errors and measure absolute prediction errors respectively. Additionally, MAPE is used to measure percentage errors. Direction accuracy measures the percentage of correct direction predictions. Finally, the Diebold Mariano test is used to check significance of different results. This method validates whether performance differences between models are meaningful.

3 Results and discussion

3.1 Results

The evaluation shows the following results:

Table 1 – Forecast Performance Comparison for KZT/USD Rate

Model	RMSE	MAE	MAPE (%)	Direction Accuracy (%)
LSTM	4.8837	3.7555	0.7803	47.35
CNN-LSTM	8.2236	6.0804	1.2475	47.21
Hybrid CNN-LSTM-Residual	5.3163	3.8768	0.7984	47.64

The standalone LSTM model shows the lowest RMSE and MAE values among the rest. RMSE equals 4.8837 and MAE equals 3.7555. The CNN LSTM hybrid model resulted in higher errors in all metrics. The residual corrected hybrid shows intermediate performance. As a result, the simplest architecture produces the best forecasts.

Beyond quantitative metrics, qualitative analysis reveals important behavioral differences.



Plot 1 – Model training history for KZT/USD Rate

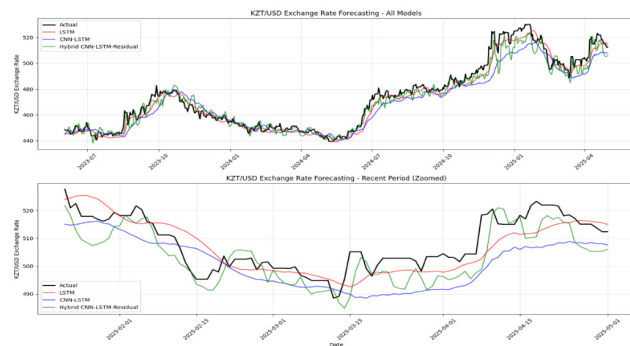
Qualitative analysis reveals important behavioral differences beyond quantitative metrics. Analysis of training behavior across one hundred epochs reveals important convergence patterns. The standalone LSTM demonstrates a

consistent and stable convergence trajectory, which is evident from the illustration in Plot 1. Its training loss decreases smoothly from 0.0954 to 0.0005, while the validation loss follows a similar decreasing pattern. This proves a positive generalization performance. The adaptive learning rate mechanism activates multiple times throughout training, optimizing the convergence process.

In contrast, the CNN-LSTM hybrid model shows more unstable training dynamics, as demonstrated in the same figure. Although the initial training loss of 0.1575 decreases to 0.0102, validation loss still exhibits greater fluctuations during the training process. This volatility suggests that the hybrid architecture struggles to capture steady patterns within the data. The learning rate adjustment occurs earlier for this training model, pointing to a slower convergence compared to the standalone LSTM network.

Both models complete all one hundred training epochs, but the LSTM achieves lower final loss values in both training and validation periods. The residual-corrected hybrid model, built upon the CNN-LSTM framework, inherits its base model characteristics but introduces the residual adjustment step to compensate for systematic prediction errors.

Forecast comparisons against actual KZT/USD data, presented in Plot 2, further highlight specific behavioral patterns across models. The LSTM predictions show strong alignment with real exchange rate trends, both during stable phases and periods of heightened volatility. This consistency indicates the model effectively identifies the underlying economic forces influencing currency movements.



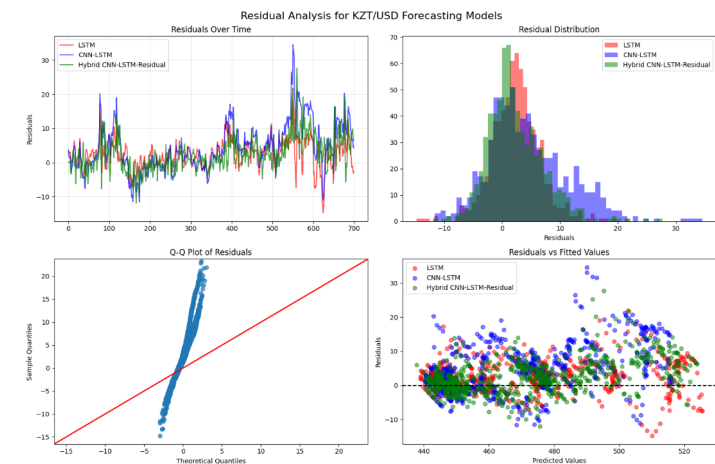
Plot 2 – Forecast comparison of all models

The CNN-LSTM hybrid model demonstrates signs of systematic oversmoothing in its forecasts, as shown in Plot 2. This tendency becomes especially noticeable during periods of high instability, such as the 2015 oil price decline and the 2020 COVID-19 pandemic. During these events, the model

struggles to identify sudden and unexpected market movements, implying that the convolutional layers may inadvertently discard important signal variations along with the noise.

The residual-corrected hybrid demonstrates improved accuracy compared to the base CNN-LSTM model. However, its performance still lags behind the standalone LSTM. Although the residual correction mechanism helps mitigate certain systematic biases, it cannot entirely overcome architectural limitations inherent in the hybrid approach.

Overall, these comparisons between predicted and actual values provide strong empirical evidence suggesting that simpler architectures may be more effective for high-volatility financial time series. The LSTM's consistent and more accurate performance across varying market conditions indicates that its sequential learning mechanism aligns well with the temporal dynamics of exchange rate dynamics.



Plot 3 – Residual analysis of all models

The residual analysis presented in Plot 3 offers further insight into the overall model performance. The residuals produced by the LSTM display a distribution that is closer to normal, with values tightly clustered around zero. In contrast, the CNN-LSTM produces residuals that display both a noticeable bias as well as a broader dispersion, indicating less consistent prediction performance. The Q-Q plots shown in Plot 3 support these observations as it reveals better normality in the LSTM residuals compared to the hybrid models. This pattern correlates with the conclusion that the LSTM not only delivers more accurate forecasts but also achieves more dependable uncertainty estimation.

The Diebold Mariano tests confirm these differences. The LSTM compared to CNN LSTM shows a DM statistic of negative 12.6453 with p less than 0.0001. This indicates strong significance. Moreover, LSTM compared to the hybrid model shows a DM statistic of negative 2.0572 with p equal to 0.0397, which indicates significance at the 5 percent level. The CNN LSTM compared to the hybrid model shows a DM statistic of 10.3601 with p less than 0.0001. In fact, these results confirm that the standalone LSTM model performs significantly better than both hybrid models.

Additionally, Model performance is examined in key economic periods. During the 2015 oil price fall, all models show difficulty, although the LSTM model recovers faster. When the COVID 19 pandemic takes place in 2020, the hybrid models show higher errors. After the 2022 geopolitical event, the LSTM adapts more effectively to sudden economic changes. Therefore, the consistent strength of the LSTM model suggests that noise in emerging markets may limit the benefit of added complexity. In other words, complex models may capture noise rather than useful patterns.

3.2. Discussion

The strong performance of the standalone LSTM challenges the assumption that more complex models always perform better. Several factors may explain this result. The data contains high noise relative to the signal, which may reduce the value of complex feature extraction and pattern recognition. Contrasting LSTM with hybrid models with more parameters, results present higher risk of overfitting, especially when the dataset is limited. The simpler model also uses fewer parameters, which may improve generalization. Therefore, lower complexity may be better suited to this environment.

The comparison of forecasts with actual KZT and USD values provides further insight into model behavior. A close alignment with real exchange rate movements is shown by the LSTM, particularly during volatile periods. This result demonstrates that changing market conditions are adapted to more effectively by LSTM. The CNN LSTM, however, shows systematic over smoothing. Important signal components may be removed together with noise because of the convolutional layers. As a result, sharp movements in the exchange rate are not captured well. The residual correction method corrects some systematic bias. However, it does not resolve the main limits of the hybrid architecture in periods in which volatility is high. In other words, the correction improves parts of the output, yet it cannot change the underlying model behavior.

These results have practical value for institutions in emerging markets. For organizations operating under certain resource limitations, simpler and well-optimized models may generate better outcomes. The process of model selection should not rely on the assumption that more complex designs produce increased

accuracy. Instead, empirical validation should serve as the primary basis for choosing an applicable model. Any introduction of additional complexity should be gradual and rigorously evaluated to ensure that it positively contributes to the long-term performance improvements rather than merely increasing computational cost.

The study examines movements in the exchange rate between the KZT and USD currencies. Further research is required to examine generalizability to other emerging market rates. Alternative hybrid models may also produce different outcomes. Future research may explore ensembles that combine simple and complex models. Additional data sources may also be used. Example sources include news sentiment and central bank statements. Real-time learning methods can also help identify shifts in market regimes and enable models to adjust more quickly to changing conditions.

4. Conclusion

This research shows that well-tuned LSTM models can outperform hybrid CNN LSTM models for KZT and USD forecasting in conditions that display high volatility. The empirical results show that the LSTM achieves an RMSE of 4.8837 and an MAE of 3.7555. These values show clear improvement over the CNN LSTM model, which shows an RMSE of 8.2236, and the residual corrected model, which shows an RMSE of 5.3163.

The Diebold Mariano tests confirm the statistical significance of these differences. Strong evidence is provided for the superiority of simpler architectures in volatile financial settings. Therefore, the common assumption that higher complexity always improves accuracy is challenged by these findings.

The training history shows that the LSTM model converges more smoothly and more consistently than the hybrid models. The forecasts show that the LSTM remains close to actual exchange rate movements, especially when volatility is high. The hybrid models show over smoothing, which limits their ability to capture rapid changes in the market.

Practical guidance is offered by this research for financial institutions and policymakers. Simple LSTM models may provide more reliable forecasts and lower computational cost than more complex hybrid models. This result is important in environments in which resources are limited and forecasting accuracy carries high importance.

Future work may examine whether these results hold for other emerging market currencies. It may also explore ensemble approaches that use the strengths of simple and complex models. Additional sources of data may also be used, e.g., news sentiment or central bank communication. Real time adjustment methods may further improve forecasting in markets that show frequent regime shifts.

REFERENCES

- 1 **Hochreiter, S., Schmidhuber, J.** Long short-term memory [Text] // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9. – № 8. – P. 1735–1780. – <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.
- 2 **Lim, B., Zohren, S.** Time series forecasting with deep learning: A survey [Text] // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2020. – Vol. 378. – № 2163. – Art. 20200209. – <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0209>.
- 3 **Adesina, O. S., Obokoh, L. O.** A hybrid framework of deep learning and traditional time series model for forecasting exchange rates [Text] // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 23. – Art. 102587. – [Electronic resource]. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S246822762500287X>.
- 4 **Hall, T., Rasheed, K.** A survey of machine learning methods for time series prediction [Text] // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – № 11. – Art. 5957. – [Electronic resource]. – <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/11/5957>.
- 5 **Kong, X. et al.** Deep learning for time series forecasting: A survey [Text] // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2025. – Vol. 16. – P. 5079–5112. – <https://doi.org/10.1007/s13042-025-02560-w>.
- 6 **García, F. et al.** Foreign exchange forecasting models: LSTM and BiLSTM comparison [Text] // Proceedings of the 10th International Conference on Time Series Forecasting. – 2024. – [Electronic resource]. – <https://www.mdpi.com/2673-4591/68/1/19>.
- 7 **Kim, J. et al.** A comprehensive survey of deep learning for time series forecasting: Architectural diversity and open challenges [Electronic resource]. – 2024. – arXiv:2411.05793. – [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/2411.05793>.
- 8 **Meng, S. et al.** Enhancing exchange rate forecasting with explainable deep learning models [Electronic resource]. – 2024. – arXiv:2410.19241. – [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/2410.19241>.
- 9 **Zougagh, N., Charkaoui, A., Echchatbi, A.** Artificial intelligence hybrid models for improving forecasting accuracy [Text] // Procedia Computer Science. – 2021. – Vol. 192. – P. 1111–1120. – [Electronic resource]. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921007882>.
- 10 **Kabir, M. R., Bhadra, D., Ridoy, M., Milanova, M.** LSTM–Transformer-based robust hybrid deep learning model for financial time series forecasting [Text] // Sci. – 2025. – Vol. 7. – № 1. – Art. 7. – [Electronic resource]. – <https://www.mdpi.com/2413-4155/7/1/7>.
- 11 Time series forecasting using deep learning [Electronic resource] // MathWorks. – 2018. – <https://ch.mathworks.com/help/deeplearning/ug/time-series-forecasting-using-deep-learning.html>.

- 12 **Buratto, W. G. et al.** Wavelet CNN–LSTM time series forecasting of electricity power generation [Text] // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2024. – Vol. 18. – № 10. – P. 1–12. – <https://doi.org/10.1049/gtd2.13292>.
- 13 **Bezza, F.** Time series prediction: LSTM, BI-LSTM, GRU [Electronic resource] // Medium. – 2024. – [Electronic resource]. – <https://medium.com/data-science-data-engineering/time-series-prediction-lstm-bi-lstm-gru-99334fc16d75>

Received 29.04.26.

Received in revised form 04.05.26.

Accepted for publication 04.06.26.

*Б. С. Айтбеков¹, М. Жартыбаева²

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

29.04.26 ж. баспаға түсті.

04.06.25 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

LSTM НЕГІЗІНДЕ ҚҰБЫЛМАЛЫ ЖӘНЕ ДЕРЕКТЕР ТАПШЫЛЫҒЫ БАР ОРТАЛАРДА БОЛЖАУ

Бұл зерттеу құбылмалы дамушы нарықтардағы валюта бағамын болжау мәселесіне арналған. Басты назарда-жогары белгісіздікпен және деректердің қолжетімділігінің шектелуімен сипатталатын теңгенің АҚШ долларына бағамы. Lstm желілері көбінесе уақыт серияларын, соның ішінде қаржылық деректерді болжау үшін қолданылады. Алайда, олардың жогары құбылмалылық пен деректер тапшылығы жағдайында, мысалы, Қазақстанда тиімділігі белгісіз болып қалуда. Салыстырмалы зерттеу ұсынылады. Lstm дербес моделі, CNN lstm моделі және CNN lstm қалдықтарды түзету моделі бағаланады. Барлық модельдер 2015 жылдан 2024 жылға дейінгі кезеңде теңгенің АҚШ долларына шаққандағы күнделікті бағамдарында және Brent маркалы мұнай бағасында оқытылады. Бұл кезең құбылмалылықты арттыратын және болжау үлгілерін қатаң тексеруді қамтамасыз ететін негізгі экономикалық оқиғаларды қамтиды. Эмпирикалық нәтижелер LSTM автономды моделі ең жақсы нәтижелерді көрсететінін көрсетеді. RMSE-4,8837, ал MAE-3,7555. Бұл нәтижелер гибриді модель қателеріне қарағанда айтарлықтай жақсы. CNN lstm моделі 8.2236 орташа квадраттық қатені (RMSE) көрсетеді, бұл өнімділіктің төмендігін көрсетеді. Қалдықтарды түзету моделі

rmse 5.3163 көрсетеді, бұл оны басқа екі модельдің арасына қояды. Нәтижелер қарапайым модельдер жоғары құбылмалылық пен шектеулі деректер жағдайында жақсы нәтиже көрсете алатынын көрсетеді. Бұл жоғары күрделілік пайдалы үлгілерді емес, шуды қабылдайтындығына байланысты болуы мүмкін. Басқаша айтқанда, Мұқият реттелген қарапайым архитектуралар дамушы нарықтар жағдайында сенімді болжамдар жасай алады.

Кілтті сөздер: LSTM, Уақыт қатарларын болжау, Айырбас бағамын болжау, KZT/USD, Дамушы нарықтар.

*Б. С. Айтбеков¹, М. Жартыбаева²

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

Поступило в редакцию 29.04.26.

Поступило с исправлениями 04.05.26.

Принято в печать 04.06.26.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ LSTM В ВОЛАТИЛЬНЫХ СРЕДАХ И СРЕДАХ С ДЕФИЦИТОМ ДАННЫХ

Данное исследование посвящено проблеме прогнозирования обменных курсов на волатильных развивающихся рынках. В центре внимания – курс тенге к доллару США, характеризующийся высокой неопределенностью и ограниченной доступностью данных. Сети LSTM часто используются для прогнозирования временных рядов, включая финансовые данные. Однако их эффективность в условиях высокой волатильности и дефицита данных, например, в Казахстане, остается неопределенной. Предлагается сравнительное исследование. Оцениваются автономная модель LSTM, модель CNN LSTM и модель CNN LSTM с коррекцией остатков. Все модели обучаются на ежедневных курсах тенге к доллару США и ценах на нефть марки Brent за период с 2015 по 2024 год. Этот период включает в себя основные экономические события, которые повышают волатильность и обеспечивают строгую проверку моделей прогнозирования. Эмпирические результаты показывают, что автономная модель LSTM демонстрирует наилучшие результаты. RMSE равно 4,8837, а MAE равно 3,7555. Эти результаты значительно лучше, чем ошибки гибридных моделей. Модель CNN LSTM демонстрирует среднеквадратичную ошибку (RMSE) 8,2236, что указывает на более низкую производительность. Модель коррекции остатков показывает RMSE 5,3163, что ставит

ее между двумя другими моделями. Результаты показывают, что простые модели могут показывать лучшие результаты в условиях высокой волатильности и ограниченности данных. Это может быть связано с тем, что более высокая сложность улавливает шум, а не полезные закономерности. Другими словами, тщательно настроенные более простые архитектуры могут обеспечивать более надежные прогнозы в условиях развивающихся рынков.

Ключевые слова: LSTM, Прогнозирование временных рядов, Прогнозирование обменного курса, KZT/USD, Развивающиеся рынки.

SRSTI 28.23.15

DOI

***A. Bakytzhan¹, D. Kaibassova²**

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

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2726-846X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8410-7758>

*e-mail: 242809@astanait.edu.kz

A DATASET OF KAZAKH HANDWRITTEN CHARACTERS

Handwriting still appears in classrooms, paperwork, and personal records, even where most communication has moved to a screen. For Kazakh written in Cyrillic, the main blocker for character-level recognition research is not a lack of ideas but a lack of carefully described data that other groups can reuse with confidence. This paper treats data quality as the central engineering problem and walks through how a usable dataset was put together. We describe form design and writer recruitment, scanning at 300 dpi, semi-automatic segmentation of grid forms into character crops, normalization and resizing to 64×64, and a two-pass annotation workflow with class-wise spot checks. The resulting dataset holds approximately 140,000 grayscale images across 42 classes from around 110 writers in two age groups. We also report a baseline convolutional neural network that reaches 84.3 % test accuracy and a macro-averaged F1 of 0.836, mainly to confirm the dataset is usable and to give later work a comparable reference point. The contribution is the methodology more than the size: per-class auditing, structured handling of segmentation failures, and a strict ambiguity-removal rule during labeling did more for reliability than additional samples would have.

Keywords: handwritten character dataset, Kazakh Cyrillic, data quality, segmentation, annotation workflow, label noise, convolutional neural network, low-resource scripts.

Introduction

Handwriting has not gone away. Schoolchildren still copy notes by hand, government forms still ask for handwritten signatures, and personal records often live in notebooks before they reach a screen. Turning that handwriting into machine-readable text helps with archiving, accessibility, and faster paperwork. None of this works, however, if the underlying training data is poor.

For Kazakh in Cyrillic script, that catch is real. Public character-level resources are limited, the few that exist focus on word- and line-level recognition rather than isolated characters, and the documentation that would let another team reproduce the data construction pipeline is rarely available. Recent work on data-centric AI has made the same point in a more general setting: time spent on dataset construction tends to dominate the model development cycle, and the design choices made during data preparation directly determine how reliable the downstream system can be [1; 2].

The dataset construction literature for handwriting has slowly moved in the same direction. The HKR database for Russian and Kazakh handwriting [3] and the larger KOHTD collection [4] both demonstrate the value of careful protocol design and class-wise auditing. Similar lessons appear in Kurdish character collections [5; 6; 7], the Devanagari numerals and vowels dataset [8], the AHAWP Arabic dataset [9], the Bangla CBD2023 collection [10], and the Grantha character dataset [11]. The consistent finding across these papers is the same: dataset value depends less on raw size and more on reliable ground truth, transparent methodology, and a clear account of how segmentation and labeling decisions were handled. Manuscript-level resources such as the Tamil palm leaf dataset [12] add similar complications around degraded substrates and historical artifacts.

This paper sits in that tradition. We describe the construction of a character-level dataset for Kazakh Cyrillic handwriting, with emphasis on the design choices that most directly affect label reliability. We also report a baseline convolutional neural network trained on the resulting dataset, mainly as a sanity check that the data is usable and as a reference point for later comparison.

The contributions are: a character-level dataset for Kazakh Cyrillic handwriting containing approximately 140,000 labeled images across 42 classes, collected from writers in two age groups; a documented end-to-end pipeline covering form design, scanning, semi-automatic segmentation, normalization, and two-pass annotation review; a practical analysis of segmentation failures and labeling decisions, organized so that future contributors can extend the protocol; and a baseline CNN result with per-class F1 scores and a discussion of confusion patterns.

Materials and methods

The dataset is built at the isolated character level. Each image holds one Kazakh Cyrillic character, and each label corresponds to one of 42 classes. Class identities are tracked by index throughout the paper rather than by Unicode character, which avoids encoding issues across editors and operating systems.

Participants filled in printed handwriting forms organized as a fixed grid. The grid gave us a stable geometry for the segmentation step, but each cell was generous enough to allow personal variation in size, slant, and stroke thickness.

We asked writers not to copy printed letterforms or trace anything; the goal was natural handwriting, not calibrated handwriting.

We collected data from two contributor groups. The first group was university students at Astana IT University, aged 18 to 21. The second was school pupils from secondary schools in several regions of the country. Roughly 110 writers contributed in total: about 60 from the university and 50 from schools. Each writer completed two to four forms depending on their availability, producing on average around 320 character samples before cleaning. No personal information was retained beyond an internal session identifier used to track sheets through the workflow.

The mix of adult and school-age writers was deliberate. Younger writers tend to use larger letter shapes and slightly more variable stroke control, while university students are more consistent but also more idiosyncratic. We wanted both ends of that spectrum in the data so that a recognition model trained on it would see something closer to real-world handwriting.

Completed forms were scanned at 300 dpi as grayscale images. Pages with heavy shadows, severe blur, or substantially blank areas were discarded at this stage rather than later. Cleaning effort spent on a poorly scanned page is rarely recovered; it is cheaper to rescan or drop.

The segmentation step turns a scanned form into individual character crops. We used a semi-automatic pipeline. The known grid geometry produced an initial crop proposal for each cell, and a human reviewer then corrected the cases where the proposal was wrong. To structure the cleaning effort, segmentation failures were grouped into recurring categories: incomplete crop (part of a stroke missing), shifted crop window, multi-symbol crop (parts of two characters in one cell), and background artifact inclusion (printed grid lines, ink smudges, paper texture). This grouping turned out to be useful for diagnosis. Most of the failures we saw were not random. They correlated with specific regions of the form, usually edges where scanning misalignment had the largest effect, and so they could be re-cropped in batches rather than handled one by one.

Each crop went through a short normalization pipeline. We applied a mild intensity correction to even out background illumination, recentered the foreground using the stroke bounding box when the character sat far from the cell center, and resized the result to 64×64 pixels with aspect-ratio-preserving padding. The padding step matters more than it sounds: stretching a tall character to a square aspect ratio introduces a deformation that is then learned as a class feature, which is exactly what you don't want. Figure 1 shows the overall pipeline.

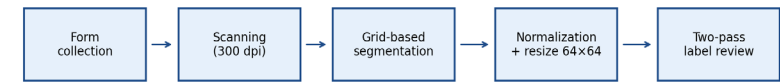


Figure 1 – Dataset construction pipeline from raw form to labeled crops

Labels were assigned at the character level in two passes. The first pass corrected obvious segmentation failures during the crop review step. The second pass focused on classes that had previously caused trouble (visually similar pairs and low-quality scans) and consisted of class-wise spot checks rather than exhaustive review. When a sample was ambiguous, we removed it instead of guessing. The conservative version of this rule produces a smaller dataset, but a smaller dataset with reliable labels is far more useful than a larger one where some fraction of samples sits at the boundary between two classes.

Quality assurance was driven by per-class frequency tracking. We watched the lower tail of the class distribution as cleaning progressed; sharp drops in a particular class were almost always traceable to a region of the form where segmentation was failing systematically. When we saw that pattern, we re-cropped the affected region rather than applying global filters, which would also have removed valid samples.

The recurring noise sources and the corresponding cleaning actions are listed in Table 1.

Table 1 – Recurring noise sources observed during cleaning and the action taken in each case

Noise source	Cleaning action applied
Empty or near-empty crop	Removed after a quick visual check.
Incomplete crop (missing strokes)	Re-cropped from the source page when recoverable; otherwise discarded.
Multi-symbol crop	Manually corrected when the intended character was unambiguous; otherwise discarded.
Background shadows or grid lines	Reduced through intensity normalization; removed when the stroke remained hard to read.
Blur or low contrast	Removed when stroke identity could not be determined.
Overwriting and corrections by the writer	Removed when the corrected character could not be read confidently.

The final class frequency distribution after cleaning is shown in Figure 2. The distribution is not flat. A few rare letters such as Ё, Ъ, and Һ remain underrepresented, which is consistent with their natural frequency in written Kazakh, but no class falls below the floor we set for usable training material.

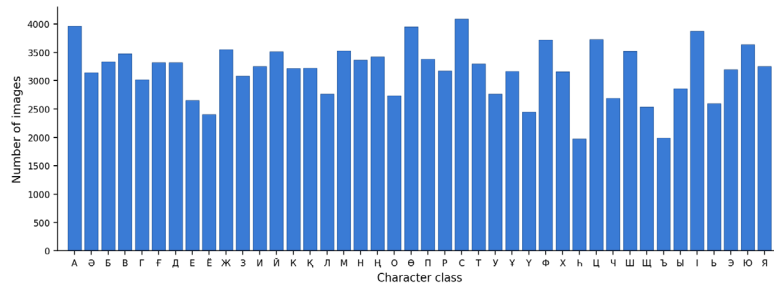


Figure 2 – Class frequency distribution across the 42 character classes after cleaning

The dataset has the standard layout expected by image classification frameworks: train/, validation/, and test/ folders, each containing 42 subdirectories indexed class_01 through class_42. A metadata file in each split lists file names with class indices. We use class indices rather than Unicode names for the same encoding-stability reason mentioned earlier. Table 2 summarizes the main properties.

The dataset is partitioned 80 % / 10 % / 10 % across training, validation, and test, with class proportions preserved across all three splits. Splits are made at the sample level rather than the writer level. This is a known compromise. Writer-level splits are stricter and more honest, but with 110 writers and 42 classes, a writer-level split would have left some classes with very few or no samples in the held-out partitions. We document the choice here so future users can construct stricter splits if needed.

The dataset is released for non-commercial research use. Researchers can request access by emailing the corresponding author with a brief note about the intended use. The directory structure described above, the class index mapping, and the per-split metadata files are included in the release.

Table 2 – Dataset summary

Property	Value
Number of classes	42 (Kazakh Cyrillic alphabet)
Total labeled images	≈ 140,000
Image format	Grayscale PNG
Normalized image size	64 × 64 pixels (with padding)
Train / Validation / Test split	80% / 10% / 10%, class-preserving
Number of writers	≈ 110 (≈ 60 university students, ≈ 50 school pupils)
Scanning resolution	300 dpi

Baseline classifier

To check that the dataset supports a reasonable classifier, we trained a small convolutional network and report its results below.

The network has four convolutional blocks followed by two fully connected layers. Each block contains a 3×3 convolution with ReLU activation, batch normalization, and 2×2 max pooling. The first two blocks use 32 filters; the last two use 64. After the final pooling step, the feature map is flattened and passed through a dense layer of 512 units with dropout 0.5, then to a 42-way softmax. Total parameter count is approximately 1.8 million.

Images were normalized to zero mean and unit variance using statistics computed from the training split only. The optimizer was Adam with an initial learning rate of 0.001 and batch size 128. Learning rate was halved when validation accuracy did not improve for three consecutive epochs, and training was capped at 30 epochs with early stopping after eight flat epochs. We did not use external data, pretrained weights, or augmentation beyond the normalization step described above; the goal here was a baseline, not a tuned system.

Results and discussion

The model reaches 84.3 % accuracy on the held-out test split, with macro-averaged F1 of 0.836 and weighted F1 of 0.841. Top-3 accuracy is 96.7 %. Table 3 lists the headline metrics.

Table 3 – Baseline CNN classification results on the held-out test split

Metric	Value
Test accuracy	84.3 %
Macro-averaged F1-score	0.836
Weighted F1-score	0.841
Top-3 accuracy	96.7 %
Trainable parameters	≈ 1.8 million

The training and validation curves (Figure 3) settle without obvious overfitting. Training accuracy climbs to about 90.2 % while validation plateaus around 84.3 %. The gap is consistent with what we would expect from natural writer variation: the test split contains writers and styles that the training split does not see fully, rather than with model capacity issues.

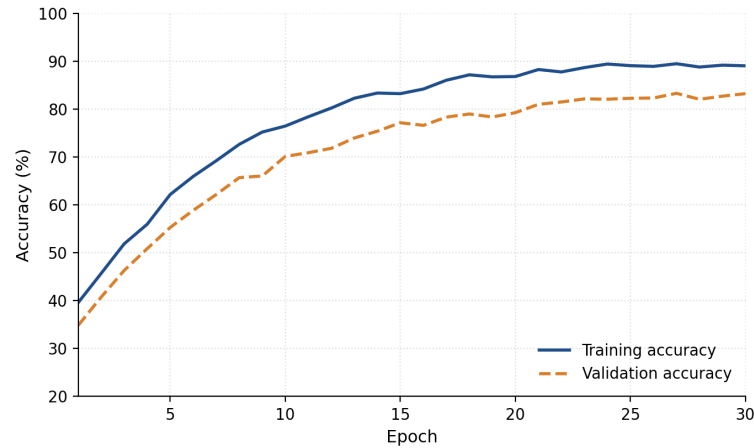


Figure 3 – Training and validation accuracy over 30 epochs

Per-class F1 scores (Figure 4) range from 0.667 to 0.926. The shape of this distribution does not track sample frequency, which is the most useful observation. Sample count alone does not predict difficulty. What predicts difficulty is visual similarity between classes.

Several patterns recur. The rounded-stem vowels with closely related forms are confused with each other across writers, which is the largest single source of misclassification. The soft sign and hard sign share a base shape and differ in details that disappear under noisy stroke control; they are among the most frequently confused pairs. The two forms of O differing only by a small diacritic stroke show consistent mutual confusion, and the same applies to the two forms of K with and without descender. The cluster of sibilant letters with similar closed loops produces the lowest scores. When visual similarity and lower sample count combine, as they do here, the effect compounds.

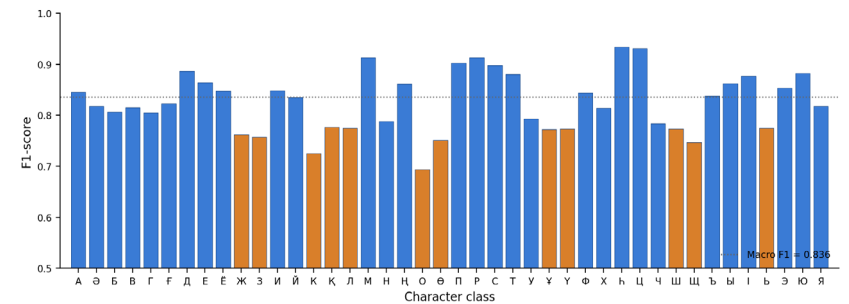


Figure 4 – Per-class F1-score for the baseline CNN.
Orange bars mark visually-similar classes that fall below 0.78

These confusion patterns line up with the classes that required the most human review during annotation. In other words, the model finds the same boundary cases hard that human reviewers found hard. That is a reasonable consistency check, and it tells us where any future improvement effort should go: targeted augmentation or example mining for the visually similar classes, rather than uniform scaling of the dataset.

Several limitations are worth being explicit about. The dataset contains isolated characters extracted from grid forms, so a model trained here will not transfer cleanly to connected handwriting at the word or line level without adaptation. Our collection conditions were fairly clean (standard paper, adequate lighting, approved pens), which means real-world artifacts like faded ink, pencil writing, or unusual paper colors are underrepresented. We do not systematically sample across all demographic axes; handedness is not tracked, very young or elderly writers are not included, and the geographic range is narrower than we would have liked. The conservative cleaning policy improves per-sample reliability at the cost of removing the difficult near-boundary cases that real documents contain. Finally, residual class imbalance remains, and downstream users may want to reweight or oversample depending on their task.

Conclusions

The dataset described here contains roughly 140,000 labeled images of isolated Kazakh Cyrillic characters across 42 classes, collected from approximately 110 writers in two age groups, processed through a documented semi-automatic pipeline, and organized for direct reuse. A small convolutional network reaches 84.3% test accuracy and 0.836 macro F1 on the resulting splits, which is enough to confirm the data is usable and to establish a reproducible reference for later work.

The main argument of the paper is that the value of the dataset is in the methodology, not the size. Per-class auditing, structured handling of segmentation

failures, and a strict ambiguity-removal rule during annotation did more for reliability than collecting additional samples would have. Future work will focus on widening writer diversity, relaxing the controlled collection conditions, and extending the protocol toward word- and line-level data so that the gap between isolated-character and full-text recognition can be addressed within a single resource.

REFERENCES

- 1 **Whang, S. E.** Data collection and quality challenges in deep learning : a data-centric AI perspective [Text] / S. E. Whang, Y. Roh, H. Song, J. G. Lee // The VLDB Journal. – 2023. – Vol. 32. – № 4. – P. 791–813. – <https://doi.org/10.1007/s00778-022-00775-9>.
- 2 **de Sousa Neto, A. F.** Data augmentation for offline handwritten text recognition : a systematic literature review [Text] / A. F. de Sousa Neto, B. L. D. Bezerra, A. H. Toselli // SN Computer Science. – 2024. – Vol. 5. – № 2. – Art. 258. – <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02583-6>.
- 3 **Nurseitov, D.** Handwritten Kazakh and Russian (HKR) database for text recognition [Text] / D. Nurseitov, K. Bostanbekov, D. Kurmankhojayev, A. Alimova, A. Abdallah, R. Tolegenov // Multimedia Tools and Applications. – 2021. – Vol. 80. – № 21. – P. 33075–33097. – <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11399-6>.
- 4 **Toiganbayeva, N.** KOHTD : Kazakh offline handwritten text dataset [Text] / N. Toiganbayeva, M. Kasem, G. Abdimanap, K. Bostanbekov, A. Abdallah, A. Alimova, D. Nurseitov // Signal Processing : Image Communication. – 2022. – Vol. 108. – Art. 116827. – <https://doi.org/10.1016/j.image.2022.116827>.
- 5 **Abdalla, P. A.** A vast dataset for Kurdish handwritten digits and isolated characters recognition [Text] / P. A. Abdalla, A. M. Qadir, M. Y. Shakor, A. M. Saeed, A. T. Jabar, A. A. Salam, H. H. Hama Amin // Data in Brief. – 2023. – Vol. 47. – Art. 109014. – <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109014>.
- 6 **Majeed, H. D.** Kurdish standard EMNIST-like character dataset [Text] / H. D. Majeed, G. S. Nariman, R. S. Azeez, B. B. Abdulqadir // Data in Brief. – 2024. – Vol. 52. – Art. 110038. – <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110038>.
- 7 **Ahmed, A. H.** KurdSet : a Kurdish handwritten characters recognition dataset using convolutional neural network [Text] / A. H. Ahmed, R. Tahir, S. H. Mahmood // Computers, Materials & Continua. – 2024. – Vol. 79. – № 1. – P. 429–448. – <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.048356>.
- 8 **Prashanth, D. S.** A multi-purpose dataset of Devanagari script comprising of isolated numerals and vowels [Text] / D. S. Prashanth, R. V. K. Mehta, N. P.

Challa // Data in Brief. – 2022. – Vol. 40. – Art. 107723. – <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107723>.

9 **Khan, M. A.** Arabic handwritten alphabets, words and paragraphs per user (AHAWP) dataset [Text] / M. A. Khan // Data in Brief. – 2022. – Vol. 41. – Art. 107947. – <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107947>.

10 **Bappi, J. O.** CBD2023 : a hypercomplex Bangla handwriting character recognition data for hierarchical class expansion [Text] / J. O. Bappi, M. A. T. Rony // Data in Brief. – 2024. – Vol. 52. – Art. 109909. – <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109909>.

11 **Singh, A.** GOCR : a dataset for Grantha handwritten character recognition [Text] / A. Singh, V. Bhutani // Data in Brief. – 2024. – Vol. 56. – Art. 110783. – <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110783>.

12 **Jailingswari, I.** Tamil handwritten palm leaf manuscript dataset (THPLMD) [Text] / I. Jailingswari, S. Gopinathan // Data in Brief. – 2024. – Vol. 53. – Art. 110100. – <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110100>.

Received 03.05.26.

Received in revised form 05.05.26.

Accepted for publication 04.06.26.

*А. Бакытжан¹, Д. Кайбасова²

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

03.05.26 ж. баспаға түсті.

05.05.25 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚ ҚОЛЖАЗБА ТАҢБАЛАРЫНЫҢ ДАТАСЕТІ

Бұл мақалада қазақ кириллицасындағы оқшауланған қолмен жазылған таңбалар датасетін құрастыру сипатталған. Жұмыстың негізгі назары деректер сапасына инженерлік мәселе ретінде аударылады. Жинау формаларын жобалау, сканерлеу, жартылай автоматты сегментация, нормалау және екі рет тексеруден өтетін аннотация процесі толық сипатталады. Соңғы датасет шамамен 140 000 сұр түсті кескінді қамтиды, олар 42 класқа бөлінген және екі жас тобындағы қатысушылардан, яғни студенттер мен оқушылардан, жиналған. Сегментациядағы және таңбалаудағы кең таралған қателіктер мен оларды түзету тәсілдеріне арнайы талдау жасалған. Датасеттің практикалық жарамдылығын дәлелдеу үшін базалық конволюциялық нейрондық желі үйретіліп, тестілік үлесте 84,3% дәлдік пен 0,836 макро-F1

көрсеткіші алынды. Алынған нәтижелер датасетті қазақ қолжазба мәтінін тану саласындағы әрі қарайғы зерттеулер үшін қайталанатын негіз ретінде, сондай-ақ деректер шектеулі болатын жағдайларда осындай ресурстарды құруға арналған әдістемелік бағдар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: қолмен жазылған таңбалар, датасет, қазақ кириллицасы, деректер сапасы, сегментация, аннотация, конволюциялық нейрондық желі, қолжазбаны тану.

*А. Бакытжан¹, Д. Қайбасова²

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

Поступило в редакцию 03.05.26.

Поступило с исправлениями 05.05.26.

Принято в печать 04.06.26.

ДАТАСЕТ РУКОПИСНЫХ СИМВОЛОВ КАЗАХСКОГО АЛФАВИТА

В статье представлена разработка датасета изолированных рукописных символов казахского алфавита на кириллице, в которой основное внимание уделено качеству данных как ключевой инженерной задаче. Описан полный процесс создания: проектирование форм для сбора рукописных образцов, сканирование, полуавтоматическая сегментация, нормализация и двухпроходная проверка разметки. Итоговый датасет содержит около 140 000 изображений в градациях серого, распределённых по 42 классам и собранных у участников двух возрастных групп: студентов и школьников. Особое место в работе занимает анализ типичных ошибок сегментации и решений по очистке данных, оказывающих наибольшее влияние на надёжность разметки. Для подтверждения практической пригодности датасета обучена базовая свёрточная нейронная сеть, достигающая точности 84,3% на тестовой выборке и макро-F1, равного 0,836. Полученные результаты позволяют рассматривать датасет как воспроизводимую основу для дальнейших исследований в области распознавания казахской рукописной письменности и как методический ориентир для построения подобных ресурсов в условиях ограниченного количества данных.

Ключевые слова: рукописные символы, датасет, казахская кириллица, качество данных, сегментация, разметка, свёрточная нейронная сеть, распознавание рукописного текста.

SRSTI 28.23.15

DOI

*S. V. Khan¹, Y. N. Aliyev²

¹Kazakh-British Technical University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

²ADA University, Republic of Azerbaijan, Baku.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6005-311X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1698-4297>

*e-mail: hansolomon168@gmail.com

CLASS PROTOTYPE ALIGNMENT THROUGH OPTIMAL TRANSPORT OF BARYCENTERS FOR UNSUPERVISED DOMAIN ADAPTATION

In this paper, the problem of domain adaptation for image classification using the Optimal Transport approach is studied. A proposed method considers the class structure of the data, in which Wasserstein barycenter's are calculated for each class of the training sample, acting as semantic prototypes. These prototypes are used to align the distribution of the target data sample by clustering and building a transport plan between barycenter's and target samples. Additionally, pseudo-labels are generated for the unlabeled data, which allows them to be included in the model training process. The experimental evaluation is carried out on datasets of handwritten digits showing differences in feature distributions. Linear regression is used as the basic method. The results show that the proposed approach provides higher classification accuracy and better consistency between the two datasets. Thus, the method confirms the effectiveness of using structured transfer of distributions to improve the quality of models in conditions of a distribution shift.

Keywords: Unsupervised Domain Adaptation, Optimal Transport, Wasserstein Barycenter's, Class Prototype Alignment, Domain Shift, Image Classification, Pseudo-Labels, K-Means Clustering.

Introduction

For various machine learning tasks, such as medical diagnostics, security, and e-commerce, there are often situations in which the data distribution may differ from the training sample. Research examines how population differences affect the analysis of X-ray images [1]. This mismatch in data distributions is called domain shift, a problem when source and target have different feature distributions. The model will be trained on a specific sample, but when used on target, it may come

across samples having features that differ from what was in the training sample. Due to such scenarios, the accuracy of predictions decreases and the performance of the model decreases. Using the example of tasks related to image classification, many factors can affect the set of features, such as lighting, tilt angle, colors, etc. Domain Adaptation is an area of machine learning that studies ways to solve domain shift [2; 3; 4].

In this paper, Domain Adaptation is investigated in image classification tasks using the Optimal Transport framework. The method presented in this study is inspired by work of Courty, in which the smoothing of sources and target distributions occurs, which is mathematically justified by Optimal Transport [5]. However, the transport plan is not built for the entire sample distribution, but for the source classes of the domain. This allows to maintain the integrity of classes when transferring “masses” and reduces errors in which the target samples are assigned the wrong class.

Domain adaptation is a subtask of the knowledge transfer problem, the purpose of which is to reduce the performance of models trained on source distribution and those used on target distributions. This problem is especially relevant in machine learning without a teacher.

One of the significant methods is feature-based, which seeks domain-invariant features. Techniques such as Transfer Component Analysis (TCA) and Joint Distribution Adaptation (JDA) try to reduce marginal and conditional distribution discrepancies in the transformed feature space through criteria such as Maximum Mean Discrepancy (MMD) [6].

Modern approaches actively apply deep learning. Deep Adaptation Networks (DAN) and Deep Transfer Networks (DTX) extend MMD ideas by adding them to deep network layers to align features.

In contrast to Optimal Transport-based approaches, these algorithms aim to reduce the divergence between distributions or jointly map feature representations. They have proven effective in numerous applications across computer vision, text processing, and medical diagnosis, among others.

The general OT problem (to give the Kantorovich formula) is the calculation of an optimal transportation plan for transferring the “masses”. In the case of Domain Adaptation, the “mass” is the source and target feature distributions. The methods provided by OT extend approaches to solving Domain Adaptation problems, for example, the ability to match distributions without explicit target markup.

Formulation of Kantorovich’s problem:

$$\min_{\gamma \in \Pi(\mu, \nu)} \int_{\mathcal{X} \times \mathcal{Y}} c(x, y) d\gamma(x, y)$$

where μ and ν are probability measures (distributions) on the spaces \mathcal{X} and \mathcal{Y} , respectively, $c(x, y)$ is a function of the cost of moving mass from \mathcal{X} to \mathcal{Y} , and $\Pi(\mu, \nu)$ is the set of all joint distributions with marginals μ and ν .

Several methods have been studied for applying Optimal Transport to the Domain Adaptation problem.

Researchers introduced a novel framework based on optimal transport (OT), which provides a mathematically grounded way to align empirical probability distributions between domains. The proposed method frames domain adaptation as a transportation problem, where source samples are mapped onto the target domain. To improve robustness and incorporate label information, the framework includes regularized optimal transport with entropy-based smoothing, class-based group sparsity, and Laplacian constraints.

Unbalanced Optimal Transport extends traditional OT by relaxing mass conservation constraints, enabling flexible adaptation to imbalanced class distributions [7]. Unbalanced OT method applies this framework to object detection [8].

Partial Domain Adaptation methods, such as Masked Optimal Transport and Intra-Domain Structure Preserving (IDSP), further advance the field through innovative reweighting and structure preservation techniques [9; 10].

The Low-Rank approach emphasizes that current OT methods do not account for noisy training samples or inaccurate labels. Referring to JDOT and DeepJDOT, a Low-Rank transport plan is proposed that smooths the effect of noise during mass transfer [11; 12].

The Class-Aware approach uses source-domain labels to correlate target samples with source classes via a Transportation Network that predicts per-class membership probabilities. A Multiclass Discriminator with $M + 1$ outputs guide the optimal transport plan construction [13].

Materials and methods

The goal of domain adaptation is to adapt a model trained on source distribution with labels $\mathcal{D}_S = \{(x_i^S, y_i^S)\}_{i=1}^{N_S}$ so that differences in target distribution $\mathcal{D}_T = \{x_j^T\}_{j=1}^{N_T}$ do not impair performance. Both domains share the same label space $\mathcal{Y} = \{1, \dots, M\}$, but their data distributions differ, i.e., $P_S(x) \neq P_T(x)$.

The study examines the class-aware approach of Optimal Transport for domain adaptation in the task of recognizing handwritten images.

The class prototype alignment searches for Wasserstein barycenter's in the source distribution with labels. Instead of computing an optimal transport plan for each individual distribution sample, the source barycenter's and target cluster centroids are compared.

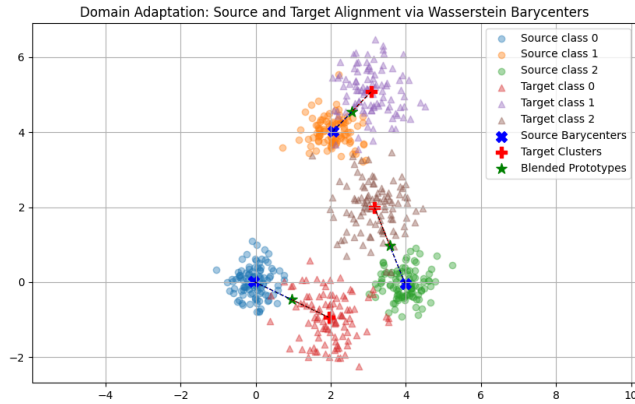


Figure 1 – Visualization of Domain Adaptation via Wasserstein barycenter's

For each class $c = 1, \dots, C$, we define the empirical source distribution as

$$\mu_s^{(c)} = \sum_{i=1}^{n_c} \frac{1}{n_c} \delta_{x_i^{(c)}},$$

where $x_i^{(c)} \in \mathbb{R}^d$ are feature vectors from class c . We compute the Wasserstein barycenter $\nu_c = \sum_{j=1}^m w_j \delta_{z_j}$ by solving:

$$\min_{\nu} \sum_{i=1}^N \lambda_i W_2^2(\mu_i^{(c)}, \nu),$$

where $\lambda_i = 1/N$ and W_2 is the 2-Wasserstein distance. The POT library is used to compute ν_c numerically [14].

Source barycenter's are also used as initialization points for k-means clustering of the target distribution. Let $\{b_c\}_{c=1}^C$ be the source barycenters. We perform k-means with initial centres b_c to obtain clusters $\{C_c^t\}_{c=1}^C$, where

$$C_c^t = \{x_j^t : c = \operatorname{argmin}_k \|x_j^t - b_k\|^2\}.$$

A pseudo-label \hat{y}_j^t is assigned to each target sample x_j^t as:

$$\hat{y}_j^t = \operatorname{arg} \min_{c \in \{1, \dots, C\}} \|x_j^t - b_c\|^2.$$

These pseudo-labels guide training through an additional loss term:

$$L_{\text{target}} = \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \ell(f(x_j^t), \hat{y}_j^t),$$

where ℓ is the cross-entropy loss.

After identifying barycenter's, clusters, and pseudo-labels, an optimal transport plan is sought between them to smooth the alignment of barycenter's to target clusters. Let $\{b_c\}_{c=1}^C$ be the source barycenters and $\{z_k\}_{k=1}^C$ the centroids of target clusters $\{C_k^t\}$.

Define the cost matrix $D \in \mathbb{R}^{C \times C}$ with entries:

$$D_{ck} = \|b_c - z_k\|^2.$$

Then compute the optimal transport plan $T \in \mathbb{R}^{C \times C}$ by solving:

$$T^* = \operatorname{arg} \min_{T \in U(r, c)} \langle T, D \rangle,$$

where $U(r, c) = \{T \geq 0 \mid T\mathbf{1} = r, T^T\mathbf{1} = c\}$ and $r, c \in \Delta^C$ are uniform weights $r_c = c_k = 1/C$.

The entropic-regularized (Sinkhorn) version solves:

$$T^* = \operatorname{arg} \min_{T \in U(r, c)} \langle T, D \rangle - \varepsilon H(T),$$

where $H(T) = -\sum_{c,k} T_{ck} \log T_{ck}$.

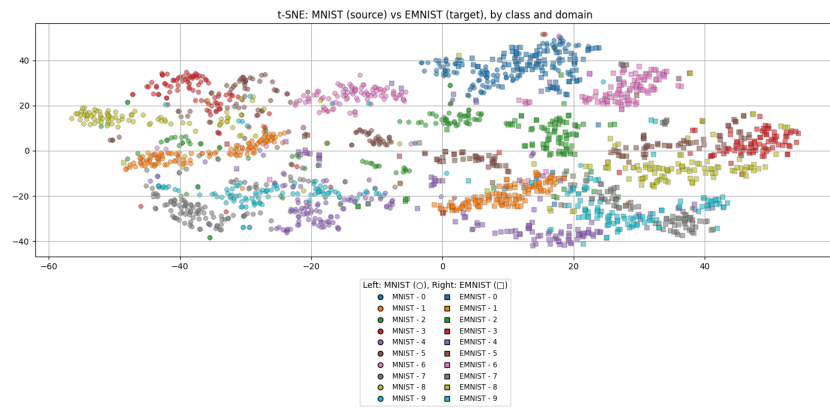
The final classifier combines three loss terms:

$$L_{ce} = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \ell(f(z_i^s), y_i^s),$$

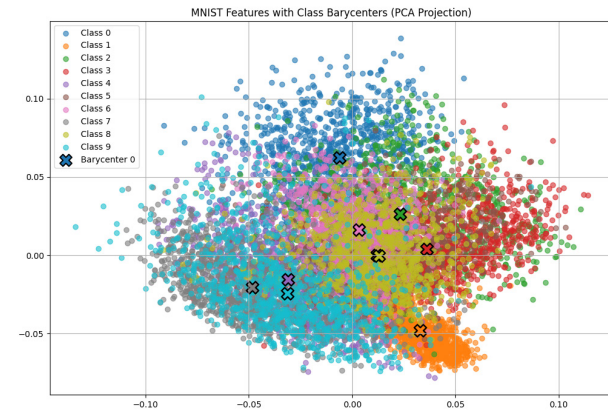
$$L_{proto} = \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \|z_j^t - W\mu_{y_j^t}\|^2,$$

$$L_{ent} = -\frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \sum_{c=1}^C p_c^j \log(p_c^j + \varepsilon),$$

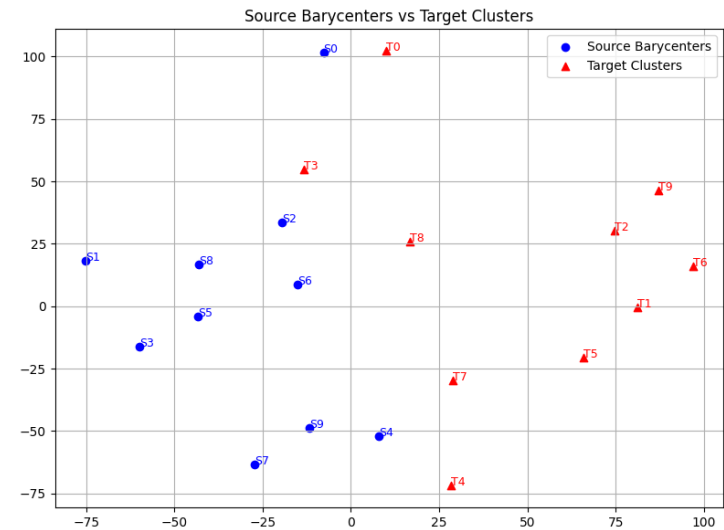
$$L = \lambda_{ce} \cdot L_{ce} + \lambda_{proto} \cdot L_{proto} + \lambda_{ent} \cdot L_{ent}.$$



Picture 2 – t-SNE visualization of MNIST and EMNIST samples by digit class. The figure shows how the same classes of images differ in feature space



Picture 3 – Source sample distribution with calculated class centroids (Wasserstein barycenter's)



Picture 4 – Source domain barycenter's and target cluster centroids. Class «0» is spatially close across domains due to similar feature spaces

Results and discussion

In addition to the standard machine learning libraries (numpy, pandas, pytorch), the Python Optimal Transport (POT) library was used to compute the optimal transport plan.

The following benchmarks were selected to evaluate the proposed Class Prototype Alignment method:

MNIST. A dataset of 28×28 grey-scale images of handwritten digits [15].

EMNIST. Extended MNIST preserves the same representation principle but extends the number of classes and contains more samples [16].

Table 1 – Comparison of MNIST and EMNIST (Digits) Datasets

	MNIST	EMNIST
Classes	10 (digits 0-9)	10 (digits 0-9)
Training Samples	60000	240000
Test Samples	10000	40000
Image Size	28x28 px	28x28 px
Grayscale	Yes	Yes
Balanced per Class	Yes	Yes
Format	Centered, cleaned	Rotated, not centered

During the experiment, MNIST and EMNIST datasets were split into train and test subsets (20,000 training samples and 10,000 test samples). The baseline is a logistic regression classifier (scikit-learn, 1000 iterations). Per-class Precision, Recall, and F1-Score were computed alongside overall accuracy (Tables 2 and 3).

Table 2 – Baseline classification report

Class	Precision	Recall	F1-Score
0	0.3901	0.9455	0.5523
1	0.8963	0.8775	0.8868
2	0.1559	0.3403	0.2138
3	0.0952	0.0020	0.0039
4	0.1024	0.1619	0.1255
5	0.5968	0.1484	0.2378
6	0.2086	0.1093	0.1434
7	0.0951	0.1381	0.1127
8	0.1982	0.0223	0.0401
9	0.1983	0.0743	0.1081
Accuracy			0.2814

Table 3 – Class Prototype Alignment classification report

Class	Precision	Recall	F1-Score
0	0.4648	0.8734	0.6067
1	0.9139	0.5560	0.6914
2	0.1685	0.4659	0.2474
3	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.1606	0.0523	0.0789
5	0.6000	0.0211	0.0407
6	0.2880	0.4065	0.3371
7	0.2437	0.6070	0.3478
8	0.0811	0.0091	0.0164
9	0.3706	0.0753	0.1252
Accuracy			0.3092

Our method strongly depends on the quality of the feature extractor; weaker embeddings cause accuracy to drop significantly (e.g., 15% vs. 30%). Additionally, computing Wasserstein barycenter's for high-dimensional samples remains a challenging open problem.

Conclusion

In this work we propose a class-aware domain adaptation method using Optimal Transport and Wasserstein barycenter's. Our approach effectively adapts by aligning source class prototypes to target clusters using pseudo-labels, achieving this in the absence of target supervision. Experimental results show that our method outperforms a linear regression baseline, highlighting the benefit of a structured transport-based adaptation approach for image classification.

REFERENCES

- 1 **Musa, A., Adamu, M. I., Kakudi, H. A., Hernandez, M., Lawal, Y.** Analyzing Cross-Population Domain Shift in Chest X-Ray Image Classification and Mitigating the Gap with Deep Supervised Domain Adaptation. In Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2024 / ed. by M. G. Linguraru et al. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 585–595.
- 2 **Cheplygina, V., de Bruijne, M., Pluim, J. P. M.** Domain Adaptation for Medical Image Analysis: A Survey. In IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2019. – Vol. 37. – № 5. – P. 1015–1035.
- 3 **Ben-David, S., Blitzer, J., Crammer, K., Pereira, F.** A Theory of Learning from Different Domains. In Machine Learning. – 2010. – Vol. 79. – P. 151–175.

4 **Ganin, Y., Lempitsky, V.** Unsupervised Domain Adaptation by Backpropagation. In International Conference on Machine Learning (ICML). – 2015. – P. 1180–1189.

5 **Courty, N., Flamary, R., Tuia, D., Rakotomamonjy, A.** Optimal Transport for Domain Adaptation. In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2017. – Vol. 39. – № 9. – P. 1853–1865.

6 **Farahani, A., Voghоеi, S., Rasheed, K., Arabnia, H. R.** A Brief Review of Domain Adaptation. In CoRR abs/2010.03978. – 2020. – [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/2010.03978>.

7 **Chizat, L., Peyré, G., Schmitzer, B., Vialard, F.-X.** Unbalanced Optimal Transport: Dynamic and Kantorovich Formulations. In Journal of Functional Analysis. – 2018. – Vol. 274. – № 11. – P. 3090–3123.

8 **De Plaen, H., De Plaen, P.-F., Suykens, J. A. K., Proesmans, M., Tuytelaars, T., Van Gool, L.** Unbalanced Optimal Transport: A Unified Framework for Object Detection. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2023. – P. 3201–3210.

9 **Luo, Y.-W., Ren, C.-X.** MOT: Masked Optimal Transport for Partial Domain Adaptation. In IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – IEEE, 2023. – P. 3531–3540.

10 **Li, W., Chen, S.** Partial Domain Adaptation Without Domain Alignment. In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2023. – Vol. 45. – № 7. – P. 8787–8797.

11 **Damodaran, B. B., Kellenberger, B., Flamary, R., Tuia, D., Courty, N.** DeepJDOT: Deep Joint Distribution Optimal Transport for Unsupervised Domain Adaptation. In European Conference on Computer Vision. – Springer, 2018. – P. 447–463.

12 **Xu, B., Yin, J., Lian, C., Su, Y., Zeng, Z.** Low-Rank Optimal Transport for Robust Domain Adaptation. In IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2024. – Vol. 11. – № 7. – P. 1667–1680.

13 **Nguyen, T., Nguyen, V., Le, T., Zhao, H., Tran, Q. H., Phung, D.** A Class-Aware Optimal Transport Approach with Higher-Order Moment Matching for Unsupervised Domain Adaptation. In arXiv Preprint arXiv:2401.15952. – 2024. – [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/2401.15952>.

14 **Flamary, R., Courty, N., Gramfort, A., Alaya, M., Boisbunon, A., Chambon, S., Chapel, L. et al.** POT: Python Optimal Transport. In Journal of Machine Learning Research. – 2021. – Vol. 22. – № 78. – P. 1–8.

15 **Deng, L.** The MNIST Database of Handwritten Digit Images for Machine Learning Research. In IEEE Signal Processing Magazine. – 2012. – Vol. 29. – № 6. – P. 141–142.

16 **Cohen, G., Afshar, S., Tapson, J., van Schaik, A.** EMNIST: An Extension of MNIST to Handwritten Letters. In CoRR abs/1702.05373. – 2017. – [Electronic resource]. – <http://arxiv.org/abs/1702.05373>.

Received 03.04.26.

Received in revised form 17.04.26.

Accepted for publication 04.06.26.

*С. В. Хан¹, Я. Н. Әлиев²

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, г. Алматы;

²АДА университеті, Әзірбайжан Республикасы, Баку қ.
03.04.26 ж. баспаға түсті.

17.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҮЙРЕТІЛМЕГЕН ДОМЕН БЕЙІМДЕУІНДЕГІ БАРИЦЕНТРЛЕРДІҢ ОҢТАЙЛЫ ТАСЫМАЛЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН СЫНЫП ПРОТОТИПТЕРІН ҮЙЛЕСТІРУ

Бұл жұмыс оңтайлы тасымалдау тәсілін қолдана отырып, кескіндерді жіктеу үшін домендік бейімделу міндетін қарастырады. Деректердің сыныптық құрылымын ескеретін әдіс ұсынылады, онда әрбір оқу сыныбы үшін семантикалық прототиптер ретінде әрекет ететін Вассерштейн барицентрлері есептеледі. Бұл прототиптер кластерлеу және барицентрлер мен мақсатты үлгілер арасында көлік жоспарын құру арқылы мақсатты деректер үлгісінің таралуын теңестіру үшін қолданылады. Сонымен қатар, белгіленбеген мәліметтер үшін жалған белгілер жасалады, бұл оларды модельді оқыту процесіне қосуға мүмкіндік береді. Эксперименттік бағалау белгілердің таралуындағы айырмашылықтарды көрсететін қолжазба сандарының деректер жиынтығында жүзеге асырылады. Сызықтық регрессия негізгі әдіс ретінде қолданылады. Нәтижелер ұсынылған тәсіл екі деректер жиынтығы арасындағы жоғары жіктеу дәлдігін және жақсырақ сәйкестікті қамтамасыз ететінін көрсетеді. Осылайша, әдіс атрибутты үлестірудің ауысуы жағдайында модельдердің сапасын жақсарту үшін құрылымдық үлестіруді қолданудың тиімділігін растайды.

Кілтті сөздер: доменді бақылаусыз бейімдеу, оңтайлы тасымалдау, вассерштейн барицентрлері, класс прототипін

туралау, доменді жылжыту, кескіндерді жіктеу, жалған белгілер,
K-кластерлеу құралдары.

*С. В. Хан¹, Я. Н. Әлиев²

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

²Университет ADA, Азербайджанская Республика, г. Баку.

Поступило в редакцию 03.04.26.

Поступило с исправлениями 17.04.26.

Принято в печать 04.06.26.

ВЫРАВНИВАНИЕ ПРОТОТИПОВ КЛАССОВ ЧЕРЕЗ ОПТИМАЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ БАРИЦЕНТРОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ БЕЗ УЧИТЕЛЯ С ДОМЕННОЙ АДАПТАЦИЕЙ

В данной работе рассматривается задача доменной адаптации для классификации изображений с использованием подхода Оптимального Транспорта. Предлагается метод, учитывающий классовую структуру данных, в котором для каждого класса обучающей выборки вычисляются барицентры Вассерштейна, выступающие в роли семантических прототипов. Эти прототипы используются для выравнивания распределения целевой выборки данных путём кластеризации и построения транспортного плана между барицентрами и целевыми выборками. Дополнительно формируются псевдо-метки для неразмеченных данных, что позволяет включить их в процесс обучения модели. Экспериментальная оценка проводится на наборах данных рукописных цифр, демонстрирующих различия в распределениях признаков. В качестве базового метода используется линейная регрессия. Полученные результаты показывают, что предложенный подход обеспечивает более высокую точность классификации и лучшую согласованность между двумя наборами данных. Таким образом, метод подтверждает эффективность использования структурированного переноса распределений для повышения качества моделей в условиях сдвига распределения признаков.

Ключевые слова: Неконтролируемая адаптация к предметной области, Оптимальный транспорт, Барицентры Вассерштейна, Выравнивание прототипов классов, Сдвиг предметной области, Классификация изображений, псевдомаркировки, Кластеризация по K-среднему значению.

MPHTI 50.41.25

DOI

*Ф. Маликова¹, В. Шинов²

^{1,2}Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы;

¹Алматинский технологический университет,
Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0527-322X>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3212-1348>

*e-mail: feruza-malikova@mail.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕИЗМЕННОСТИ ДАННЫХ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ НА БАЗЕ WEB3

Данное исследование направлено на изучение теории иммутабельности данных, понимание которой необходимо для реализации собственной разработки, в основе которой стоит децентрализованная сеть Web 3. Актуальность работы обусловлена критической необходимостью защиты данных в таких областях, как финансовые транзакции, медицинские записи, юридические инструменты и правительственные обращения. Традиционные централизованные подходы имеют существенные недостатки: компрометация центрального хранилища приводит к полной потере гарантий целостности, а внутренние угрозы создают дополнительные риски для критически важной информации. Распределённые системы предлагают альтернативу, где гарантии неизменности достигаются через криптографические механизмы и распределённый консенсус, не требующие доверия к единственной стороне. Именно эти преимущества распределённых систем послужили основой для проектирования собственного решения на базе локальной сети Web3, сочетающего криптографическую защиту с механизмами распределённого консенсуса. Разработан прототип системы с двухуровневой архитектурой консенсуса: базовый механизм мажоритарного голосования для подтверждения новых блоков и взвешенный консенсус с динамической репутационной системой для верификации целостности документов. Система использует алгоритм SHA-256 для криптографического хеширования, обеспечивает автоматическую проверку целостности с интервалом 120 секунд. Тестирование прототипа в лабораторных

условиях подтвердило корректную обработку консенсуса, что указывает на возможные пути развития для реализации проекта.

Ключевые слова: блокчейн, иммутабельность, распределенные системы, устойчивость к удалению, децентрализация, криптографическое хеширование, консенсус, Web 3.

Введение

Текущее исследование рассматривает фундаментальные теоретические модели, криптографические основы верификации, консенсус-механизмы и вероятностные гарантии неизменности в различных классах распределённых систем. Актуальность данной работы обусловлена критической необходимостью защиты данных в таких областях, как финансовые транзакции, медицинские записи, особенно различные юридические инструменты и правительственные обращения.

Традиционные централизованные подходы к обеспечению целостности данных имеют ряд существенных недостатков. Взлом или компрометация центрального хранилища приводит к полной потере гарантий целостности, а внутренние угрозы и несанкционированный доступ создают дополнительные риски для критически важной информации. Распределённые системы предлагают альтернативу, где гарантии неизменности достигаются через криптографические механизмы и распределённый консенсус, не требующие доверия к единственной стороне. Подобный механизм формирует основу для построения иммутабельных хранилищ с криптографически подтверждённой неизменностью данных.

Материалы и методы

Данное исследование основано на классическом подходе, сочетающем теоретический анализ и изучение практических реализаций, включая разработку собственного прототипа. Теоретическую базу исследования формируют работы в области распределённых систем, криптографии и теории консенсуса.

Рассматриваются формальные доказательства безопасности криптографических примитивов: устойчивость хеш-функций к коллизиям и нахождению прообразов, математические основы алгоритмов цифровой подписи. Параллельно с изучением теоретической базы идет активная разработка собственного децентрализованного хранилища.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования теоретического материала был разработан базовый прототип децентрализованного хранилища данных, реализованный как WEB приложение. Разработанный прототип системы продемонстрировал применимость теоретических концепций на практике в рамках лабораторных

условий внутри песочницы, состоявшей из нескольких виртуальных машин и удаленных устройств, подключенных через VPN.

В данный момент основной технической стек разработки был собран и структурирован. Прототип временно назван как Immutable Data Storage, в будущем сокращенно IDS (таблица 1).

Таблица 1 – Основной технический стек разработки

Категория	Технология	Версия	Назначение
Runtime	Node.js	Latest	Серверная среда выполнения JavaScript
Security	Helmet	^8.1.0	Защита HTTP заголовков
Validation	express-validator	^7.2.1	Валидация входящих данных
File Upload	Multer	^2.0.2	Обработка загрузки файлов
Blockchain Library	Ethers.js	^6.15.0	Взаимодействие с Ethereum
Cryptography	Crypto	^1.0.1	Криптографические операции

Текущая архитектура предусматривает наличие множества равноправных узлов внутри сети, каждый из которых должен хранить полную копию всей информационной базы, в том числе копию цепочки блоков. Имея данную информацию, каждый узел участвует в процессе консенсуса. В рамках разработанного прототипа блок данных представляет собой структурированную единицу информации, содержащую метаданные документа и криптографические подтверждения его целостности (таблица 2).

Таблица 2 – Базовая структура блока

Поле	Тип данных	Описание
block_id	UUID	Уникальный идентификатор блока
doc_id	UUID	Идентификатор документа
filename	String	Имя файла в хранилище с временной меткой
original_name	String	Оригинальное имя файла
hash	String	SHA-256 хеш содержимого файла
owner_id	String	Идентификатор владельца документа
created_at	ISO String	Временная метка создания блока
origin_url	String	URL узла-источника
confirmed	Boolean	Статус подтверждения блока
confirmations	Array	Массив подтверждений от узлов сети
confirmed_at	ISO String	Временная метка подтверждения

Для обеспечения целостности документов применяется алгоритм криптографического хеширования SHA-256. Существенной особенностью

реализации является расчет хеша от оригинального содержимого файла, в то время как сами файлы хранятся в зашифрованном виде. Данный подход обеспечивает возможность верификации целостности документа без необходимости повторной расшифровки при каждой проверке.

Процесс вычисления хеша включает следующие этапы: определение типа файла; расшифровка содержимого при необходимости; применение алгоритма SHA-256 к полученным данным; формирование шестнадцатеричного представления хеша.

В разработанном прототипе реализован механизм консенсуса, основанный на принципах Proof of Authority с элементами мажоритарного голосования. Данный подход был выбран исходя из требований к производительности системы и характеристик целевой среды развертывания. В отличие от публичных блокчейнов, где требуется защита от анонимных злонамеренных участников, корпоративная среда предполагает идентифицированные узлы с известной репутацией. Это позволяет избежать майнинга, сохраняя при этом необходимый уровень безопасности.

Алгоритм консенсуса требует подтверждения блока большинством узлов сети для его подтверждения в распределенном реестре. Процесс достижения консенсуса состоит из 3 основных этапов: инициализация блока, сбор подтверждений, а также финализация блока.

Критерий достижения консенсуса при добавлении нового блока определяется следующей формулой:

$$majorityCount = \text{floor}((peersCount + 1)/2) + 1, \quad (1)$$

где $peersCount$ – количество узлов в сети, $+1$ – учет текущего узла, а $\text{floor}()$ – операция округления вниз.

Существует также более взвешенный консенсус с правилом 66 % для проверки данных. Данный механизм представляет собой развитие концепции распределенного консенсуса с учетом динамической репутации узлов сети. За данный механизм в коде отвечает компонент ConsensusManager, который инициализируется при запуске узла и функционирует параллельно с основным механизмом блокчейна, ведя непрерывный мониторинг целостности данных в распределенной системе.

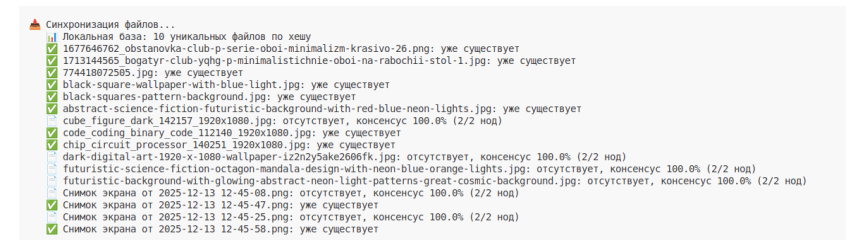


Рисунок 1 – Мониторинг файловой системы на факт повреждения данных

В отличие от базового механизма консенсуса, где все узлы обладают равным весом голоса, ConsensusManager реализует систему динамической репутации. Репутация вычисляется по следующей формуле:

$$R = (uptime \times 0.4) + (accuracy \times 0.4) + (contribution \times 0.2), \quad (2)$$

где $uptime$ – доступность узла, $accuracy$ – доля корректных ответов от узла, а $contribution$ – вклад узла в общее хранилище данных.

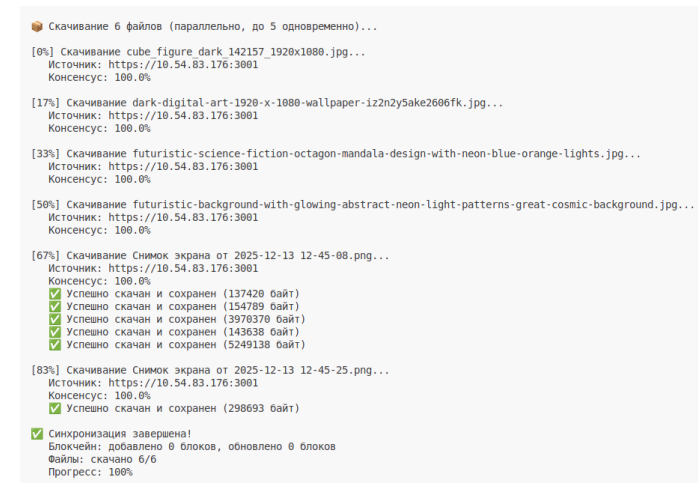


Рисунок 2 – Процесс синхронизации и восстановления данных

Классическое понимание неизменности данных простое – данные остаются одинаковыми во всех точках времени после их создания [1]. В распределенных системах нет глобального времени и единой точки наблюдения [2]. Разные узлы сети могут находиться в разных состояниях

из-за задержек в передаче информации. Более того, некоторые узлы могут быть взломаны и намеренно исказить данные.

Угрозы для неизменяемости данных можно разделить на несколько типов по тому, откуда они берутся и как действуют [3]. Разные угрозы требуют разных способов обнаружения и предотвращения (таблица 3) [4; 5].

Таблица 3 – Типы повреждений и их описание

Тип повреждения	Описание	Примеры
Физическое	Могут случаться из-за поломок оборудования, радиации, энтропии	Сбои секторов HDD/SSD, деградация флеш-памяти, космическое излучение
Логическое	Случается из-за багов в программах, гонок при одновременном доступе	Race conditions, deadlocks, некорректная транзакция БД

Файловые системы используют разные способы защиты от таких проблем [6]. Журналирование позволяет откатить незаконченные операции при сбое. Копирование при записи делает обновления атомарными. Контрольные суммы метаданных помогают обнаружить их повреждение. Базовая модель репликации работает так – данные копируются на несколько независимых узлов для надежности и доступности [7]. Модели репликации делятся на несколько типов по способу копирования и синхронизации [8].

Блокчейн – это цепочка блоков, где каждый блок связан с предыдущим через криптографический хеш [9]. Главное правило – хеш предыдущего блока, записанный в текущем, должен совпадать с реальным хешем того блока. Из-за особенностей криптографических хеш-функций даже малейшее изменение данных полностью меняет хеш блока [10].

Именно эти концепции и вошли в разработку прототипа. Наличие двух различных консенсусов позволяет системе сохранять высокую пропускную способность при записи новых данных, одновременно обеспечивая строгий контроль целостности уже записанных документов. Интервал автоматической проверки в 2 минуты выбран как баланс между оперативностью обнаружения нарушений и сетевой нагрузкой.

Стоит отметить факт схожести разработанного прототипа с Filecoin, однако у них есть серьезные отличия (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнение архитектуры IDS и Filecoin

Характеристика	IDS	Filecoin
Консенсус	Proof of Authority и взвешенное голосование	Proof of Replication и Proof of Spacetime
Целевая аудитория	Государственные и корпоративные системы	Публичная сеть
Идентификация узлов	Идентифицированные участники	Анонимные участники
Репликация данных	Полная репликация на всех узлах	Избирательная репликация

Выводы

Проведённое исследование систематизировало теоретические основы обеспечения неизменности данных в распределённых системах, раскрыв криптографические механизмы верификации, консенсус-алгоритмы и вероятностные модели гарантий целостности информации.

В рамках текущего исследования была изучена теория иммутабельности данных на разных уровнях, также параллельно идет разработка рабочего решения. Результаты работы могут служить основой для дальнейших исследований в области оптимизации консенсус-механизмов, повышения масштабируемости распределённых систем и разработки гибридных архитектур, сочетающих преимущества централизованных и децентрализованных подходов к обеспечению целостности данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Целостность информации [Электронный ресурс] // Wikipedia. – [Electronic resource]. – https://ru.wikipedia.org/wiki/Целостность_информации (Дата обращения 19.10.2025).
- 2 **Lamport, L.** Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system [Текст] // Communications of the ACM. – 1978. – Vol. 21. – № 7. – P. 558–565.
- 3 Повреждение данных [Электронный ресурс] // Wikipedia. – https://ru.wikipedia.org/wiki/Повреждение_данных (Дата обращения 12.10.2025).
- 4 **Barker, E.** NIST Special Publication 800-57 Part 1 Revision 5 [Текст] // NIST. – 2020. – P. 50–58.
- 5 **Schroeder, B., Gibson, G. A.** Disk failures in the real world: What does an MTTF of 1,000,000 hours mean to you? [Текст] // USENIX FAST. – 2007. – P. 1–16.
- 6 NIST. Special Publication 800-57 [Текст] // NIST. – 2020. – P. 65–80.
- 7 **Gray, J., Helland, P., O’Neil, P., Shasha, D.** The dangers of replication and a solution [Текст] // ACM SIGMOD. – 1996. – P. 173–184.

- 8 **Van Renesse, R., Schneider, F. B.** Chain replication for supporting high throughput and availability [Текст] // OSDI. – 2004. – P. 43–50.
- 9 **Nakamoto, S.** Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system – 2008. – P. 1–9. – [Электронный ресурс]. – <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- 10 **Garay, J., Kiayias, A., Leonardos, N.** The Bitcoin backbone protocol: Analysis and applications [Текст] // EUROCRYPT. – 2015. – P. 1–12.

REFERENCES

- 1 Tselostnost' informatsii [Data integrity] [Electronic resource] // Wikipedia. – [Electronic resource]. – https://en.wikipedia.org/wiki/Data_integrity (accessed 19.10.2025).
- 2 **Lampport, L.** Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system [Text] // Communications of the ACM. – 1978. – Vol. 21. – № 7. – P. 558–565.
- 3 Povrezhdenie dannikh [Data corruption] [Electronic resource] // Wikipedia. – [Electronic resource]. – https://en.wikipedia.org/wiki/Data_corruption (accessed 12.10.2025).
- 4 **Barker, E.** NIST Special Publication 800-57 Part 1 Revision 5 [Text] // NIST. – 2020. – P. 50–58.
- 5 **Schroeder, B., Gibson, G. A.** Disk failures in the real world: What does an MTTF of 1,000,000 hours mean to you? [Text] // USENIX FAST. – 2007. – P. 1–16.
- 6 NIST. Special Publication 800-57 [Text] // NIST. – 2020. – P. 65–80.
- 7 **Gray, J., Helland, P., O'Neil, P., Shasha, D.** The dangers of replication and a solution [Text] // ACM SIGMOD. – 1996. – P. 173–184.
- 8 **Van Renesse, R., Schneider, F. B.** Chain replication for supporting high throughput and availability [Text] // OSDI. – 2004. – P. 43–50.
- 9 **Nakamoto, S.** Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. – 2008. – P. 1–9. – [Electronic resource]. – <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- 10 **Garay, J., Kiayias, A., Leonardos, N.** The Bitcoin backbone protocol: Analysis and applications [Text] // EUROCRYPT. – 2015. – P. 1–12.

*Ф. Маликова¹, В. Шиннов²

^{1,2}Сәтбаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

¹Алматы технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

WEB3 НЕГІЗІНДЕГІ ОРТАЛЫҚСЫЗДАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРДЕ ДЕРЕКТЕРДІҢ ӨЗГЕРМЕЙТІНДІГІН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ

Бұл зерттеу деректердің өзгермейтіндігі теориясын зерттеуге бағытталған, оны түсіну орталықсыздандырылған Web 3 желісіне негізделген өз жобамызды жүзеге асыру үшін қажет. Жұмыстың өзектілігі қаржылық транзакциялар, медициналық жазбалар, заңды құралдар және мемлекеттік өтініштер сияқты салаларда деректерді қорғаудың аса маңызды қажеттілігімен анықталады. Дәстүрлі орталықтандырылған тәсілдердің елеулі кемшіліктері бар: орталық қоймаға қол сұғу тұтастық кепілдіктерін толық жоғалтуға әкеледі, ал ішкі қауіптер аса маңызды ақпарат үшін қосымша тәуекелдер туғызады. Таратылған жүйелер балама ұсынады, мұнда өзгермейтіндік кепілдіктері бір тарапқа сенімді қажет етпейтін криптографиялық механизмдер мен таратылған консенсус арқылы қол жеткізіледі. Таратылған жүйелердің бұл артықшылықтары криптографиялық қорғауды таратылған консенсус механизмдерімен біріктіретін Web3 жергілікті желісіне негізделген өз шешімімізді жобалауға негіз болды. Екі деңгейлі консенсус архитектурасы бар прототиптік жүйе жасалды: жасаң блоктарды растау үшін негізгі көшілік дауыс беру механизмі және құжат тұтастығын тексеру үшін динамикалық бедел жүйесі бар салмақталған консенсус. Жүйе криптографиялық хэштеу үшін SHA-256 алгоритмін пайдаланады және 120 секундтық аралықпен автоматты тұтастықты тексеруді қамтамасыз етеді. Прототипті зертханалық тестілеу консенсустың дұрыс оңделгенін растады, бұл жобаның болашақтағы мүмкін болатын дамуын көрсетеді.

Кілтті сөздер: блокчейн, өзгермейтіндік, таратылған жүйелер, жосоға төзімділік, орталықсыздандыру, криптографиялық хэштеу, консенсус, Web 3.

*F. Malikova¹, V. Shinov²

^{1,2}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

¹Almaty Technological University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

ENSURING DATA IMMUTABILITY IN DECENTRALIZED WEB3-BASED SYSTEMS

This research aims to study the theory of data immutability, an understanding of which is necessary for the implementation of our own project based on a decentralized Web 3 network. The relevance of this work is driven by the critical need to protect data in areas such

as financial transactions, medical records, legal instruments, and government communications. Traditional centralized approaches have significant drawbacks: compromising a central storage leads to a complete loss of integrity guarantees, while insider threats create additional risks for critically important information. Distributed systems offer an alternative, where immutability guarantees are achieved through cryptographic mechanisms and distributed consensus that do not require trust in a single party. These advantages of distributed systems served as the basis for the design of our own solution based on the Web3 local network, combining cryptographic protection with distributed consensus mechanisms. A prototype system with a two-tier consensus architecture was developed: a basic majority voting mechanism for confirming new blocks and a weighted consensus with a dynamic reputation system for document integrity verification. The system uses the SHA-256 algorithm for cryptographic hashing and provides automatic integrity checking at 120-second intervals. Lab testing of the prototype confirmed the correct processing of consensus, indicating possible future developments for the project.

Keywords: blockchain, immutability, distributed systems, deletion resistance, decentralization, cryptographic hashing, consensus, Web 3.

SRSTI 50.03.05

DOI

***N. K. Nadirov¹, N. M. Taubakaby²**

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

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6011-8109>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0440-6739>

*e-mail: n.nadirov@astanait.edu.kz

MODULAR WEB PLATFORM ARCHITECTURE FOR MACHINE LEARNING-BASED FLOOD FORECASTING IN KAZAKHSTAN REGIONS

Floods remain one of the most damaging natural hazards affecting the regions of Kazakhstan, with the spring events of 2024 highlighting the urgent need for digital early-warning tools that deliver region-specific forecasts directly to end users. Existing solutions are typically designed for scientific communities and require dedicated software, which limits their use by municipal authorities and the general public. This situation defines the relevance of developing an integrated, modular platform that combines data ingestion, machine learning, and notification delivery within a single system.

This paper presents the design and prototype implementation of a flood forecasting web platform composed of five loosely coupled components: a Flask-based server core with a REST API, a gradient boosting classifier built on LightGBM, a web interface with an interactive SVG map of Kazakhstan, a Telegram bot for personalized alerts, and an RSS module that surfaces flood-related news from open sources. The system is trained on a 25-year archive of hydrometeorological observations (2000–2024) and classifies flood risk into three levels: safe, warning, and danger.

The scientific novelty consists in the formalization of an integration-oriented architecture that connects a machine learning core with two parallel delivery channels web and messenger and an external RSS content layer, adapted to the Kazakhstani context of unevenly digitized hydrological data. The results confirm that a modular design combined with lightweight machine learning provides a practical foundation for accessible regional flood early-warning systems.

Keywords: flood forecasting, modular architecture, machine learning, LightGBM, web platform, early warning system.

Introduction

Flood hazards in Kazakhstan have become increasingly severe over the past decade, with snowmelt floods of spring 2024 affecting more than ten regions and forcing mass evacuations. This situation has exposed a systemic gap between the scientific maturity of flood modeling techniques on the one hand and the operational availability of region-specific early-warning tools on the other. The growing frequency of such events, combined with uneven digitization of national hydrological records, defines the high practical relevance of flood forecasting platforms that can operate under realistic data constraints and communicate results directly to non-technical end users.

A substantial body of international literature addresses individual building blocks of modern flood forecasting. Studies devoted to coupling meteorological and hydrological models emphasize that forecast skill depends primarily on the quality of precipitation input and on the speed at which hydrological states are updated with incoming data [1]. Pancontinental systems such as the European Flood Awareness System (EFAS) have shown the feasibility of large-scale, cross-border forecasting but require complex computational infrastructure and coordinated institutional support [2]. Web-oriented prototypes built around the Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System (HEC–HMS) have demonstrated the value of interactive visual interfaces as a bridge between specialists and decision makers [3]. Hybrid approaches combining process-based hydrology with machine learning have been proposed to correct systematic biases and to handle non-linear dependencies in the input data [4; 5].

Despite this progress, a clear gap persists between conceptual forecasting models and user-oriented platforms that can be deployed under real-world constraints in developing national contexts. Most existing solutions focus on the forecasting engine itself and provide only limited support for downstream delivery channels, region-level granularity, or integration with public information sources [6]. Experimentally validated platforms that combine decentralized data access, transparent forecast presentation, and mobile notification delivery remain scarce, particularly in the Kazakhstani setting, where hydrological archives are often distributed across heterogeneous formats and reference sources [7].

The research problem addressed in this paper is the need to design and implement an integrated flood forecasting platform that connects a machine learning (ML) analytical core with multiple user-facing delivery channels, while remaining accessible to users without specialized technical background and deployable under the current state of national hydrological data infrastructure.

The object of the research is software platforms for regional flood forecasting. The subject of the research is the modular architecture of a web-based flood forecasting system that integrates a Light Gradient-Boosting Machine (LightGBM)

analytical core, a web interface, a Telegram bot, a Representational State Transfer (REST) API layer, and an RSS aggregation module.

The aim of this study is to design and describe a modular software architecture for a regional flood forecasting platform oriented toward end users in Kazakhstan. The following tasks are addressed: (1) formulation of architectural requirements based on the analysis of existing solutions; (2) specification of functional components and their technological stack; (3) design of the interaction model between the components and the underlying database schema; (4) description of the implemented user interfaces - web and Telegram; and (5) critical analysis of the advantages and limitations of the proposed approach.

The scientific novelty of the study consists in the formulation of an integration-oriented modular architecture that explicitly separates analytical, delivery, and contextual content layers and connects them through a single REST integration point, adapted to the data constraints of the Kazakhstani context. Unlike works focused on improving individual forecasting algorithms, this research emphasizes the system-level engineering perspective and the role of delivery channels as a first-class architectural concern.

Materials and methods

This section describes the data sources, the analytical model, the technological stack, and the design principles applied to the proposed flood forecasting platform. The description emphasizes reproducibility and consistency between architectural decisions and experimental artifacts.

The input data layer relies on open hydrometeorological records published by the national hydrometeorological service of Kazakhstan and covers the period from 1 January 2000 to 31 December 2024 [8]. The archive includes daily observations grouped into five parameter families: water level (cm), discharge (m³/s), snow cover and snow depth, precipitation (mm), and air temperature (mean, maximum, minimum, °C). Observations were originally distributed across 80 separate Excel files, organized by region and parameter. During ingestion, date values were normalized to ISO 8601 format, and numeric fields using comma-based decimal separators were converted to floating-point representation.

The heterogeneous source files were consolidated into a single tabular dataset augmented with two derived fields. The first derived field is the regulatory danger level for each hydrological station. The second field, referred to as the danger gap, is defined as the signed difference between the observed water level and that danger level and is computed according to formula (1):

$$d_i = f_i - d_i \quad (1)$$

where d_i is the danger gap on day i ; f_i is the measured (factual) water level on day i ; d_i is the regulatory danger level of the hydrological station (expressed in centimeters). The sign and magnitude of d_i drive the ordinal target label used for classification.

Preprocessing included deduplication, handling of missing values through explicit NaN assignment and filtering by the (station, date) key, type coercion, and chronological sorting. Prior to model training, rolling features were computed over a seven-day window for every input parameter. For an arbitrary feature x , the seven-day rolling mean is defined according to formula (2):

$$\mu_i^{(7)} = \left(\frac{1}{7}\right) \cdot \sum_{k=i-6}^i x_k, \quad k = i - 6 \dots i$$

where $\mu_i^{(7)}$ denotes the rolling mean of feature x computed for day i over the seven preceding days (including day i); x_k is the observed value of the feature on day k .

In a similar manner, the seven-day rolling sum and the seven-day lagged difference are defined according to formulas (3) and (4):

$$S_i^{(7)} = \sum_{k=i-6}^i x_k, \quad k = i - 6 \dots i \quad (3)$$

$$\Delta_i^{(7)} = x_i - x_{i-7} \quad (4)$$

The rolling features are computed independently for every station group, so that statistics of one region do not contaminate those of another. The three rolling statistics together capture, respectively, the average hydrometeorological state of the past week, its cumulative intensity, and its weekly trend - the three complementary temporal signals that inform the classifier about the dynamics of the catchment.

The forecasting engine is implemented as a multiclass classifier based on gradient boosting over decision trees (GBDT) in the LightGBM framework, selected for its high training speed and low memory footprint on tabular data [9]. Three target classes are defined: class 0 - safe, class 1 - warning, class 2 - danger. The model is a sum of M regression trees trained sequentially, where at each iteration a new tree approximates the negative gradient of the loss function. For multiclass classification with $K = 3$ classes, three parallel ensembles are trained simultaneously, one per class; their raw outputs are then transformed into class probabilities by the softmax function given in formula (5):

$$P(y = c | x) = \frac{\exp(F^c(x))}{\sum_j \exp(F^j(x))}, \quad j = 0 \dots K - 1 \quad (5)$$

where $P(y = c | x)$ is the predicted probability that object x belongs to class c ; $F^c(x)$ is the cumulative raw score produced by the ensemble associated with class c ; K is the total number of classes (here $K = 3$).

The training objective minimizes the multiclass cross-entropy loss defined in formula (6), which penalizes the model proportionally to the negative logarithm of the probability assigned to the true class:

$$L = -\left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_i \sum_c 1\{y_i = c\} \cdot \log P(y = c | x_i) \quad (6)$$

where N is the number of training samples; y_i is the true class label of sample i ; and $1\{\cdot\}$ is the indicator function equal to one when its argument is true and zero otherwise.

The dataset is split into training and test subsets at an 80/20 ratio with stratification by the target label. Class imbalance - inherent to rare flood events - is addressed through the `class_weight='balanced'` option, which reweights each sample inversely proportional to the frequency of its class during the computation of the loss. To evaluate classification quality under imbalance, per-class Precision, Recall, and F1 scores are computed according to formulas (7), (8), and (9):

$$\text{Precision} = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (7)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (8)$$

$$F1 = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{(\text{Precision} + \text{Recall})} \quad (9)$$

where TP (true positives) is the number of correctly predicted positive cases; FP (false positives) is the number of negative cases incorrectly predicted as positive; and FN (false negatives) is the number of positive cases missed by the model. The F1 score is the harmonic mean of Precision and Recall and is especially informative when class distributions are strongly skewed.

Instead of relying on the default threshold of 0.5, the decision rule is formulated with an explicitly optimized threshold t , selected to maximize the F1

score of the warning class. For a sample with predicted probabilities (p_0, p_1, p_2) corresponding to safe, warning, and danger classes respectively, the final class label \hat{y} is assigned according to formula (10):

$$\hat{y} = \begin{cases} 1 & \text{if } p_1 > t; \\ 2 & \text{if } p_2 > p_0; \\ 0 & \end{cases} \quad (10)$$

The threshold t is determined through a grid search over the interval $[0.00; 1.00]$ with a step of 0.05. For each candidate value, Precision, Recall, and F1 are recalculated on the test set, and the value that maximizes the F1 score on the warning class is retained as the operational threshold. This strategy compensates for the rarity of critical events in the training set and improves sensitivity to warning-level conditions without a significant loss in accuracy for the remaining classes.

The platform is implemented as a Flask application in Python, internally organized into five logically separated modules. The server core exposes the REST API and communicates with an SQLite database. The trained model is serialized with the joblib library and loaded at application startup. The client-side layer is built with plain HyperText Markup Language (HTML), Cascading Style Sheets (CSS), and JavaScript (JS); the interactive map of Kazakhstan is implemented in SVG. The Telegram bot is developed using the python-telegram-bot library and connects to the same database. News ingestion relies on the feedparser library, which processes RSS feeds from Kazakhstani information portals. Real-time weather context for the selected region is requested from the public OpenWeatherMap API.

The architecture follows well-established modular design principles observed in applied information systems, including loose coupling of components, clear separation of concerns, a single data access point exposed as a REST API, and the possibility of independent deployment of each module [10]. The quality of the predictive model is evaluated through statistical analysis of the confusion matrix with per-class Precision, Recall, and F1 scores, while the API is validated through HTTP requests to the `/api/forecast`, `/api/update_forecast`, and `/api/news` endpoints.

Results and discussion

This section presents the main architectural and implementation outcomes of the study, supported by tables and figure references. The results are organized around the overall system structure, the database schema, the REST integration layer, the forecasting model, and the delivery interfaces.

The system consists of five functional modules that interact through a central Flask application and a shared SQLite database (Figure 1). This organization unifies data flows: raw meteorological records enter the database, the LightGBM model retrieves them to produce forecasts, and the resulting predictions are consumed both by the web interface for visualization and by the Telegram bot

for notification delivery. The composition of the modules and their roles are summarized in Table 1.

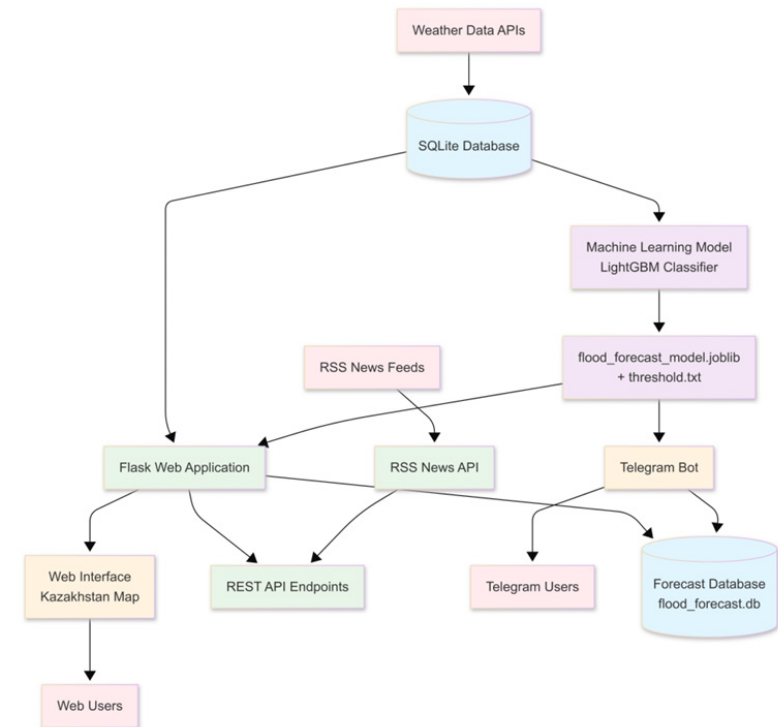


Figure 1 – Generalized interaction scheme of the platform modules

Table 1 – Functional components of the platform

Component	Technology	Purpose
Server core	Python, Flask	HTTP request handling, routing, REST API
Forecasting model	LightGBM, joblib	Classification of regional flood risk levels
Web interface	HTML, CSS, JS, SVG	Interactive map of Kazakhstan; forecast and news display
Telegram bot	python-telegram-bot	Region subscription and personalized notifications

Component	Technology	Purpose
Storage	SQLite	Unified storage of weather data and forecast outputs

The database contains two related tables. The `weather_data` table stores raw and preprocessed observations (fields: region, date, precipitation, snow_cover, snow_height, temp_avg, temp_max, temp_min, discharge, level, danger_level, difference). The `flood_forecast` table stores the model outputs: region identifier, forecast date, predicted risk class (`flood_pred`), and three probability estimates (`proba_0`, `proba_1`, `proba_2`). The relation between the tables is established by the composite key (region, date), which allows pairing each prediction with the underlying conditions for later retrospective analysis (Figure 2).

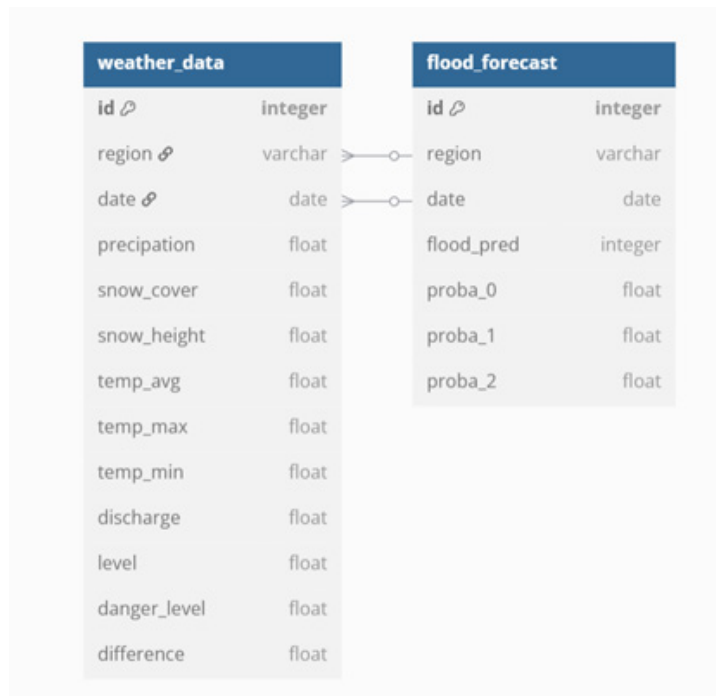


Figure 2 – Entity-Relationship (ER) diagram of the platform database

The application exposes three primary endpoints. The `GET /api/forecast` endpoint returns the current set of region-level forecasts as JSON and is consumed by the client-side code to colorize the SVG map. The `POST /api/update_forecast` endpoint triggers a full recomputation cycle: for each region, the server loads

the most recent seven days of observations from the database, passes them to the `predict` function, and persists the result in the `flood_forecast` table. The `GET /api/news` endpoint queries the `rss_news` module and returns a filtered list of flood-related news items. This design enforces a clear separation of responsibilities: the frontend never accesses the database directly, and the model has no awareness of the delivery channel.

The analytical core is built around a LightGBM multiclass classifier that consumes a feature vector formed from the seven-day rolling statistics (mean, sum, and lagged difference) computed for each hydrometeorological parameter of the corresponding region. For every region and every forecast date, the input layer loads the most recent seven daily observations from the `weather_data` table, reconstructs the rolling features, and passes the resulting vector to the model. The model outputs three class probabilities (p_0, p_1, p_2), which are subsequently transformed into an operational risk label through the decision rule defined in formula (10). The predicted label and the three probabilities are persisted in the `flood_forecast` table, from where they are consumed by the web interface and by the Telegram bot.

The model was trained using the gradient boosting decision tree algorithm with the multiclass objective and softmax link function. During training, the gradient and the hessian of the cross-entropy loss (formula 6) are computed at each iteration, and a new regression tree is added to approximate their combined signal for every class. The main hyperparameters of the trained model are summarized in Table 2.

Table 2 – Main hyperparameters of the LightGBM forecasting model

Hyperparameter	Value	Role
objective	multiclass	Defines softmax-based multiclass classification
num_class	3	Safe, warning, danger
metric	multi_logloss	Monitored during training iterations
boosting_type	gbdt	Traditional gradient boosting decision trees
learning_rate	0.05	Shrinkage applied to each added tree
num_leaves	31	Maximum number of leaves per tree
max_depth	-1 (unlimited)	Tree depth is controlled via num_leaves
n_estimators	500	Upper bound on boosting iterations
class_weight	balanced	Compensates for class imbalance in loss
random_state	42	Reproducibility of training and splits
train / test split	80 / 20, stratified	Stratification preserves class proportions

The trained model is serialized to disk using the joblib library together with the optimized decision threshold; together they form the artifact consumed by the /api/update_forecast endpoint during operation. The full prediction pipeline executed at request time follows five sequential steps: (1) the application retrieves the last seven days of observations for the target region from the SQLite database; (2) rolling statistics are recomputed in memory using formulas (2)-(4); (3) the resulting feature vector is passed to the model, which returns the raw class scores; (4) softmax (formula 5) converts the scores into probabilities; and (5) the decision rule (formula 10) with the optimized threshold assigns the final risk label.

To justify the choice of LightGBM, it was compared with alternative algorithms - logistic regression, a single decision tree, random forest, and XGBoost - across training speed, test-set quality, and memory footprint. The consolidated comparison is presented in Table 3.

Table 3 – Comparative characteristics of machine learning models

Model	Strengths	Limitations	Role in the project	Notes
Logistic regression	Simplicity, interpretability	Limited capacity for non-linearities	Baseline model	Baseline, underperforms on complex pattern
Decision tree	Transparent rules	Prone to overfitting	Control model for comparison	Used for comparison, prone to variance [10]
Random forest	Noise robustness	Slower inference	Close to LightGBM in quality	Performs well, but less efficient than LGBM [11]
XGBoost	Strong performance on tabular data	Tuning-sensitive	Alternative, inferior in speed	Similar to LightGBM, slightly slower [12]

Model	Strengths	Limitations	Role in the project	Notes
LightGBM	Training speed, low memory footprint	Lower interpretability	Selected as the main model	Best choice: Fast and accurate for tabular data [13]

A distinctive feature of the implementation is the F1-driven threshold selection procedure. Instead of relying on the default threshold of 0.5, the algorithm sweeps values between 0.00 and 1.00 with a step of 0.05 and applies a custom labeling rule: if the probability of the warning class exceeds the threshold, class 1 is assigned; otherwise, if the probability of danger exceeds the probability of safety, class 2 is assigned; in all remaining cases the prediction is class 0. This strategy compensates for the rarity of critical events in the training set and improves sensitivity to warning-level conditions without a significant loss in accuracy for the other classes.

The landing page, shown in Figure 3, is organized around an interactive Scalable Vector Graphics (SVG) map of Kazakhstan, in which each region is rendered as a clickable element and colored according to the current forecast: green for the safe class, orange for warning, and red for danger. Selecting a region opens a side panel with the forecast date, a textual status label, and the three class probabilities. The upper area of the screen hosts a weather widget that displays the current temperature, textual weather description, and an icon retrieved from the public OpenWeatherMap Application Programming Interface (API). The right-hand column is reserved for the flood-related news feed produced by the Really Simple Syndication (RSS) aggregation module. A call-to-action link inviting users to subscribe via Telegram is placed in the left sidebar.

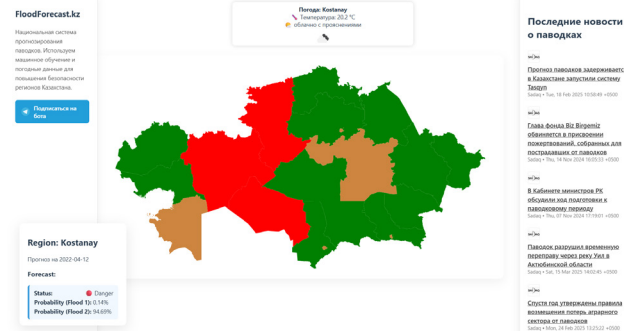


Figure 3 – Main screen of the web interface with the interactive regional map

The bot, illustrated in Figure 4, follows a one-device, one-region interaction pattern. On the first /start command, the bot sends a welcome message and prompts the user to select a region through a custom keyboard that lists 19 administrative units. Once the selection is confirmed, the (chat_id, region) pair is stored in the process memory. A background task polls the flood_forecast table at a fixed interval and, upon detecting a class 1 or class 2 prediction for the subscribed region, triggers a structured alert containing brief safety recommendations. Message formatting uses Markdown, and emojis are applied to visually emphasize the severity level.

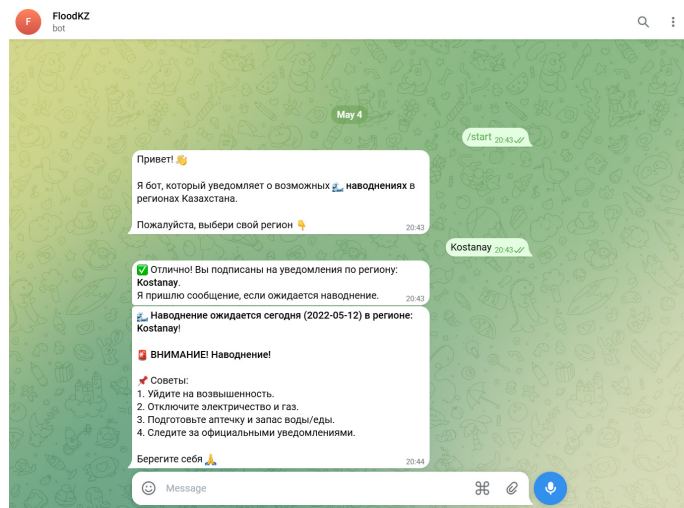


Figure 4 – Telegram bot interface: region selection and alert delivery

The rss_news module periodically queries RSS feeds of the Sadaq.kz and Radio Azattyq news portals. Each incoming entry is checked against a list of flood-related keywords. Entries that pass the filter are normalized into a unified structure containing the title, source, publication date, summary, optional image, and publisher logo, and are then sorted by publication time. The resulting feed is exposed through the /api/news endpoint and rendered in the sidebar of the web interface as a list of clickable headlines, enriching the forecast view with relevant real-world context.

A comparative assessment with existing forecasting solutions shows that many current systems concentrate on the forecasting engine itself and provide limited support for downstream delivery channels or for deployment under constrained data infrastructure. In contrast, the proposed solution elevates delivery channels and integration boundaries to first-class architectural concerns, which better reflects the needs of municipal stakeholders and end users in the Kazakhstani context. The integration-oriented architecture makes the platform extensible: additional data sources, alternative ML algorithms, or new notification channels can be incorporated without rebuilding the existing modules. The results obtained align with the broader trend in modern hydrological forecasting literature toward modular, data-driven systems, while the explicit separation of the REST API as a single integration point distinguishes the proposed design from monolithic prototypes built around HEC-HMS or large-scale centralized systems such as EFAS.

Conclusions

The conducted study confirms that regional flood forecasting in Kazakhstan can be effectively addressed through a modular software architecture that integrates a machine learning analytical core with user-facing delivery channels and open contextual information sources. The resulting platform unifies five independent functional layers: a Flask server core, a LightGBM forecasting model, a web interface based on an interactive SVG map, a Telegram bot, and an RSS aggregation module connected through a single REST integration point and backed by a shared SQLite storage.

The main contributions of this work can be summarized as follows. First, a generalized architectural scheme was developed that supports independent replacement of components without rebuilding the platform. Second, a relational database schema with two linked tables was designed to store meteorological observations and forecast outputs in a unified form. Third, a complete end-to-end data processing cycle was implemented, from observation ingestion to end-user notification. Fourth, the choice of LightGBM as the main forecasting algorithm was justified, and an F1-driven decision threshold optimization procedure was

proposed. Fifth, two parallel delivery channels were provided a web interface for exploratory viewing and a Telegram bot for personalized alerts.

Further research will focus on extending the data layer with satellite-derived products and automatic weather station feeds, adopting ensemble forecasting with explicit uncertainty quantification, migrating the platform to a distributed microservice deployment model, and integrating additional notification channels such as SMS and email. Particular attention will be paid to organizing a continuous retraining pipeline so that the forecasting model stays aligned with the evolving hydrometeorological regime of the region

REFERENCES

1. Bartholmes, J., Todini, E. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2005. – № 4. – P. 333–346. – <https://doi.org/10.5194/hess-9-333-2005>.
2. De Roo, A. P., Gouweleuw, B., Thielen, J. Development of a European flood forecasting system // *International Journal of River Basin Management*. – 2003. – № 1. – P. 49–59. – <https://doi.org/10.1080/15715124.2003.9635192>.
3. Lin, Q., Lin, B., Zhang, D., Wu, J. Web-based prototype system for flood simulation and forecasting based on the HEC-HMS model // *Environmental Modelling & Software*. – 2022. – Vol. 158. – P. 105541. – <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105541>.
4. Kan, G., Liang, K., Yu, H. Hybrid machine learning hydrological model for flood forecast purpose // *Open Geosciences*. – 2020. – Vol. 12. – № 1. – P. 813–820. – <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0166>.
5. Koutsovili, E. I., Tzoraki, O., Theodossiou, N., Tsekouras, G. E. Early flood monitoring and forecasting system using a hybrid machine learning-based approach // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2023. – Vol. 12. – № 11. – P. 464. – <https://doi.org/10.3390/ijgi12110464>.
6. Al-Sabhan, W., Mulligan, M., Blackburn, G. A. A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW. *Computers, Environment and Urban Systems*. – 2003. – Vol. 27. – № 1. – P. 9–32. – [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00010-2).
7. García-Pintado, J., Mason, D. C., Dance, S. L. Satellite-supported flood forecasting in river networks: A real case study // *Journal of Hydrology*. – 2015. – Vol. 523. – P. 706–724. – <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.084>.
8. Niazkar, M., Menapace, A., Brentan, B. Applications of XGBoost in water resources engineering // *A systematic literature review*. – 2024. – Vol. 174. – P. 105971. – <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.105971>.

9. Bathelt, F., Lorenz, S., Weidner, J. Application of modular architectures in the medical domain: A scoping review. *Journal of Medical Systems*. – 2025. – Vol. 49. – № 1. – P. 27. – <https://doi.org/10.1007/s10916-025-02158-3>

10. Beacom, E. Considerations for running and interpreting a binary logistic regression analysis—a research note // *DBS Business Review*. – 2023.

11. Costa, V. G., and Pedreira, C. E. Recent advances in decision trees: An updated survey // *Artificial Intelligence Review*. – 2023. – Vol. 56. – № 5. – P. 4765–4800.

12. Sun, Z., Wang, G., Li, P., Wang, H., Zhang, M., Liang, X. An improved random forest based on the classification accuracy and correlation measurement of decision trees. *Expert Systems with Applications*. – 2024. – Vol. 237.

13. Niazkar, M., Menapace, A., Brentan, B., Piraci, R., Jimenez, D., Dhawan, P., Righetti, M. Applications of xgboost in water resources engineering // *Environmental Modelling & Software*. – 2024. – Vol. 174. – № 105971.

14. Zakharov, V. Yu., Smagulov, E. B., Nadirov, N. K. Sistema prognozirovaniya pavorodkov na osnove meteorologicheskikh dannyykh i gidrologicheskikh modeley // *Vestnik Torajgyrov universiteta. Seriya: Fizika, matematika i komp'yuternye nauki*. – 2025. – № 3. – P. 6–13.

Received 28.04.26.

Received in revised form 30.04.26.

Accepted for publication 03.06.26.

*Н. Қ. Нәдіров¹, Н. М. Тәубақабыл²

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

28.04.26 ж. баспаға түсті.

30.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАН Өңірлерінде Машиналық Оқытуға Негізделген Су Тасқынын Болжаудың Модульдік Веб-Платформасының Сәулеті

Су тасқындары Қазақстан өңірлеріне ең көп залал келтіретін табиғи қауіптердің бірі болып табылады, ал 2024 жылғы көктемгі су тасқыны оқиғалары өңірлік болжамдарды түпкі пайдаланушыларға тікелей жеткізетін сандық ескерту құралдарын әзірлеудің кезек күттірмейтін қажеттілігін көрсетті. Қолданыстағы шешімдер, әдетте, ғылыми қауымдастыққа бағытталған және мамандандырылған бағдарламалық қамтамасыз етуді талап етеді,

бұл муниципалдық органдар мен халықтың оларды пайдалануын шектейді. Осы жағдай деректерді жинауды, машиналық оқытуды және хабарлама жеткізуді біртұтас жүйеге біріктіретін интеграцияланған модульдік платформаны әзірлеудің өзектілігін айқындайды.

Мақалада әлсіз байланысты бес компоненттен тұратын су тасқынын болжау веб-платформасының жобасы мен прототиптік деңгейдегі іске асырылуы ұсынылады: REST API бар Flask негізіндегі серверлік өзек, LightGBM негізіндегі градиенттік бустинг классификаторы, Қазақстанның интерактивті SVG-картасы бар веб-интерфейс, жеке хабарламаларға арналған Telegram-бот және ашық дереккөздерден су тасқынына қатысты жаңалықтарды жинайтын RSS-модуль. Жүйе 2000–2024 жылдардағы 25 жылдық гидрометеорологиялық бақылаулар массивінде оқытылған және су тасқыны қаупін үш деңгей бойынша жіктейді: қауіпсіз, ескерту, қауіпті.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы машиналық оқытуға негізделген талдамалық өзекті екі параллель жеткізу арнасымен веб және мессенджер және сыртқы RSS контент қабатымен байланыстыратын интеграцияға бағытталған сәулетті ресімдеуде көрінеді, ол Қазақстанның біркелкі цифрландырылмаған гидрологиялық деректерінің контекстіне бейімделген. Нәтижелер модульдік тәсіл жеңіл машиналық оқытумен үйлесімде өңірлік су тасқынының ерте ескерту жүйелерінің қолжетімді негізін қамтамасыз ететінін растайды.

Кілтті сөздер: су тасқынын болжау, модульдік сәулет, машиналық оқыту, LightGBM, веб-платформа, ерте ескерту жүйесі.

*Н. Қ. Нәдіров¹, Н. М. Тәубақабыл²

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

Поступило в редакцию 28.04.26.

Поступило с исправлениями 30.04.26.

Принято в печать 03.06.26.

АРХИТЕКТУРА МОДУЛЬНОЙ ВЕБ-ПЛАТФОРМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАВОДКОВ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕГИОНОВ КАЗАХСТАНА

Паводки остаются одним из наиболее разрушительных природных явлений, затрагивающих регионы Казахстана, а весенние события 2024 года продемонстрировали острую необходимость в цифровых инструментах раннего оповещения, доставляющих региональные прогнозы непосредственно конечным пользователям. Существующие решения, как правило, ориентированы на научное сообщество и требуют специализированного программного обеспечения, что ограничивает их использование муниципальными органами и широкой общественностью. Данная ситуация определяет актуальность разработки интегрированной модульной платформы, объединяющей в едином контуре сбор данных, машинное обучение и доставку уведомлений.

В статье представлены проектирование и прототипная реализация веб-платформы прогнозирования паводков, состоящей из пяти слабосвязанных компонентов: серверного ядра на Flask с REST API, классификатора градиентного бустинга на базе LightGBM, веб-интерфейса с интерактивной SVG-картой Казахстана, Telegram-бота для персональных уведомлений и модуля агрегации RSS-новостей по паводковой тематике из открытых источников. Система обучена на 25-летнем массиве гидрометеорологических наблюдений (2000–2024 гг.) и классифицирует паводковый риск по трём уровням: «безопасно», «предупреждение», «опасность».

Научная новизна состоит в формализации интеграционно-ориентированной архитектуры, связывающей аналитическое ядро машинного обучения с двумя параллельными каналами доставки веб и мессенджер и внешним контентным слоем RSS, применительно к казахстанскому контексту неравномерно оцифрованных гидрологических данных. Результаты подтверждают, что модульный подход в сочетании с лёгкими методами машинного обучения формирует практическую основу для доступных региональных систем раннего предупреждения о паводках.

Ключевые слова: прогнозирование паводков, модульная архитектура, машинное обучение, LightGBM, веб-платформа, система раннего оповещения.

FTAMP 28.23.29

DOI

***Ә. Р. Рымеалиев¹, Н. К. Токжигитова², Ә. Р. Рымеалиева³**

^{1,2}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

³Марғұлан университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7947-1539>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3777-6454>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0032-0731>

*e-mail: alisher.rymgaliyev@mail.ru

ПАЙДАЛАНУШЫЛАРҒА ҚЫЗМЕТ КӨРСЕТУ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН WEB-САЙТ ФУНКЦИОНАЛЫНА ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТТІ ИНТЕГРАЦИЯЛАУ

Қазіргі цифрлық кеңістікте веб-сайттар ұйымдар мен пайдаланушылар арасындағы өзара әрекеттесудің негізгі құралына айналады. Жасанды интеллектті пайдалану қызмет көрсету процестерін автоматтандыруға, пайдаланушылардың мінез-құлқын талдауға және көрсетілетін қызметтердің сапасын арттыруға жаңа мүмкіндіктер ашады. ЖИ технологияларын веб-сайттардың функционалдығына біріктіру нақты уақыт режимінде пайдаланушылардың қажеттіліктеріне бейімделе алатын интеллектуалды өзара әрекеттесу ортасын құруға мүмкіндік береді. Бұл тұжырымдаманы қолдану веб-ресурстардың функционалдығын едәуір кеңейтуге және олардың жұмыс тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Бұл мақалада ЖИ-ды веб-сайттың жұмысына біріктірудің негізгі тәсілдері қарастырылады және оны практикалық қолдану мүмкіндіктері талданады. Атап айтқанда, пайдаланушы сұраныстарын автоматты түрде өңдеу, мазмұнды жекелеңдіру, деректерді өндіру және онлайн-кеңес беру жүйелерін іске асыру мәселелері қамтылған. Табиғи тілді өңдеу және машиналық оқыту алгоритмдерін қолдануды қоса алғанда, ЖИ шешімдерін енгізудің технологиялық аспектілері де қарастырылады. Сонымен қатар, мақалада пайдаланушыларға қызмет көрсету сапасын жақсарту, бизнес-процестерді оңтайландыру және қолдау қызметкерлеріне жүктемені азайту үшін ЖИ-ды қолданудың практикалық маңыздылығы көрсетілген. Зияткерлік веб-жүйелерді одан әрі

дамыту перспективаларына және оларды қолдану аясын кеңейтуге ерекше назар аударылады.

Кілтті сөздер: жасанды интеллект, веб-сайт, табиғи тілді өңдеу, пайдаланушы тәжірибесі, чат-бот.

Кіріспе

Жасанды интеллект заманауи цифрлық трансформацияның негізгі технологияларының бірі болып табылады және процестерді автоматтандыруға, ақпараттық жүйелердің тиімділігін арттыруға жаңа мүмкіндіктер береді. Соңғы жылдары ЖИ-ды веб-сайттарда қолдану мәселесі көптеген зерттеушілердің назарында болып отыр. Мысалы, бірқатар еңбектерде ЖИ-дың пайдаланушылармен өзара әрекеттесуді автоматтандырудағы рөлі, чат-боттарды қолдану және деректерді интеллектуалды талдау әдістері қарастырылған [1]. Сонымен қатар, табиғи тілді өңдеу және машиналық оқыту технологияларын веб-қызметтерге енгізу мүмкіндіктері де зерттелген.

Интернет-технологиялардың белсенді дамуы жағдайында веб-сайттар ұйымдар мен пайдаланушылар арасындағы өзара іс-қимылдың негізгі құралына айналды. Алайда көптеген зерттеулерде ЖИ-ды қолдану жалпы теориялық немесе дайын платформалар деңгейінде қарастырылып, нақты веб-сайтқа бейімделген практикалық шешімдер жеткілікті деңгейде зерттелмеген. ЖИ технологиялары веб-сайттарға ақпаратты көрсетіп қана қоймай, пайдаланушы сұрауларына интеллектуалды талдау жасауға, мазмұнды бейімдеуге және автоматты түрде консультациялық қолдау көрсетуге мүмкіндік береді. Бұл бағытта интеллектуалды чат-боттарды пайдалану ерекше маңызға ие, себебі олар пайдаланушылармен тікелей өзара әрекеттесуді қамтамасыз етеді.

Осы зерттеудің ғылыми жаңалығы веб-сайтқа интеграцияланған ЖИ негізіндегі чат-ботты әзірлеу және оның пайдаланушыларға қызмет көрсету тиімділігіне әсерін талдаумен байланысты. Ұсынылған шешім дайын сервистерді қолданумен шектелмей, нақты веб-платформаға бейімделген интеллектуалды жүйені құруға бағытталған.

Осы зерттеудің ғылыми жаңалығы веб-сайтқа интеграцияланған ЖИ негізіндегі чат-ботты әзірлеу және оның пайдаланушыларға қызмет көрсету тиімділігіне әсерін талдаумен байланысты. Ұсынылған шешім дайын сервистерді қолданумен шектелмей, нақты веб-платформаға бейімделген интеллектуалды жүйені құруға бағытталған. Зерттеу барысында пайдаланушылармен өзара әрекеттесудің интеллектуалды ортасын қалыптастыру мүмкіндіктері қарастырылып, ЖИ-ды қолдану арқылы сұраныстарды өңдеу жылдамдығын арттыру, қызмет көрсету сапасын жақсарту және қолдау қызметін оңтайландыру жолдары ұсынылады.

Цифрлық технологиялардың қарқынды дамуы және интернет-ресурстарды пайдаланушылар санының өсуі жағдайында web-сайттарда қызмет көрсету сапасы мен жылдамдығын арттыру қажеттілігі ерекше өзекті болып отыр. Қазіргі пайдаланушылар жедел жауап, жекелендірілген тәсіл және тәулік бойы қолжетімді сервистерді талап етеді. Осыған байланысты ЖИ-ды web-сайттарға енгізу тек қосымша мүмкіндік емес, қазіргі цифрлық жүйелердің тиімді жұмыс істеуінің маңызды шартына айналып отыр.

Материалдар мен әдістері

Web-сайттың функционалында ЖИ-ды қолдану мүмкіндіктерін талдау және зерттеу кезінде ғылыми мақалалар, оқу құралдары, ЖИ технологиялары, Машиналық оқыту және web-әзірлеу бойынша техникалық құжаттама, сондай-ақ зияткерлік ақпараттық жүйелерді әзірлеу саласындағы әртүрлі авторлардың материалдары пайдаланылды. Табиғи тілді өңдеуге, ақылды чатботтарға және пайдаланушыларға қолдау көрсетуді автоматтандыруға арналған дереккөздерге ерекше назар аударылды. Веб-сайтта ЖИ-дың практикалық қолданылуын зерттеу цифрлық қызметтер мен онлайн платформаларда қолданылатын қолданыстағы ЖИ шешімдерін талдау негізінде жүргізілді. ЖИ-ды енгізу тиімділігін бағалау үшін пайдаланушының мінез-құлқын талдау, сұрауларды автоматты түрде өңдеу және мазмұнды жекелендіру әдістері қарастырылды.

Алынған деректерді жүйелеу мақсатында web-жүйеге ЖИ-ды енгізудің қолданыстағы тәсілдеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. ЖИ технологияларын енгізудің күшті және әлсіз жақтарын бағалау үшін SWOT талдауы қолданылды. Алынған нәтижелер зерттеудің мақсаттарын, міндеттері мен бағыттарын анықтау үшін пайдаланылды.

Нәтижелер және талқылау

ЖИ-ды веб-сайттың функционалдығына біріктіру пайдаланушыларға қызмет көрсету тиімділігін арттырудың заманауи шешімін ұсынады. Интеллектуалды алгоритмдерді пайдалану өтініштерді өңдеуді автоматтандыруға, консультациялық қолдау сапасын жақсартуға және пайдаланушылардың web-ресурспен өзара әрекеттесуінің ыңғайлылығын арттыруға мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта ЖИ технологиялары сандық қызметтердің әртүрлі салаларында белсенді қолданылады. Оларды веб-сайттарға енгізу пайдаланушыларға қызмет көрсету мен деректерді талдауға қатысты көптеген мәселелерді шешуге мүмкіндік береді. Веб-сайтта ЖИ-ды пайдаланудың негізгі мүмкіндіктеріне мыналар жатады:

– табиғи тілді өңдеу технологияларын қолдана отырып, пайдаланушы сұраныстарын автоматты түрде өңдеу;

– пайдаланушыларды тәулік бойы қолдау үшін Интеллектуалды чатботтарды енгізу;

– пайдаланушының мінез-құлқы мен қалауын талдау негізінде мазмұнды жекелендіру;

– пайдаланушылардың өтініштерін автоматты түрде жіктеу және бөлу;

– тұтынушылардың қажеттіліктерін болжау үшін пайдаланушы әрекетін талдау;

– зияткерлік жүйелерді қолданыстағы WEB-сайт инфрақұрылымына интеграциялау;

– өтініштерді өңдеу жылдамдығын арттыру және қолдау қызметінің қызметкерлеріне жүктемені азайту;

8) веб-ресурстың тиімділігін арттыру үшін аналитикалық құралдарды пайдалану.

ЖИ-ды практикалық қолдану интеллектуалды жүйелерді енгізу пайдаланушыларға қызмет көрсету деңгейін едәуір арттыруға, көрсетілетін қызметтердің сапасын жақсартуға және бизнес-процестерді оңтайландыруға мүмкіндік беретіндігін көрсетеді. Сонымен қатар, ЖИ-технологияларды пайдалану ұйымдардың бәсекеге қабілеттілігін арттыруға және заманауи цифрлық сервистерді дамытуға ықпал етеді.

ЖИ-ды біріктірудің аталған мүмкіндіктері оны пайдаланушылардың веб-сайтпен өзара әрекеттесуін оңтайландыру үшін тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Интеллектуалды жүйе тек қосымша модульге ғана емес, сонымен қатар пайдаланушының әрекетін автоматтандырылған қолдау мен талдауды қамтамасыз ететін цифрлық платформаның маңызды функционалды элементіне айналады.

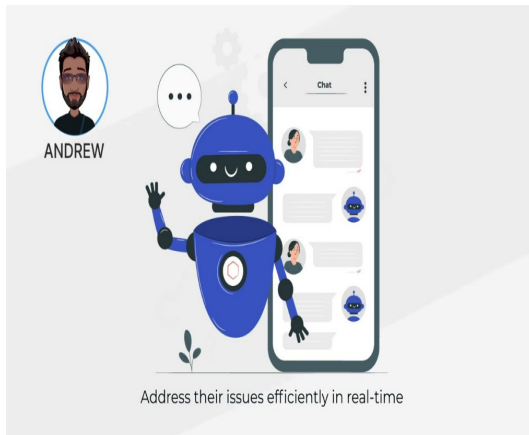
Интеграцияның негізгі компоненттерінің бірі – ақылды чат-боттар (1-сурет). Чат-бот виртуалды кеңесші ретінде әрекет етеді, пайдаланушыларға жедел кері байланыс береді [2]. Ол мәтіндік сұрауларды тануға, олардың мазмұнын талдауға және нақты уақыт режимінде сәйкес жауаптарды қалыптастыруға қабілетті. Бұл құралдың негізгі мақсаты-ақпараттың қолжетімділігін арттыру және жауаптың күту уақытын қысқарту.

ЖИ жүйесінің кең функционалдығы өзара әрекеттесудің әртүрлі сценарийлерін жүзеге асыруға мүмкіндік береді: қарапайым типтік сұрақтарды өңдеуден бастап күрделі пайдаланушы сұрауларын интеллектуалды талдауға дейін. Табиғи тілді өңдеу алгоритмдерін қолдану пайдаланушының ниетін дәлірек түсінуге және логикалық тұрғыдан дұрыс жауаптар қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, ЖИ интеграциясы мазмұнды жекелендіруді жүзеге асыруға мүмкіншілік жасайды. Пайдаланушылардың мінез-құлқын талдау негізінде жүйе сәйкес қызметтерді ұсына алады, материалдарды ұсына алады

немесе интерфейсін жеке қалауларға бейімдей алады. Бұл пайдаланушының оң тәжірибесін қалыптастыруға және web-ресурсқа деген сенім деңгейін арттыруға ықпал етеді.

Деректерді талдаудың интеллектуалды механизмдері ең көп таралған өтініштерді анықтау, пайдаланушылардың қанағаттанушылығын бағалау және олардың қажеттіліктерін болжау үшін де қолданылады. Осылайша, ЖИ-ды пайдалану қызмет көрсету сапасын жақсартып қана қоймайды, сонымен қатар цифрлық платформаның стратегиялық дамуына ықпал етеді [3].



1-сурет – Ақылды чат-бот

ЖИ-дың аналитикалық құралдары пайдаланушы деректерін өңдеу және визуализациялау үшін қолданылады. Олардың негізгі мақсаты – ақпаратты талдау уақытын қысқарту, шешім қабылдаудың дәлдігін арттыру және пайдаланушылардың мінез-құлқындағы заңдылықтарды анықтау. Үлкен деректер массивтерін интеллектуалды өңдеу арқылы ең көп сұранысқа ие қызметтерді, сайттың танымал бөлімдерін және пайдаланушылардың типтік сұрауларын тез анықтауға болады. Аналитикалық көрсеткіштерді Графиктер мен диаграммалар түрінде визуализациялау ақпаратты қабылдауды жеңілдетеді және цифрлық ресурстарды тиімді басқаруға ықпал етеді.

Ақылды жүйелер сонымен қатар пайдаланушылардың веб-сайтпен өзара әрекеттесуі туралы автоматты есептерді қалыптастыруға мүмкіндік береді. Бұл клиенттердің қанағаттану деңгейін бағалауға, өтініштердің жиілігін талдауға және қызмет жұмысындағы проблемалық аймақтарды анықтауға мүмкіндік береді. Нәтижесінде менеджмент стратегиялық жоспарлау және бизнес-процестерді оңтайландыру үшін объективті деректерді алады.

Сонымен қатар, ЖИ интеграциясы ұсынымдық жүйелерді енгізу арқылы веб-сайттың функционалдығын кеңейтеді. Пайдаланушының алдыңғы әрекеттерін талдау негізінде жүйе тиісті мазмұнды, қызметтерді немесе өнімдерді ұсына алады. Мұндай жекелендірілген тәсіл аудиторияның адалдығын қалыптастыруға және пайдаланушылардың белсенділігін арттыруға ықпал етеді [4].

ЖИ маркетингтік процестерді автоматтандыру үшін де қолданыла алады: аудиторияны сегменттеу, жарнамалық науқандардың тиімділігін талдау және пайдаланушы әрекетін болжау [5]. Ақылды алгоритмдерді қолдану маркетингтік стратегиялардың дәлдігін жақсартады және цифрлық ортаның өзгеруіне тезірек бейімделуге мүмкіндік береді.

Осылайша, ЖИ-ды веб-сайттың функционалдығына енгізу тек пайдаланушыларды автоматты түрде қолдаумен шектелмейді. ЖИ технологиялары сандық платформаның жан-жақты дамуын және оның тиімділігін арттыруды қамтамасыз ететін талдаудың, болжаудың және ескелендірудің әмбебап құралына айналады.

Қазіргі таңда әзірленген интеллектуалды жүйе заманауи web технологиялары мен API интерфейстерін пайдалана отырып, веб-сайтқа біріктіріледі. Шешім архитектурасы ЖИ модулін сайт құрылымын бұзбай әртүрлі платформаларға қосуға мүмкіндік береді. Ақылды компонент бұлтты ортада немесе жергілікті серверде жұмыс істей алады, бұл масштабтау икемділігі мен деректерді сақтау қауіпсіздігін қамтамасыз етеді. Барлық пайдаланушы сұраулары нақты уақыт режимінде өңделеді және өзара әрекеттесу деректері жүйені кейінірек талдау және оқыту үшін сақталады [6].

ЖИ-ды енгізудің маңызды артықшылықтарының бірі – CRM-жүйелермен, аналитикалық платформалармен, маркетингтік құралдармен және деректер базаларымен интеграциялану мүмкіндігі [7]. Бұл барлық техникалық қызмет көрсету және талдау процестері үйлесімді жұмыс істейтін бірыңғай цифрлық экожүйені құруға мүмкіндік береді. Заманауи ЖИ шешімдерін жасаушылар интеллектуалды жүйелердің функционалдығын кеңейтіп, олардың жұмысының дәлдігін арттыра отырып, табиғи тілді өңдеу және машиналық оқыту алгоритмдерін үнемі жетілдіріп отырады.

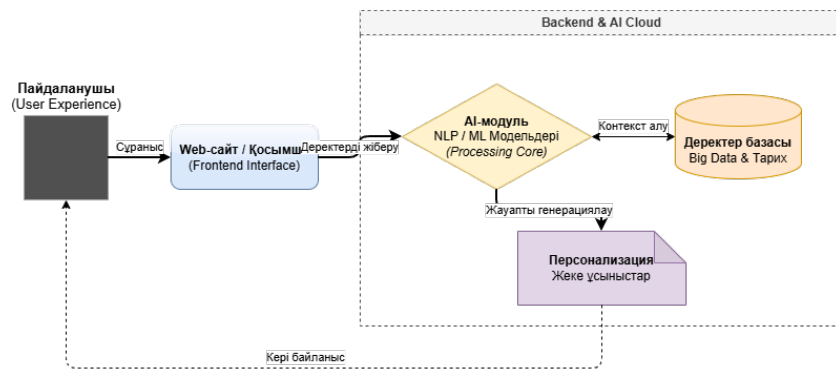
Қазіргі уақытта ЖИ технологиялары маркетингтік стратегияларды іске асыруда, брендті дамытуда және цифрлық коммуникация арналарын қалыптастыруда белсенді қолданылады. Web-сайтқа ЖИ интеграциялау келесі мүмкіндіктерді ашады:

- пайдаланушыларды 24/7 режимінде автоматтандырылған қолдау;
- аудиторияны интеллектуалды сегментациялау;
- тауарлар мен қызметтерге жекелендірілген ұсыныстар беру;
- пайдаланушы мінез-құлқын талдау;

- сұранысты болжау;
- өтініштерді автоматты өңдеу;
- сервистік қызмет көрсетудің тиімділігін арттыру.

Цифрлық экономика жағдайында пайдаланушы тәжірибесі (User Experience, UX) тұжырымдамасының маңызы артып келеді. Бұл тұжырымдама цифрлық өнімнің қолайлылығын, қолжетімділігін және эмоционалдық қабылдануын қарастырады. ЖИ-ды web-сайтқа интеграциялау пайдаланушы тәжірибесін қалыптастыруға тікелей әсер етеді. Пайдаланушылардың мінез-құлқын интеллектуалды талдау арқылы жүйе контент құрылымын бейімдей алады, навигацияны жеңілдетеді және қажетті ақпаратты алу үшін орындалатын әрекеттер санын азайтады. Бұл пайдаланушылардың қанағаттану деңгейін арттырып, цифрлық платформаға деген ұзақ мерзімді сенімді қалыптастырады.

Сонымен қатар, ЖИ технологияларын қолдану деректерге негізделген басқару (data-driven management) тұжырымдамасымен тығыз байланысты (2-сурет). ЖИ-жүйе пайдаланушылардың әрекеттері туралы деректерді жинап, өңдеп, заңдылықтарды анықтайды және контентті, қызметтерді және маркетингтік стратегияларды оңтайландыруға мүмкіндік беретін аналитикалық есептер қалыптастырады. Мұндай тәсіл ұйымдарға аудитория мінез-құлқындағы өзгерістерге жедел жауап беруге, конверсия деңгейін арттыруға және жоғары бәсекелестік жағдайында web-ресурсты тиімді дамытуға мүмкіндік береді [8].



2-сурет – Деректерге негізделген басқару (data-driven management)

Сонымен қатар, веб-сайтта ЖИ-ды қолданудың артықшылықтары мен кемшіліктері, пайдасы мен зияны бар екені анық. Бұны келесідей SWOT-анализ әдісі арқылы көруге болады (1-кесте):

1-кесте – SWOT анализ

Артықшылықтары	Кемшіліктері
<ul style="list-style-type: none"> – Пайдаланушыларға қызмет көрсету автоматтандырылған: ЖИ-чат-боттар және интеллектуалды жүйелер сұрауларға жылдам жауап береді, қолдау қызметкерлерінің жүктемесін азайтады. – Контентті жекелендіру: ЖИ жүйелері әр пайдаланушының қызығушылығына бейімделген ақпарат ұсына алады, бұл пайдаланушының қанағаттануын және сайтқа тартылуын арттырады. – Аналитика және болжамдау: ЖИ пайдаланушы әрекеттері туралы деректерді жинап, өңдейді, бұл сайт жұмысын оңтайландыруға негізделген шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді. – 24/7 жұмыс істеу: интеллектуалды жүйелер тәулік бойы қызмет көрсетеді, сервис тұрақтылығын қамтамасыз етеді. – Масштабталу мүмкіндігі: ЖИ-модульдерді әртүрлі платформаларға оңай интеграциялауға болады және пайдаланушылар саны артқан сайын сапасы төмендемейді. 	<ul style="list-style-type: none"> – Интеграциялау күрделілігі: ЖИ-жүйесін әзірлеу және енгізу уақыт, ресурс және техникалық білімді қажет етеді. – Деректер сапасына тәуелділік: ЖИ жұмысының тиімділігі кіріс деректердің дәлдігі мен толықтығына байланысты. – Түсіндіру шектеулері: ЖИ күрделі немесе стандартты емес пайдаланушы сұрауларын дұрыс өңдемеуі мүмкін.
Пайдасы	Қауіп
<ul style="list-style-type: none"> – Сайт функционалдығын кеңейту: интеллектуалды ұсыныстар, автоматтандырылған хаттар және пайдаланушы әрекеттерінің аналитикасын қосу. – Маркетинг стратегияларын жақсарту: аудиторияны сегменттеу және сұранысты болжау үшін ЖИ қолдану. – Басқа сервистермен интеграция: ЖИ-ді CRM, аналитикалық жүйелер және маркетингтік платформаларға қосу арқылы бірыңғай басқару экожүйесін құру. 	<ul style="list-style-type: none"> – Бәсекелестік және баламалар: web-сайттарға арналған көптеген ЖИ шешімдері бар, оның ішінде бұлттық сервистер мен дайын платформалық шешімдер. – Даму және қолдау шығындарының жоғары болуы: ЖИ модулін енгізу және қолдау қымбатқа түсуі мүмкін, әсіресе шағын бизнестегі компаниялар үшін. – Деректердің құпиялылығы қауіп: пайдаланушы деректерін сақтау және өңдеу заң талаптары мен қауіпсіздік стандарттарын сақтауды талап етеді.

Талдау барысында ЖИ-ды web-сайтқа интеграциялау мүмкіндіктері әртүрлі дереккөздерге сүйене отырып қарастырылды. Атап айтқанда, пайдаланушылардың сұраныстарын өңдеу жылдамдығы, қызмет көрсету сапасы, жүйенің тәулік бойы жұмыс істеу мүмкіндігі, сондай-ақ аналитикалық деректерді жинау және өңдеу қабілеті негізге алынды. Сонымен қатар, жүйені енгізу кезіндегі техникалық күрделілік, деректер сапасына тәуелділік және қауіпсіздік мәселелері де есепке алынды. Бұл талдау теориялық материалдармен қатар, қазіргі web-сайттарда қолданылып жүрген ЖИ шешімдерінің мүмкіндіктерін салыстыру арқылы жүргізілді [9].

Талдау нәтижесінде жасанды интеллектті web-сайтқа енгізу жалпы алғанда тиімді шешім екендігі анықталды. Ол пайдаланушыларға қызмет көрсету сапасын арттырып, жұмыс процестерін автоматтандыруға және бизнес тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді. Дегенмен, жүйені сәтті енгізу үшін сапалы деректер, дұрыс баптау және қауіпсіздік талаптарын сақтау маңызды екені белгілі болды. Осылайша, жасанды интеллект тек қосымша құрал емес, web-сайттың дамуына әсер ететін маңызды технологиялық компонент болып табылады. Осы ретте интеллектуалды жүйені басқа әдістермен салыстырсақ болады. Мысалы, ЖИ-жүйе мен дәстүрлі пайдаланушы қолдауын салыстыру:

ЖИ-ды интеграциялау: пайдаланушылардың сұраныстарын автоматты түрде өңдеуді, тәулік бойы жұмыс істеуді және мазмұнды персонализациялауды қамтамасыз етеді. Пайдаланушылардың әрекеттерін талдау арқылы сайт функционалдығын жақсартуға мүмкіндік береді.

Дәстүрлі қолдау (тірі операторлар): қызметкерлердің көп уақытын талап етеді, жұмыс уақыты шектеулі және жылдам кері байланыс әрдайым қамтамасыз етілмейді. Алайда, адам күрделі немесе ерекше сұраныстарды дұрыс өңдей алады.

ЖИ-жүйе мен сценарийлік немесе FAQ-боттарды салыстыру:

ЖИ-ды интеграциялау: табиғи тілді өңдеу алгоритмдерін қолданады, сұраныстың контекстін түсіне алады және тиісті жауаптар береді. Күрделі сценарийлер мен персонализирленген өзара әрекеттесу үшін тиімді.

Сценарийлік FAQ-боттар: алдын ала берілген сценарий бойынша жұмыс істейді және жаңа немесе ерекше сұраныстарға бейімделе алмайды. Функционалдығы шектеулі және пайдаланушы әрекеттерінен үйрене алмайды.

ЖИ-жүйе мен дайын бұлттық платформаларды салыстыру (мысалы, ManyChat, Tidio, Chatfuel):

Өзінің ЖИ-модулін интеграциялау: сайттың нақты қажеттіліктеріне функционалды икемдеуге мүмкіндік береді, ішкі дерекқорлар мен CRM

жүйелерімен біріктіріледі, сонымен қатар өздерінің талдау алгоритмдерін қолдануға болады.

Дайын платформалар: чат-ботты тез іске қосуға мүмкіндік береді, бірақ функционалдығы шектеулі және терең баптауға аз мүмкіндігі бар.

Әдетте, жеке ЖИ-шешім мен басқа автоматтандыру құралдарының арасындағы таңдау ұйымның мақсаттарына, бюджетіне және функционалдық талаптарына байланысты. Интеллектуалды жүйелерді интеграциялау web-сайтта пайдаланушылармен өзара әрекеттесуді тиімді ету үшін ең перспективалы шешімдердің бірі болып табылады, себебі ол икемділік, аналитикалық мүмкіндіктер және жақсартылған пайдаланушы тәжірибесін қамтамасыз етеді [10].

Қорытынды

Web-сайттың функционалына ЖИ-ды интеграциялау – пайдаланушыларға қызмет көрсету процесін автоматтандырудың заманауи әрі тиімді құралы болып табылады. Интеллектуалды жүйелер, соның ішінде чат-боттар, пайдаланушылардың сұраныстарын нақты дәл осы уақыт режимінде өңдеуге, контентті жекелендіруге және қызмет көрсету сапасын арттыруға айтарлықтай мүмкіндік береді.

Осы зерттеу аясында web-сайтқа енгізілетін ЖИ негізіндегі чат-бот әзірленіп, оның тәжірибелік мүмкіндіктері талданды. Чат-бот пайдаланушылардың сұрақтарына автоматты түрде жауап беріп, қажетті ақпаратты ұсыну және сайт бойынша навигацияны жеңілдету функцияларын орындайды. Жүйені қолдану нәтижесінде пайдаланушылардың сұраныстарына жауап беру уақыты қысқарып, қызмет көрсету тиімділігі едәуір артқаны байқалды. Сонымен қатар, чат-ботты енгізу қызметкерлерге түсетін жүктемені азайтып, жұмыс процесін оңтайландыруға мүмкіндік берді.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ЖИ негізіндегі чат-боттарды web-сайттарға енгізу пайдаланушы тәжірибесін жақсартуға, сервистің қолжетімділігін арттыруға және цифрлық платформаның тиімділігін жоғарылатуға ықпал етеді. Осылайша, ұсынылған шешім қазіргі заманғы web-жүйелерді дамытуда маңызды құрал болып табылады және болашақта оның қолдану ауқымы одан әрі кеңейе түседі.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Рассел, С., Норвиг, П. «Искусственный интеллект: современный подход» [текст] – Диалектика, 2022. – 704 с.

2 Фрид Эндрю. Разговорный искусственный интеллект: чат-боты, которые работают [текст]. – Manning Publications Co., 2021. – 319 с.

3 **Liu, B.** Sentiment Analysis: Mining Opinions, Sentiments, and Emotions [текст] – Cambridge University Press, 2020. – 448 с.

4 **Davenport, T. H.** The AI Advantage: How to Put the Artificial Intelligence Revolution to Work. [текст] – MIT Press, 2029. – 248 с.

5 **Kotler, P., Kartajaya, H., & Setiawan, I.** Marketing 5.0: Technology for Humanity [текст] – John Wiley & Sons, 2021. – 224 с.

6 **Srinivasa-Desikan, B.** Natural Language Processing with Python [текст] – Pack Publishing, 2025. – 599 с.

7 **Davenport, T. H., & Mittal, N.** All-in on AI: How Smart Companies Win Big with Artificial Intelligence [текст] – Harvard Business Review Press, 2023. – 224 с.

8 **Халин, В. Г., Чернова, Г. В., Калайда, С. А.** Риски цифровизации и управление ими [текст] – Управленческое консультирование, 2024. – 67–85 с.

9 **Зуб, А. Т.** Стратегический менеджмент: учебник и практикум для вузов / А. Т. Зуб. – 4-е изд., перераб. и доп. [текст] – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 375 с.

10 **Мехдиев, Э. Т., Борисов, А. А., Ростоцкий, М. В.** Разработка интеллектуального чат-бота для автоматизации ответов и анализа потребностей пользователей: информатика и вычислительная техника [текст] – Журнал «Human Progress». – 2024. – 12 с.

REFERENCES

1 **Russell, S. J., Norvig, P.** «Iskusstvenny`j intellekt: sovremenny`j podxod» [Artificial Intelligence: A Modern Approach] [Text] – Dialektika, 2022. – 704 p.

2 Frid E`ndryu. Razgovorny`j iskusstvenny`j intellekt: chat-boty`, kotory`e rabotayut [Conversational AI: Chatbots that work] [Text] – Manning Publications Co., 2021. – 319 p.

3 **Liu, B.** Sentiment Analysis: Mining Opinions, Sentiments, and Emotions [текст] – Cambridge University Press, 2020. – 448 с.

4 **Davenport, T. H.** The AI Advantage: How to Put the Artificial Intelligence Revolution to Work. [Текст] – MIT Press, 2029. – 248 с.

5 **Kotler, P., Kartajaya, H., & Setiawan, I.** Marketing 5.0: Technology for Humanity [Текст] – John Wiley & Sons, 2021. – 224 с.

6 **Srinivasa-Desikan, B.** Natural Language Processing with Python [текст] – Pack Publishing, 2025. – 599 с.

7 **Davenport, T. H., & Mittal, N.** All-in on AI: How Smart Companies Win Big with Artificial Intelligence [Текст] – Harvard Business Review Press, 2023. – 224 с.

8 **Xalin, V. G., Chernova, G. V., Kalajda, S. A.** Riski cifrovizacii i upravlenie imi [Risks of digitalization and their management] [Text] – Upravlencheskoe konsul' tirovanie. – 2024. – 67–85 p.

9 **Zub, A. T.** Strategicheskij menedzhment: uchebnik i praktikum dlya vuzov [Strategic Management: Textbook and Workshop for Universities] / A. T. Zub. – 4-e izd., pererab. i dop. [Text] – Moskva : Izdatel'stvo Yurajt, 2023. – 375 p.

10 **Mexdiev, E` T., Borisov, A. A., Rostoczkij, M. V.** Razrabotka intellektual`nogo chat-bota dlya avtomatizacii otvetov i analiza potrebnostej pol'zovatelej: informatika i vy`chislitel`naya texnika [Development of an intelligent chatbot for automating responses and analyzing user needs: Computer Science and Computing] [Text] – Zhurnal «Human Progress», 2024. – 12 p.

08.04.26 ж. баспаға түсті.

21.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. Е. Рымғалиев¹, Н. К. Токжигитова², А. Е. Рымғалиева³

^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

³Маргулан университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 08.04.26.

Поступило с исправлениями 21.04.26.

Принято в печать 04.06.26.

ИНТЕГРАЦИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ФУНКЦИОНАЛ WEB-САЙТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

В современном цифровом пространстве веб-сайты становятся основным инструментом взаимодействия между организациями и пользователями. Использование искусственного интеллекта открывает новые возможности для автоматизации процессов обслуживания, анализа поведения пользователей и повышения качества предоставляемых услуг. Интеграция технологий ИИ в функционал веб-сайтов позволяет создать интеллектуальную среду взаимодействия, способную адаптироваться к потребностям пользователей в режиме реального времени. Применение данной концепции дает возможность значительно расширить функциональные возможности веб-ресурсов и повысить эффективность их работы.

В данной статье рассматриваются основные подходы к интеграции ИИ в работу web-сайта и анализируются возможности его практического применения. В частности, освещаются вопросы автоматической обработки пользовательских запросов, персонализации контента, интеллектуального анализа данных и реализации систем онлайн-консультирования. Также рассматриваются технологические аспекты внедрения ИИ-решений, включая использование алгоритмов обработки естественного языка и машинного обучения. Кроме того, в статье показана практическая значимость применения ИИ для повышения качества обслуживания пользователей, оптимизации бизнес-процессов и снижения нагрузки на сотрудников службы поддержки. Особое внимание уделяется перспективам дальнейшего развития интеллектуальных web-систем и расширению сфер их применения.

Ключевые слова: искусственный интеллект, web-сайт, обработка естественного языка, пользовательский опыт, чат-бот.

*A. Y. Rymgaliyev¹, N. K. Tokzhigitova², A. Y. Rymgaliyeva³

^{1,2}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

³Margulan University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 0.04.26.

Received in revised form 21.04.26.

Accepted for publication 04.06.26.

INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO WEB SITE FUNCTIONALITY TO IMPROVE USER SERVICE EFFICIENCY

In today's digital space, websites are becoming the main tool for interaction between organizations and users. The use of artificial intelligence opens up new opportunities for automating service processes, analyzing user behavior, and improving the quality of services provided. The integration of AI technologies into the functionality of websites makes it possible to create an intelligent interaction environment capable of adapting to user needs in real time. The application of this concept makes it possible to significantly expand the functionality of web resources and increase their efficiency.

This article discusses the main approaches to integrating AI into the work of a website and analyzes the possibilities of its practical application. In particular, the issues of automatic processing of user requests, personalization of content, data mining and implementation of

online consulting systems are highlighted. Technological aspects of the implementation of AI solutions, including the use of natural language processing and machine learning algorithms, are also considered. In addition, the article shows the practical importance of using AI to improve the quality of user service, optimize business processes and reduce the burden on support staff. Special attention is paid to the prospects for the further development of intelligent web systems and the expansion of their applications.

Keywords: artificial intelligence, website, natural language processing, user experience, chatbot.

SRSTI 28.23.37

DOI

**N. Smailov¹, *S. Kengesbayeva²,
D. Zhamangarin³, A. Baqytqali⁴**

^{1,4}Satbayev University, Almaty;

²The Pennsylvania State University,
United State America, Pennsylvania.

³Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6568-4536>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2526-6492>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2281-7665>

*e-mail: sarakengesbayeva@gmail.com

MODELING AND ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF C-RAN ARCHITECTURE IN 5G NETWORKS

This paper presents a comprehensive analysis and performance modeling of the Cloud Radio Access Network (C-RAN) architecture within 5G mobile communication networks. The purpose of this research is to evaluate the potential for effective network resource management, and the impact of such management on overall network performance-based on the centralized processing principle inherent to the C-RAN architecture. The study examines the structural characteristics of the C-RAN system and investigates dynamic resource allocation mechanisms facilitated by the centralization of base station functions into a shared Baseband Unit (BBU) pool. Furthermore, the limitations imposed by fronthaul network bandwidth and latency are analyzed, alongside a review of strategies for mitigating these constraints. The research methodology employs both analytical modeling and computer simulation, conducted within the MATLAB environment. The simulations incorporate Massive MIMO technology and assess key system performance metrics such as throughput, latency, network capacity, and energy efficiency. The results demonstrate that the adoption of the C-RAN architecture can enhance network performance, improve resource utilization efficiency, and reduce interference. The findings also confirm that a C-RAN system based on centralized control offers high scalability and delivers superior efficiency compared to traditional RAN architectures. These results underscore the

pivotal role that C-RAN technology plays in the evolution of 5G networks, as well as in the development of future 6G networks.

Keywords: 5G networks, C-RAN, virtualization, massive MIMO, BBU pool, fronthaul, network performance.

Introduction

The rapid development of information and communication technologies, the growing demand for multimedia services, and the sharp increase in the number of mobile devices are imposing new requirements on the architecture of telecommunication networks. The deployment of fifth-generation (5G) mobile communication systems, in particular, has brought to the forefront such critical challenges as the simultaneous connectivity of numerous devices, latency minimization, high-speed data transmission, and enhanced network reliability. The architecture of traditional Radio Access Networks (RANs) is not fully equipped to meet these complex requirements [1]. Consequently, the search for and implementation of novel architectural solutions has emerged as a key area of scientific inquiry within the field of telecommunications.

5G networks are viewed not merely as a technology providing high-speed internet, but also as a foundational platform for next-generation digital services – including smart cities, industrial automation, autonomous vehicles, Internet of Things (IoT), telemedicine, and augmented and virtual reality systems. Such applications demand high network throughput, ultra-low latency, and exceptional reliability. Therefore, the efficient operation of 5G networks depends significantly on the organization of the radio access network, resource management mechanisms, and the processing architecture of base stations.

In recent years, the Cloud Radio Access Network (C-RAN) architecture has been widely studied as a promising solution for meeting such requirements. A key feature of the C-RAN concept is the decoupling of the functions typically performed by a traditional base station. Under this model, the tasks of transmitting and receiving radio-frequency signals are delegated to distributed peripheral-level radio units (known as Remote Radio Heads, or RRHs; and Radio Units, or RUs). Conversely, signal processing, resource management, and control functions are centralized within a pool of Baseband Units (BBUs) hosted in a centralized computing environment. This centralization enables the flexible allocation of network resources, infrastructure virtualization, and the efficient utilization of computing power [2].

One of the most significant advantages of the C-RAN architecture is the realization of statistical multiplexing gains, achieved by aggregating the processing resources of multiple base stations within a single shared cloud environment. Consequently, this enhances capabilities for load balancing, coordinated

interference management, and efficient spectrum utilization, while also facilitating the deployment of technologies such as Coordinated Multi-Point (CoMP) and reducing energy consumption. Furthermore, this architecture simplifies network scalability, creating an environment conducive to the rapid deployment of new services and the software-defined management of network functions. In turn, this contributes to a reduction in both capital expenditures (CAPEX) and operating expenses (OPEX) for network operators.

However, the implementation of the C-RAN architecture gives rise to a number of significant technical challenges. In particular, the stringent requirements regarding bandwidth and latency for the fronthaul links connecting radio units to the centralized processing unit, synchronization issues, and the necessity of ensuring data security constitute key factors that constrain system efficiency. Although these issues are addressed in current research, a comprehensive performance modeling of the C-RAN architecture – along with a comparative analysis against traditional RAN systems – remains an insufficiently explored area [3].

Accordingly, the primary objective of this study is to evaluate the impact of the C-RAN architecture on network parameters within 5G networks through performance modeling and analysis. The research examines the structural characteristics of the C-RAN system and analyzes key performance indicators, such as the efficiency of centralized resource management, network throughput, energy efficiency, and latency levels.

The scientific novelty of this work is characterized by the following aspects:

- the performance of the C-RAN architecture was evaluated through simulation using the MATLAB environment;
- system throughput and reliability were analyzed in the context of Massive MIMO technology implementation;
- a comparative analysis was conducted between C-RAN and traditional RAN architectures;
- the efficiency of centralized network resource management was substantiated using quantitative metrics.

The research results demonstrate that the C-RAN architecture can enhance performance in 5G networks, facilitate more efficient utilization of network resources, and reduce interference. Furthermore, the findings underscore the critical importance of this technology in the development of future Beyond 5G (B5G) and 6G networks.

Related work

In recent years, the architecture of the C-RAN has become one of the important research areas in the development of 5G and next-generation mobile communication networks (B5G, 6G). This technology allows efficient use of network resources due to centralization and virtualization of radio access networks.

In this regard, many scientific papers have considered in detail the architectural features, performance and prospects of using the C-RAN system.

The research examined the possibilities of the C-RAN architecture in a Multiple Radio Access Technologies (Multi-RAT) environment and showed that it is possible to ensure uninterrupted switching between networks by controlling various radio technologies from one center [3]. This approach improves the user experience and contributes to network efficiency. This study examines the energy efficiency and economic feasibility of the C-RAN system [4]. The results show that using a centralized architecture can significantly reduce capital and operating costs. In addition, combining computing resources allows you to reduce power consumption and balance the network load. Research in this field also examines the theoretical foundations of C-RAN technology and its application in dense heterogeneous networks [5]. In particular, it is noted that centralized processing reduces interference and effectively implements technologies such as CoMP.

Security issues also play an important role in C-RAN systems. Research in this area has analyzed security risks and vulnerabilities in C-RAN architectures and highlighted the need to improve data protection mechanisms [6]. In addition, the possibilities of increasing security through the use of blockchain technology in 5G networks were considered [7]. Moreover, the issues of resource management and user connectivity were considered, as well as energy-efficient algorithms for user selection were proposed [8]. There are also compared centralized and multi-agent approaches to resource allocation in C-RAN systems and showed ways to improve system performance [9]. The reliability and performance of the C-RAN architecture have also been studied in NLOS and LOS environments, and system reliability has been assessed based on statistical signal propagation models [10]. These studies play an important role in describing the operation of C-RAN systems in real conditions.

However, most of the reviewed papers focus only on certain aspects of the C-RAN architecture. Some studies address energy efficiency or safety issues, while others only address resource management or signal processing issues. In addition, many studies do not provide a comprehensive assessment of system performance through full-scale modeling or lack adequate comparative analysis with traditional RAN architectures.

In this context, comprehensive modeling of the performance of C-RAN architectures in 5G networks, quantification of their key parameters such as bandwidth, latency, reliability, energy efficiency, and comparison with traditional architectures is a scientifically relevant task. This work is aimed at eliminating these shortcomings.

Materials and Methods

C-RAN system architecture and channel model

This study examines the centralized architecture of the C-RAN for 5G networks. In the C-RAN system, the functions of the base station are divided into two main parts: remote radio modules (RRH) and a centralized pool of BBUs. RRHs perform the functions of receiving and transmitting radio signals. At the same time, the tasks of resource management, signal processing, and network management are implemented in a centralized BBU pool. Communication between the RRH and the BBU is carried out through the front-end network, so this architecture requires high bandwidth and low latency.

The C-RAN architecture allows centralized management of network resources, distributing computing power across multiple cells, and jointly reducing interference. Especially in a multicell environment, this approach plays an important role in improving network reliability. In case of failure of one radio module, neighboring RRH nodes can form a group and continue serving users. A similar system model is shown in Figure 1 [11].

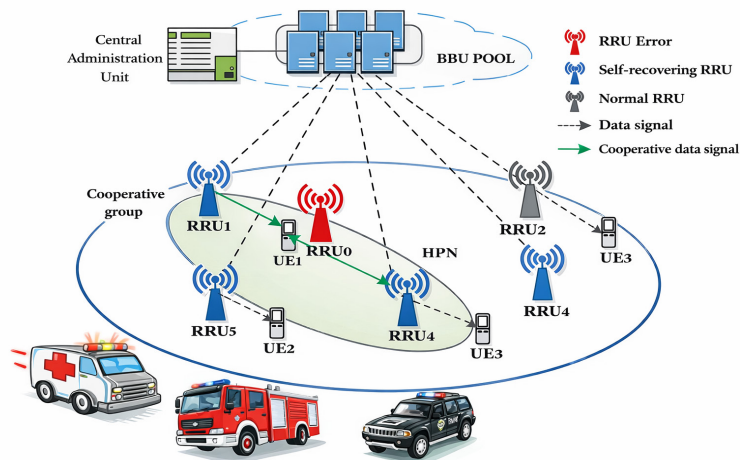


Figure 1 – System model for compensation of multicellular failures in a 5G cloud public safety network

The probability of failure is considered as one of the key indicators in assessing the reliability of the C-RAN network:

$$P_{out}(i) = \min_{j \in J \cup J_c} P(P_{ij}^r < P_{th})$$

where $P_{out}(i)$ is the probability of communication interruption for user i , P_{ij}^r is the signal power received by the user, P_{th} is the minimum required signal level, J is the set of serviced radio blocks, and J_c is a cooperative RRH group. If the level of the received signal falls below the threshold, communication quality degrades or the connection is interrupted. Since multiple RRHs operate together in a C-RAN architecture, this probability can be reduced.

To describe signal propagation, the NLOS case in a multicell environment was considered, and the Rayleigh fading model was employed. In this case, the probability density function of the received signal power is expressed as follows [10]:

$$f_{P_r}(p_{k,r_k}^r) = \frac{1}{2\gamma_{k,r_k}^2} \exp\left(-\frac{p_{k,r_k}^r}{2\gamma_{k,r_k}^2}\right)$$

where p_{k,r_k}^r is the signal power received by the user k , γ_{k,r_k} is the average received signal parameter, and f_{P_r} is the probability density function of the signal power. This model allows you to take into account the effects of scattering, reflection and diffraction.

The reliability of the system was also assessed using the signal-interference-noise ratio (SINR). For the user, the reliability of the system is defined as the probability of reaching the minimum required SINR level:

$$R_k = P(\text{SINR}_{k,r_k} \geq \gamma_k)$$

or

$$R_k = P\left(\frac{p_{k,r_k}^r}{p_k^N + \eta} \geq \gamma_k\right) \quad (4)$$

where R_k is the reliability of the system for user k , SINR_{k,r_k} is the signal-to-noise ratio, γ_k is the required minimum SINR value, and P is the probability function.

The 5G C-RAN systems can operate within a heterogeneous network environment alongside macro, pico, femto, and relay cells. Such integration enables the utilization of various backhaul technologies and flexible management of network load. This architectural interconnection is illustrated in Figure 2 [12].

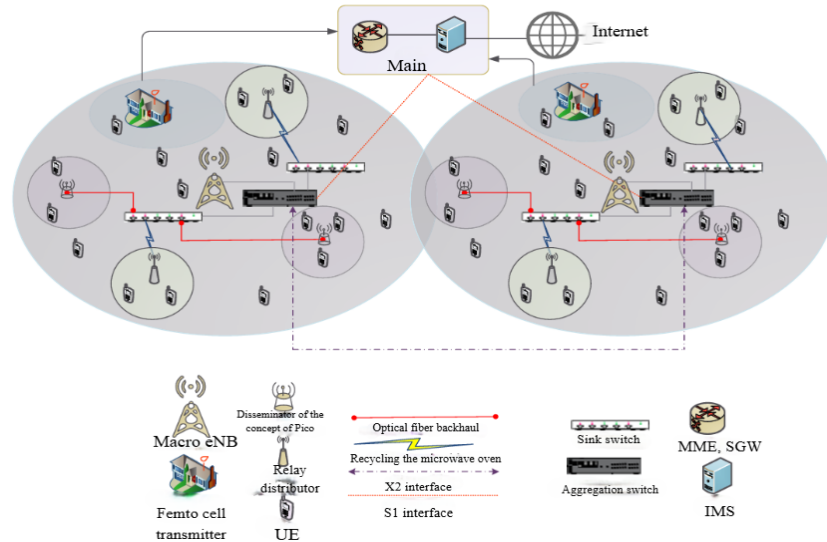


Figure 2 – Heterogeneous network architecture with mixed backhaul technologies in LTE/5G systems

Performance Evaluation Metrics and Modeling Methodology

To evaluate the performance of the C-RAN architecture, methods of analytical analysis and computer simulation were employed using the MATLAB/Simulink environment. The simulation incorporated Massive MIMO technology, a feature specific to 5G networks, and assumed a configuration comprising 64 antennas at the base station serving 20 user devices. The radio channel was characterized by a Rayleigh fading model, while the Zero-Forcing algorithm was utilized for signal reception. The SNR value was varied between -5 dB and 25 dB, and 1,000 iterations were performed using the Monte Carlo method. The key simulation parameters utilized in this study are presented in Table 1.

Table 1 – Modeling parameters of the C-RAN system

Parameter	Denote	Value	Description
Carrier frequency	f_c	3.5 GHz	Basic frequency used in 5G system
Channel bandwidth	B	20 MHz	Determines the bandwidth of the communication channel
Number of users	N_u	20	Number of users connected to the network
Base station antennas	M	64	Number of Massive MIMO antennas
Channel model	h	Rayleigh fading	Multipath propagation model
Detection method	ZF	Zero-Forcing	Interference reduction algorithm
SNR range	SNR	(-5) – 25 dB	Signal-to-noise ratio change interval
Simulation iterations	N_{stm}	1000	Monte-Carlo simulation number
Network architecture	A_{net}	C-RAN	Centralized Radio Network
Performance metric	C	Throughput	System efficiency assessment parameter

Several key metrics were employed to assess the system's performance. Specifically, the following parameters were analyzed: throughput, network capacity, latency, bit error rate (BER), and outage throughput. Throughput characterizes the volume of data successfully transmitted across the network over a specific period, thereby enabling an assessment of system stability as the number of users increases. The BER metric was used to evaluate variations in signal quality, while latency was utilized to determine the system's suitability for real-time services. Overall throughput can be estimated using Shannon's formula:

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (5)$$

where C represents channel capacity, B denotes channel bandwidth, and SNR is the signal-to-noise ratio. This expression enables the analysis of the impact of centralized processing and antenna resource integration on network performance.

During the simulation, the C-RAN architecture was compared against a traditional distributed RAN system, and changes in throughput, latency, and network capacity metrics were evaluated as the number of users increased. Furthermore, the extent to which a centralized BBU pool facilitates dynamic resource allocation and effective interference management was investigated. The obtained results are analyzed in the following section through the use of graphs and quantitative metrics.

Results and discussion

The results of the conducted simulations demonstrated a significant positive impact of centralized processing on the performance of the C-RAN architecture in 5G networks. The results obtained within the MATLAB environment were analyzed based on key network parameters such as throughput, latency, BER, and network capacity. In the C-RAN architecture, the distribution of base station functions and the centralized processing layers directly influence overall system performance. This functional split is illustrated in Figure 3.

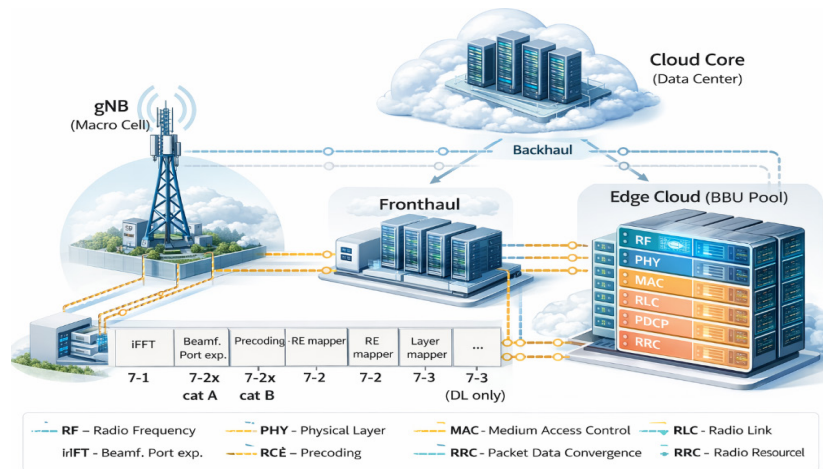


Figure 3 – Functional split in the C-RAN architecture

As shown in Figure 3, radio-frequency layer functions remain at the RRH (or RU) level, while PHY, MAC, RLC, and higher-layer control functions are implemented within a centralized BBU pool. This architecture enables the integration of computing resources and facilitates effective interference management. Such an approach enhances network flexibility and simplifies the deployment of new services.

This research study analyzed the variation in average system throughput as a function of an increasing number of users. The results indicate that, although per-user throughput declines as the number of users increases, the C-RAN architecture maintains system stability once a certain threshold is reached. This phenomenon is attributed to the effects of centralized control and statistical multiplexing. The variation in throughput as a function of the number of users is illustrated in Figure 4.

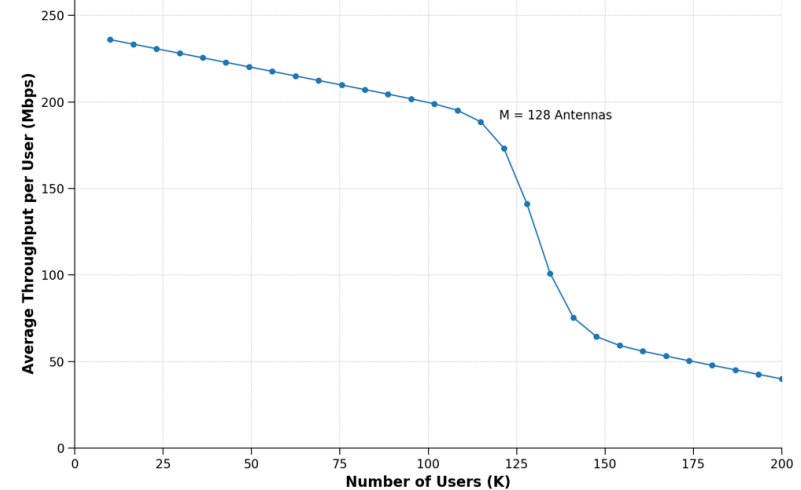


Figure 4 – Variation of average bandwidth and per-user throughput with increasing number of users under MMSE detection

As evident from the graph, throughput values are relatively high during the initial phase; however, as the number of users increases, available resources diminish due to distribution. Nevertheless, the system maintains a certain level of stability, demonstrating the C-RAN architecture's capacity to effectively manage network load. This result indicates that a centralized BBU pool can sustain a stable Quality of Service (QoS) level through the dynamic reallocation of resources. An analysis of latency metrics demonstrated that the C-RAN system is highly effective for real-time applications. Centralized processing and efficient management of network resources enable a reduction in data delivery times. This is particularly critical for meeting the requirements of Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC).

Furthermore, the relationship between the BER and the SNR was investigated; the findings revealed that improvements in signal quality lead to a reduction in BER values. The implementation of Massive MIMO technology facilitates multi-stream processing and enhances signal reception quality. Consequently, data transmission reliability is significantly improved. Additionally, the impact of Massive MIMO technology on C-RAN system performance was analyzed. The effectiveness of this technology in boosting throughput is illustrated in Figure 5.

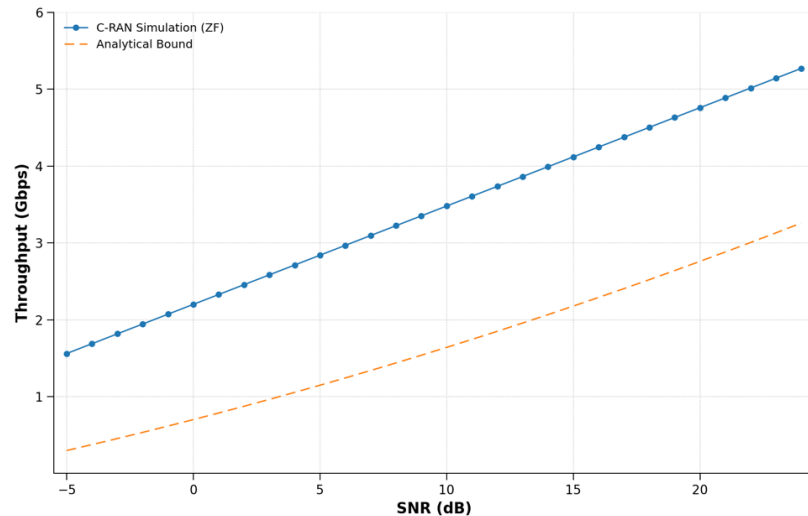


Figure 5 – Throughput performance analysis of 5G C-RAN with massive MIMO

As shown in Figure 5, the system's throughput increases significantly when Massive MIMO is employed. However, when the number of users becomes extremely high, the efficiency of the Zero-Forcing receiver may decline, causing actual system performance to deviate from theoretical limits. This phenomenon is attributed to increased computational complexity and errors in channel estimation.

The results obtained regarding network capacity demonstrated that the C-RAN architecture possesses high scalability. When the number of users increases, the centralized BBU pool effectively redistributes computing resources and ensures stable system operation. This characteristic positions the C-RAN architecture as an effective solution for dense heterogeneous networks. Overall, the obtained results indicated that the C-RAN architecture offers the following advantages compared to traditional distributed RAN systems: effective interference management, dynamic resource allocation, high network scalability, and enhanced energy efficiency.

Furthermore, the study identified a number of limitations. Specifically, high requirements for fronthaul network capacity and the increased computational load associated with centralized processing may impact system performance. Therefore, a promising avenue for future research lies in the optimization of fronthaul networks and the application of AI-driven resource management techniques.

Financing information

This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26103493, "Machine Learning-Based Intelligent Surfaces for Green IoT in Future Wireless Networks," 2025–2027).

Conclusion

This study investigates the performance of the C-RAN architecture in 5G mobile networks through comprehensive modeling and analysis. The research examined the structure of the C-RAN system – based on the principle of centralized processing – including its key components and specific features regarding network resource management.

The results of the modeling demonstrated that the C-RAN architecture enables a significant enhancement of network performance. Specifically, the utilization of a centralized BBU pool allows for dynamic load balancing, efficient integration of computing resources, and interference minimization. Consequently, network throughput increases, latency decreases, and QoS is maintained at a stable level. Furthermore, it was found that system throughput and reliability are further enhanced through the use of MIMO technology. When faced with an increase in the number of users, the C-RAN architecture demonstrated the ability to efficiently redistribute resources, thereby ensuring network scalability. This characteristic positions it as a promising solution for dense heterogeneous networks.

The research findings confirmed that the C-RAN architecture offers several advantages over traditional distributed RAN systems, such as improved energy efficiency, reduced infrastructure costs, and effective interference management. The study also identified key limitations associated with the implementation of the C-RAN system. In particular, the stringent requirements for high bandwidth and low latency in fronthaul networks, as well as the increased computational load resulting from centralized processing, may impact system efficiency. Addressing these challenges necessitates the development of high-speed communication technologies and the implementation of intelligent resource management methods.

In summary, the results indicate that the C-RAN architecture is an effective technology capable of delivering high performance and flexible network management in 5G networks, as well as in future B5G and 6G networks. By facilitating the virtualization of telecommunication systems and the integration of cloud computing technologies, this architecture has the potential to serve as a vital foundation for the development of next-generation communication networks. Future research will focus on exploring approaches to optimizing fronthaul networks in C-RAN systems, developing AI-based resource management algorithms, and enhancing network security.

REFERENCES

- 1 **Shin, C., Park, S.-H., Kim, J. and Park, H.** «Cloud Radio Random-Access Networks With Multi-Packet Reception Capability» in IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 89384–89393. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3419081>.
- 2 **Larsen, L. M. P., Christiansen, H. L., Ruepp, S. and Berger, M. S.** «Toward Greener 5G and Beyond Radio Access Networks – A Survey» in IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2023. – Vol. 4. – P. 768–797. – <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3257889>.
- 3 **Wang, R., Hu, H. and Yang, X.** «Potentials and Challenges of C-RAN Supporting Multi-RATs Toward 5G Mobile Networks» in IEEE Access. – 2024. – Vol. 2. – P. 1187–1195. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2360555>.
- 4 **Guerra-Gómez, R., Ruiz-Boqué, S., García-Lozano, M. and Saeed, U.** «Energy and Cost Footprint Reduction for 5G and Beyond With Flexible Radio Access Network» in IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 142179–142194. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120765>.
- 5 **Simeone, O., Maeder, A., Peng, M., Sahin, O. and Yu, W.** «Cloud radio access network: Virtualizing wireless access for dense heterogeneous systems» in Journal of Communications and Networks. – April 2019. – Vol. 18. – № 2. – P. 135–149. – <https://doi.org/10.1109/JCN.2016.000023>.
- 6 **Tian, F., Zhang, P. and Yan, Z.** «A Survey on C-RAN Security» in IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 13372–13386. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2717852>.
- 7 **Tahir, M., Habaebi, M. H., Dabbagh, M., Mughees, A., Ahad, A. and Ahmed, K. I.** «A Review on Application of Blockchain in 5G and Beyond Networks: Taxonomy, Field-Trials, Challenges and Opportunities» in IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 115876–115904. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3003020>.
- 8 **Zuo, J., Zhang, J., Yuen, C., Jiang, W. and Luo, W.** «Energy Efficient User Association for Cloud Radio Access Networks» in IEEE Access. – 2018. – Vol. 4. – P. 2429–2438. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2566338>.
- 9 **Rodoshi, R. T., Nazib, R. A., Chun, C. and Choi, W.** «Combined Multi-Agent and Centralized Resource Allocation in Cloud Radio Access Networks» in IEEE Access. – 2025. – Vol. 13. – P. 79098–79106. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3566389>.
- 10 **Peethala, D., Kaiser, T. and Vinck, A. J. H.** «Reliability Analysis of Centralized Radio Access Networks in Non-Line-of-Sight and Line-of-Sight Scenarios» in IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 18311–18318. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2896410>.

- 11 **Yin, M., Li, W., Feng, L., Yu, P. and Qiu, X.** «Multi-Cell Cooperative Outage Compensation in Cloud-RANs Based 5G Public Safety Network» in IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 17309–17321. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2734925>.
- 12 **Radwan, A., Huq, K. M. S., Mumtaz, S., Tsang, K. -F. and Rodriguez, J.** «Low-Cost On-Demand C-RAN Based Mobile Small-Cells» in IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 2331–2339. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2563518>.

Received 07.04.26.

Received in revised form 21.04.26.

Accepted for publication 04.06.26.

*Н. Смайлов¹, *С. Кенгесбаева², Д. Жамангарин³, Ә. Бақытқали⁴*

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

²Пенсильвания мемлекеттік университеті, АҚШ, Пенсильвания;

³Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

07.04.26 ж. баспаға түсті.

21.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

5G ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ C-RAN АРХИТЕКТУРАСЫНЫҢ ӨНІМДІЛІГІН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

Бұл мақалада 5G мобильді байланыс желілеріндегі бұлтты радиоға қол жеткізу желісінің (C-RAN) архитектурасының өнімділігіне кешенді талдау және модельдеу ұсынылған. Зерттеудің мақсаты – C-RAN архитектурасына тән орталықтандырылған өңдеу принципі негізінде желілік ресурстарды тиімді басқару мүмкіндіктерін және оның жалпы желі өнімділігіне әсерін бағалау болып табылады. Жұмыс барысында C-RAN жүйесінің құрылымдық ерекшеліктері қарастырылып, базалық станция функцияларын ортақ BBU пулына орталықтандыру арқылы жүзеге асатын ресурстарды динамикалық бөлу механизмдері зерттелді. Сонымен қатар, алдыңғы байланыс желісінің өткізу қабілеті мен кідірісіне байланысты туындайтын шектеулер талданып, оларды азайтуға бағытталған тәсілдер қарастырылды. Зерттеу әдістемесі аналитикалық модельдеу және MATLAB ортасында жүргізілген

компьютерлік модельдеуді қамтиды. Модельдеу барысында Massive MIMO технологиясы қолданылып, жүйенің негізгі өнімділік көрсеткіштері – өткізу қабілеті, кідіріс, желі сыйымдылығы және энергия тиімділігі бағаланды. Алынған нәтижелер C-RAN архитектурасын қолдану желі өнімділігін арттыруға, ресурстарды тиімді пайдалануға және интерференцияны азайтуға мүмкіндік беретінін көрсетті. Сондай-ақ, орталықтандырылған басқаруға негізделген C-RAN жүйесінің жоғары масштабталу қабілетіне ие екендігі және дәстүрлі RAN архитектураларымен салыстырғанда тиімділігі жоғары екендігі дәлелденді. Зерттеу нәтижелері C-RAN технологиясының 5G желілерін дамытудағы, сондай-ақ болашақ 6G байланыс жүйелерін қалыптастырудағы маңызды ролін айқындайды.

Кілтті сөздер: 5G желілері, C-RAN, виртуализация, massive MIMO, BBU пулы, алдыңғы байланыс желісі, желі өнімділігі.

Н. Смайлов¹, *С. Кенгесбаева², Д. Жамангарин³, Ә. Бақытқали⁴
^{1,4}Қазақхский национальнй исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Республика Казахстан г. Алматы;
²Пенсильванский государственнй университет, США, Пенсильвания;
³Евразийский национальнй университет имени Л.Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.
Поступило в редакцию 07.04.26.
Поступило с исправлениями 21.04.26.
Принято в печать 04.06.26.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АРХИТЕКТУРЫ C-RAN В СЕТЯХ 5G

В данной статье представлен комплексный анализ и моделирование производительности архитектуры облачной сети радиодоступа (C-RAN) в сетях мобильной связи 5G. Целью данного исследования является оценка потенциала эффективного управления сетевыми ресурсами и влияния такого управления на общую производительность сети на основе принципа централизованной обработки, присущего архитектуре C-RAN. В исследовании рассматриваются структурные характеристики системы C-RAN и исследуются механизмы динамического распределения ресурсов, которым способствует централизация функций базовой станции в общем пуле устройств базовой полосы частот (BBU). Кроме того,

анализируются ограничения, связанные с пропускной способностью и задержкой во фронтальной сети, а также рассматриваются стратегии по устранению этих ограничений. Методология исследования использует как аналитическое, так и компьютерное моделирование, проводимое в среде MATLAB. В ходе моделирования была использована технология Massive MIMO и оценены ключевые показатели производительности системы, такие как пропускная способность, задержка, пропускная способность сети и энергоэффективность. Результаты показывают, что внедрение архитектуры C-RAN может повысить производительность сети, повысить эффективность использования ресурсов и уменьшить помехи. Полученные результаты также подтверждают, что система C-RAN, основанная на централизованном управлении, обладает высокой масштабируемостью и обеспечивает превосходную эффективность по сравнению с традиционными архитектурами RAN. Эти результаты подчеркивают ключевую роль, которую технология C-RAN играет в развитии сетей 5G, а также в разработке будущих сетей 6G.

Ключевые слова: сети 5G, C-RAN, виртуализация, massive MIMO, пул BBU, фронтальная сеть, производительность сети.

FTAMP 28.23.15

DOI

***А. А. Татенов¹, Н. Н. Оспанова²**

^{1,2}Торайғыров университеті, Қазақстан республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0755-9235>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0100-1008>

*e-mail: azezbek@mail.ru

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ӘДІСТЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН «МЕДИЦИНАЛЫҚ КЕҢЕСШІ» ҚОСЫМШАСЫН ӘЗІРЛЕУ

Мақалада «Medoga» интеллектуалды медициналық жүйесі ұсынылған. Ол симптомдарға, терінің суреттерін талдауға және жеке медициналық мәліметтерге негізделген пайдаланушының жағдайын алдын-ала бағалауға арналған модульдік цифрлық платформа ретінде енгізілген болатын. Жүйе Symptom-checker ретінде бағытталған құрылымдық сауалнамамен, дерматологиялық ерекшеліктерді талдауға арналған компьютерлік көру модулі және келу тарихын сақтау және пайдаланушының жағдайын динамикалық бақылау мүмкіндігі бар пайдаланушының жеке медициналық профилі кіреді.

Мақалада масштабталуын, клиникалық қауіпсіздігін және нәтижелердің түсіндірілуін қамтамасыз етуге бағытталған архитектуралық және инженерлік шешімдер сипатталады. Нәтижелерді түсіндіру механизмдері қарастырылады, бұл пайдаланушыға жүйенің алдын ала қорытындыларының логикасын түсінуге мүмкіндік береді. Тілдік модельдер тек түсініктемелер жасау және пайдаланушыға білім беру қолдауын көрсету мақсатында біріктірілген; олар медициналық шешім қабылдау процесіне қатыспайды және маманның клиникалық тәжірибесін алмастырмайды.

Ұсынылған тәсіл бастапқы медициналық бағалаудың, пациенттерге цифрлық көмек көрсетудің және профилактикалық медицинаны қолдаудың қолжетімділігін арттыруға бағытталған кешенді цифрлық медициналық шешімдерді жасау әлеуетін көрсетеді. Жүйе ықтимал ауытқуларды ерте анықтауға және пайдаланушылардың денсаулық сақтау жүйесімен өзара әрекеттесуін оңтайландыруға көмектесетін көмекші құрал ретінде орналастырылған.

Кілттік сөздер: ақылды медициналық жүйелер, симптомдарды тексеруші, терінің кескінін талдау, цифрлық денсаулық сақтау, көп модальды талдау, жекелеңдірілген медицина, жасанды интеллект.

Кіріспе

Соңғы жылдары науқастардың жағдайын алдын ала болжау және клиникалық шешім қабылдауды қолдау үшін цифрлық медициналық жүйелерді қолдануға деген қызығушылық тұрақты түрде артып келеді [1]. Денсаулық сақтау жүйесіне түсетін жүктеменің артуы, медициналық мамандарға қолжетімділіктің шектеулілігі және созылмалы аурулардың көбеюі клиникалық жағдайлардан тыс пайдаланушыларға ерте медициналық басшылық пен жеке ұсыныстар бере алатын интеллектуалды құралдарды әзірлеуді қажет етеді [2].

Цифрлық денсаулық сақтау саласында ең белсенді дамып келе жатқан бағыттарының бірі – науқастардың шағымдарын бастапқы талдауға арналған симптом-тексеру жүйелері [2]. Мұндай шешімдердің кеңінен қолданылуына қарамастан, бар жүйелердің едәуір бөлігі симптомдарды ықшамдалған мәтінді енгізуге немесе ресми медициналық логикасы жоқ генеративті тілдік модельдерге негізделген, бұл нәтижелердің түсіндірілуін шектеп, олардың клиникалық сенімділігін бағалауды қиындатады. Симптомдарды тексеру шешімдерімен қатар, медициналық кескіндерді, соның ішінде терінің кескіндерін талдау үшін компьютерлік көру әдістері белсенді түрде енгізілуде [2].

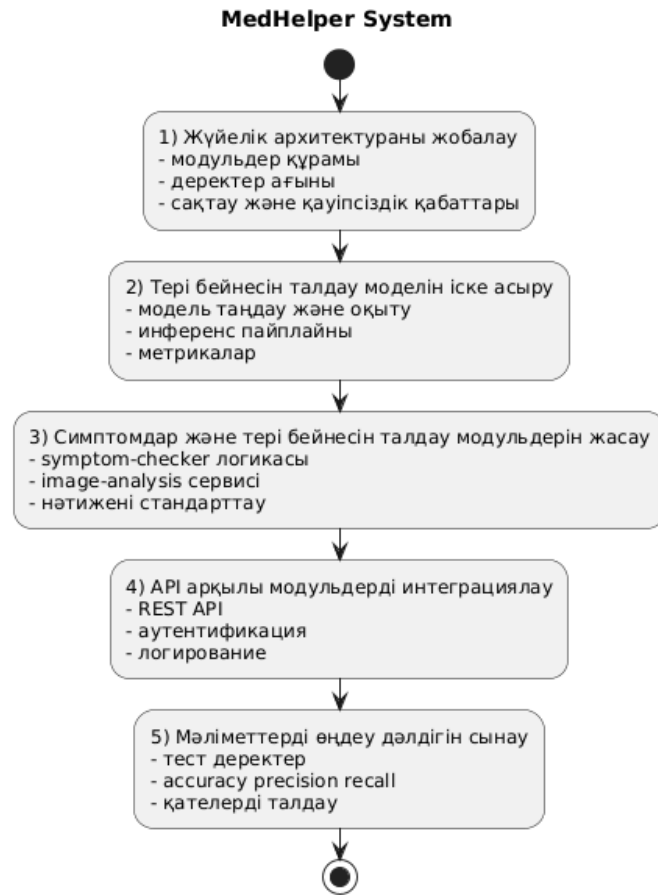
Бұл мақала «Medoga» интеллектуалды медициналық жүйесін ұсынады. Ол симптомдарды тексеруші, тері кескінін талдау модулі, пайдаланушы медициналық профилі және қабылдаулар тарихы сияқты элементтерді біріктіретін модульдік цифрлық платформа ретінде іске асырылған. Тек тілдік модельдерге бағытталған шешімдерден айырмашылығы «Medoga» жүйесінің негізгі аналитикалық қорытындылары құрылымдалған деректер мен алгоритмдік логикаға негізделген [3].

Осы зерттеудің мақсаты – «Medoga» жүйесінің архитектурасы мен техникалық іске асырылуын сипаттау, сондай-ақ таңдалған инженерлік шешімдерді түсіндірілушілік, масштабталу және клиникалық қауіпсіздік тұрғысынан сипаттау. Мақалада API құру, деректерді өңдеу, аналитикалық модульдер мен пайдаланушы сұранымын өңдеу қағидалары талқыланады.

Нәтижелер қауіпсіздік пен түсіндірмелік талаптарын сақтай отырып, көп модальды деректер негізінде, пайдаланушының жағдайын алдын ала бағалауға мүмкіндік беретін кешенді медициналық цифрлық платформаны құру мүмкіндігін көрсетеді. Бұл «Medoga» жүйесін әрі қарай зерттеу мен клиникалық растау үшін перспективталы негізге айнылды [4].

Материалдар мен әдістері

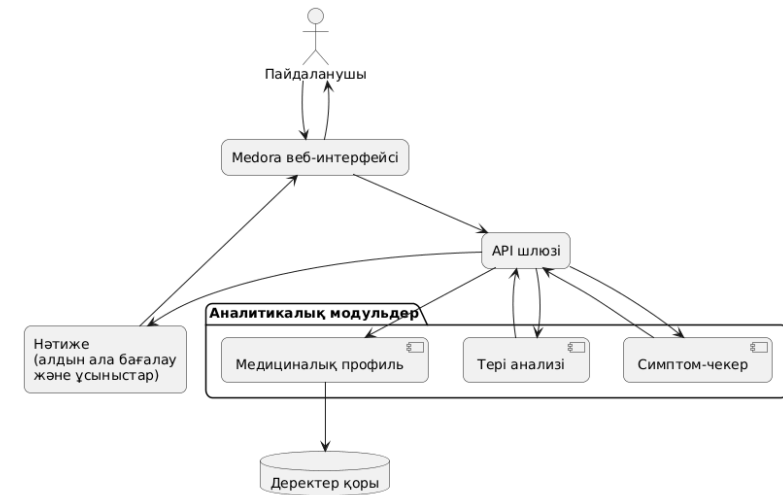
Жұмыста «Medora» модульдік цифрлық медициналық жүйесін жобалау, әзірлеу және интеграциялау кірді. Зерттеу келесі кезеңдерден тұрды (1-сурет):



1-сурет – Зерттеудің кезеңдері

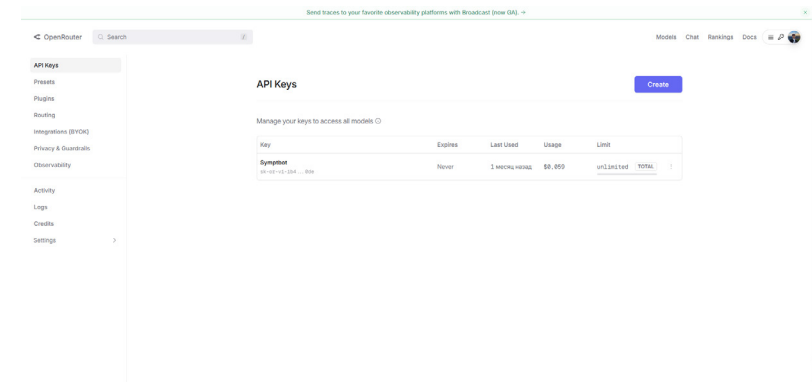
Архитектуралық негіз ретінде келесі компоненттерге бөлінді: деректері жинауға арналған клиенттік интерфейс, серверлік API шлюзі, симптомдарды тексеру модулі, теріні талдау модулі, дерекқор (2-сурет) [5].

Medora веб-сервисі - Жұмыс принципі



2-сурет – Medora веб-сервисінің жобасы

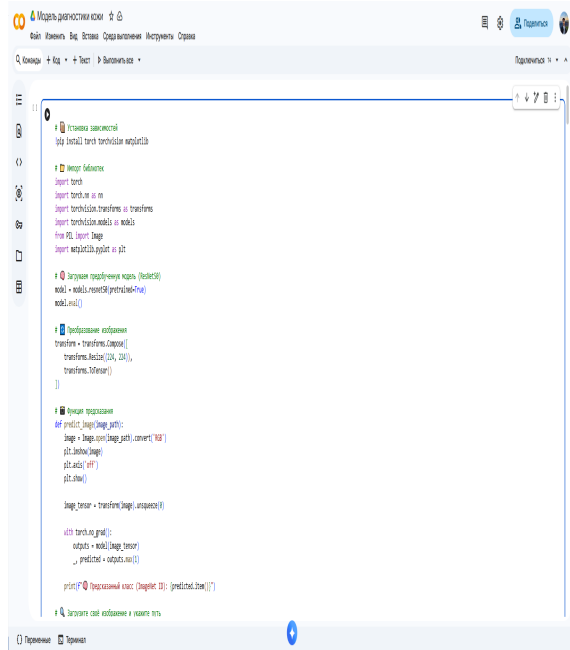
Medora жүйесіндегі симптом тексергіш – бұл «Open Router» API провайдері арқылы сыртқы тілдік модельді пайдаланатын қызмет ретінде іске асырылған. Интеграция үшін API кілті қолданылады, ал пайдаланушының сұраулары таңдалған Grok моделі арқылы өңделеді. Бұл модульдің негізгі мақсаты пайдаланушының симптомдарын сипаттауды, әрі қарай машиналық өңдеуге және ұсыныстар жасауға жарамды құрлымдық объектке түрлендіру (3-сурет) [6].



3-сурет – OpenRouter API кілті

Модельге жіберу алдында кіріс деректерінің дұрыстығын тексеру және оларды біркелкі форматқа келтіру жүргізіледі: бос өрістер алып тасталады, мәтін ұзындығы шектеледі, өлшем бірліктері мен уақыт аралықтарды стандартталған форматқа түрлендіреді [7].

Тері талдау модулін әзірлеу деректер базасынан басталады. «НАМ 10000» ашық деректер жинағы тері зақымдануларын анықтайтын классификаторы оқыту үшін қолданылды [8]. Онда пигметтелген тері зақымдануларының 10015 дерматоскопиялық кескіні және бірнеше диагностикалық класстарға арналған аннотациялар бар. Оқыту Google Colab бұлттық ортасында жүргізілді. Ол Google ресурстарын пайдаланып, тәжірибиелер жүргізуге мүмкіндік береді. Colab деректерді жүктеуден бастап, модель салмақтарын және оқыту артефактілерін сақтауға дейінгі бүкіл тәжірибие циклін ұйымдастыру үшін қолданылады (4-сурет).



4-сурет – Тері суреттерді талдау моделін жасау

Оқыту процесі 21 рет өткізілді. Бұл барлық деректер қорымызды 21 рет модельден өткізу процесі. Осы процесс барысында жоғалтулар азайып, дәлдік пайызы өсті (5-сурет).

***	Эпоха 1:	Потери = 130.0503,	Точность = 78.03%
	Эпоха 2:	Потери = 126.5355,	Точность = 79.96%
	Эпоха 3:	Потери = 118.4814,	Точность = 78.83%
	Эпоха 4:	Потери = 117.0284,	Точность = 79.74%
	Эпоха 5:	Потери = 118.9169,	Точность = 79.82%
	Эпоха 6:	Потери = 113.7244,	Точность = 80.12%
	Эпоха 7:	Потери = 113.9958,	Точность = 80.23%
	Эпоха 8:	Потери = 110.0898,	Точность = 79.87%
	Эпоха 9:	Потери = 115.7647,	Точность = 80.39%
	Эпоха 10:	Потери = 108.3157,	Точность = 80.64%
	Эпоха 11:	Потери = 108.4281,	Точность = 80.55%
	Эпоха 12:	Потери = 105.8017,	Точность = 80.80%
	Эпоха 13:	Потери = 106.3826,	Точность = 80.82%
	Эпоха 14:	Потери = 107.0407,	Точность = 80.73%
	Эпоха 15:	Потери = 105.8676,	Точность = 81.03%
	Эпоха 16:	Потери = 104.1842,	Точность = 80.90%
	Эпоха 17:	Потери = 102.6769,	Точность = 81.32%
	Эпоха 18:	Потери = 96.6524,	Точность = 82.03%
	Эпоха 19:	Потери = 100.4906,	Точность = 81.53%
	Эпоха 20:	Потери = 99.3748,	Точность = 81.40%
	Эпоха 21:	Потери = 97.3276,	Точность = 81.33%

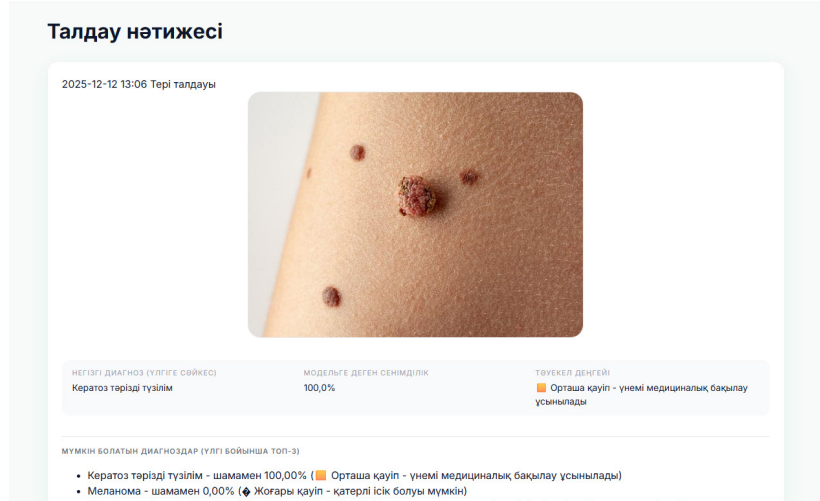
5-сурет – Модельдің оқу процесі

Medora веб-қызметіндегі теріні талдау модулінің жұмыс принципі.

Оқытудан кейін модель экспортталды (мысалы, SavedModel форматында немесе .H5) және теріні талдаудың жеке қызметі ретінде қосылды. Medora - дағы pipeline inference келесідей жүзеге асырылады:

- пайдаланушы веб-интерфейс арқылы терінің суретін жүктейді;
- API файлды қабылдайды, бастапқы тексеруді орындайды (пішім, өлшем, бос файлдар);
- сурет модель форматына (resize, normalization) әкеледі;
- модель класстар бойынша ықтималдық векторын шығарады;
- сервер нәтижені қайтарады.

Модель «диагноз қоймайды», бірақ ықтималдық бағалау мен алдын ала жіктеуді жазады (6-сурет) [9].

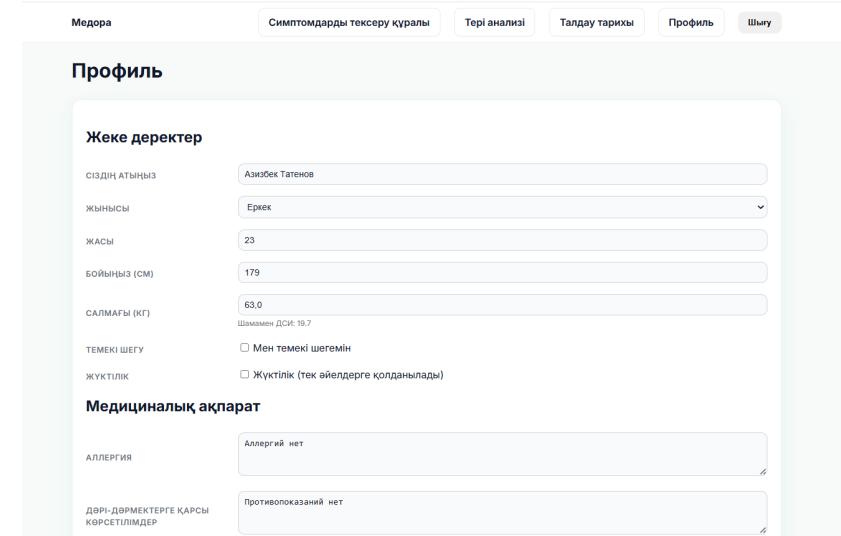


6-сурет – Модельдің жұмыс істеу принципі

Пайдаланушы интерфейсінің архитектурасы.

Medora веб-қызметі жеке жұмыс моделін жүзеге асырады, сондықтан пайдаланушыларды тіркеу және аутентификация модулі жасалды. Бұл модуль: бірегей тіркелу жасау, қауіпсіз авторизация, медициналық профильді сақтау және жаңарту, профильдің пайдаланушының сураулар тарихымен байланысы

Тіркеу және авторизация токенизацияланған қол жеткізу схемасын қолдана отырып, серверлік API арқылы жүзеге асырылады (мысалы JWT немесе session-based іске асыруға негізделген авторизация) (7-сурет).



7-сурет – Профиль

Нәтижелер және талқылау

Жұмыстың нәтижесінде функционалды түрде толық Medora интеллектуалды жүйесі іске асырылды, оған LLM-бағдарланған симптомдарды сынаушы, resnet-50 негізіндегі тері кескінін талдау модулі және бірыңғай қызметке бағытталған архитектурада біріктірілген пайдаланушының жеке медициналық профилі кіреді. Тілдік модельді симптомдарды тексеру құралының негізіне біріктіру құрылымдалмаған пайдаланушы мәтінін формальдандырылған клиникалық нысанға тиімді түрде түрлендіру мүмкіндігін көрсетті. Grok моделі симптомдарды сәтті қалыпқа келтіреді, шағым параметрлерін алады және құрылымдық JSON форматында диагностикалық гипотезалардың алдын ала тізімін жасайды. Бекітілген шешім ағаштарына негізделген классикалық ережеге негізделген симптомдарды тексеру құралдарымен салыстырғанда бұл тәсіл табиғи тілді түсіндіруде үлкен икемділікті қамтамасыз етеді және күрделі пайдаланушы тұжырымдамаларына мүмкіндік береді. Сонымен қатар, модельдің жауабын қатаң сервер жағында тексеру қажеттілігі анықталды, себебі LLM пайдалану шығыс форматындағы ықтимал өзгергіштікпен және сыртқы API тұрақтылығына тәуелділікпен байланысты. ResNet-50 негізіндегі трансферлік оқытуды қолдана отырып, NAM10000 деректер жиынтығында оқытылған тері талдау модулі дерматоскопия кескіндерін бірнеше диагностикалық санаттарға жіктеу мүмкіндігін көрсетті. Алдын ала оқытылған архитектураны

пайдалану оқыту уақытын қысқартты және үлкен деректер жиынтығынан бұрын алынған берік төмен және жоғары деңгейлі визуалды мүмкіндіктерді пайдаланды. Тәжірибелер болжау сапасы кіріс кескінінің сапасына айтарлықтай байланысты екенін көрсетті: жарықтандырудың төмендеуі, бұлыңғырлық немесе түс бұрмалануы модельдің ықтималдық сенімділігінің төмендеуіне әкеледі. Қосымша фактор – бастапқы деректер жиынтығындағы сынып теңгерімсіздігі, бұл аз көрсетілген зақымдану санаттарына сезімталдыққа әсер етеді. Соған қарамастан, модель дұрыс кескінді алдын ала өңдеу жағдайларында тұрақты өнімділік көрсетті және автоматтандырылған алдын ала бағалау құралы ретінде пайдаланылуы мүмкін [10].

Қорытынды

Зерттеу барысында пайдаланушыларды алдын ала бағалауға арналған мультимодальды цифрлық платформа болып табылатын Medora интеллектуалды медициналық жүйесі әзірленіп, енгізілді. Үш негізгі компонент біріктірілді: OpenRouter API арқылы Grok моделіне негізделген LLM негізіндегі симптомдарды тексеру құралы, қайта оқытылған ResNet-50 архитектурасына негізделген тері кескінін талдау модулі және пайдаланушының жеке денсаулық профилі жүйесі. Барлық компоненттер бірыңғай API және құрылымдалған деректер моделі бар қызметке бағытталған архитектураға біріктірілген.

Зерттеу мақсатына қол жеткізілді: мәтіндік шағымдарды, визуалды ерекшеліктерді және деректерді бірыңғай талдау біріктіріп өңдеуге мүмкіндік беретін техникалық тұрғыдан мүмкін архитектура жасалды.

Зерттеудің болашақ бағыттарына оқыту бейнелер жиынтығын кеңейту, нейрондық желіні түсіндіру әдістерін енгізу, нақты медициналық ортада клиникалық сынақтар жүргізу және жүйенің кіріс деректерінің өзгергіштігі мен кескін сапасына төзімділігін арттыру тетіктерін әзірлеу кіреді. Тағы бір назар аударатын бағыт – модельдерді немесе гибридті архитектураларды жергілікті орналастыру арқылы сыртқы LLM провайдерлеріне тәуелділікті азайту.

Осылайша, алынған нәтижелер сандық денсаулық сақтауда интеллектуалды технологиялардың дамуына үлес қосатын, табиғи тілді өңдеу мен компьютерлік көруді бірыңғай архитектура шеңберінде біріктіретін кешенді мультимодальды цифрлық медициналық жүйені құрудың орындылығын растайды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Esteva, A., Robicquet, A., Ramsundar, B., et al.** A guide to deep learning in healthcare // *Nature Medicine*. – 2019. – Vol. 25. – P. 24–29. – <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0316-z>.
- 2 World Health Organization. Ethics and governance of artificial intelligence for health. – Geneva: WHO, 2021. – 164 p.
- 3 ISO/IEC 23894:2023. Information technology – Artificial intelligence – Risk management. – Geneva: ISO, 2023.
- 4 **Rajpurkar, P., Chen, E., Banerjee, O., Topol, E. J.** AI in health and medicine // *Nature Medicine*. – 2022. – Vol. 28. – P. 31–38. – <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01614-0>.
- 5 **Cruz Rivera, S., Liu, X., Chan, A.-W., et al.** Guidelines for clinical trial protocols for interventions involving artificial intelligence: the SPIRIT-AI extension // *Nature Medicine*. – 2020. – Vol. 26. – P. 1351–1363. – <https://doi.org/10.1038/s41591-020-1037-7>.
- 6 **Wallace, W., Chan, A.-W., Phelan, N., et al.** Diagnostic accuracy and triage performance of online symptom checkers: systematic review // *npj Digital Medicine*. – 2022. – Vol. 5. – Article 120. – <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00640-7>.
- 7 **Hill, M.G., Sim, M., Mills, B., et al.** Evaluating the diagnostic accuracy of symptom checker tools: systematic review // *Medical Journal of Australia*. – 2020. – Vol. 212. – № 11. – P. 514–519. – <https://doi.org/10.5694/mja2.50527>.
- 8 **Tschandl, P., Rosendahl, C., Kittler, H.** The HAM10000 dataset: A large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions // *Scientific Data*. – 2018. – Vol. 5. – Article 180161. – <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.161>.
- 9 **Collins, G. S., Moons, K. G. M.** Reporting of artificial intelligence prediction models: the TRIPOD-AI statement // *BMJ*. – 2024. – Vol. 385. – e078938. – <https://doi.org/10.1136/bmj-2023-078938>.
- 10 **Moons, K. G. M., Collins, G. S., Riley, R. D., et al.** PROBAST+AI: a tool to assess risk of bias and applicability of prediction model studies with artificial intelligence // *BMJ*. – 2025. – Vol. 388. – e078476. – <https://doi.org/10.1136/bmj-2023-078476>.

17.02.26 ж. баспаға түсті.

19.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. А. Татенов¹, Н. Н. Оспанова²

^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

Поступило в редакцию 17.02.26.

Поступило с исправлениями 19.03.26.

Принято в печать 04.06.26.

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ «МЕДИЦИНСКИЙ КОНСУЛЬТАНТ» НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В статье представлена интеллектуальная медицинская система «Медора». Она реализована как модульная цифровая платформа для предварительной оценки состояния пользователя на основе симптомов, анализа изображений кожи и персональных медицинских данных. Система включает структурированную анкету, предназначенную для проверки симптомов, модуль компьютерного зрения для анализа дерматологических особенностей, а также персональный медицинский профиль пользователя с возможностью хранения истории посещений и динамического мониторинга состояния пользователя.

В статье описаны архитектурные и инженерные решения, направленные на обеспечение масштабируемости, клинической безопасности и интерпретируемости результатов. Рассмотрены механизмы интерпретации результатов, позволяющие пользователю понять логику предварительных выводов системы. Языковые модели интегрированы только для создания пояснений и оказания образовательной поддержки пользователю; они не участвуют в процессе принятия медицинских решений и не заменяют клинический опыт специалиста.

Предложенный подход демонстрирует потенциал создания интегрированных цифровых медицинских решений, направленных на повышение доступности первичной медицинской оценки, цифрового ухода за пациентами и поддержку профилактической медицины. Система позиционируется как вспомогательное средство для раннего выявления потенциальных аномалий и оптимизации взаимодействия пользователей с системой здравоохранения.

Ключевые слова: интеллектуальные медицинские системы, проверка симптомов, анализ изображений кожи, цифровое здравоохранение, мульти-модальный анализ, персонализированная медицина, искусственный интеллект.

*A. A. Tatenov¹, N. N. Ospanova²

^{1,2}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 17.02.26.

Received in revised form 19.03.26.

Accepted for publication 04.06.26.

DEVELOPMENT OF A MEDICAL CONSULTANT APP BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

This article presents the Medora intelligent medical system. It is implemented as a modular digital platform for preliminary user assessment based on symptoms, skin image analysis, and personal medical data. The system includes a structured questionnaire for symptom screening, a computer vision module for dermatological analysis, and a personalized user medical profile with the ability to store a history of visits and dynamically monitor the user's condition.

The article describes architectural and engineering solutions aimed at ensuring scalability, clinical safety, and interpretability of results. Mechanisms for interpreting results, allowing the user to understand the logic behind the system's preliminary conclusions, are discussed. Language models are integrated only to generate explanations and provide educational support to the user; they are not involved in the medical decision-making process and do not replace a specialist's clinical expertise.

The proposed approach demonstrates the potential for creating integrated digital medical solutions aimed at increasing the accessibility of initial medical assessments, digital patient care, and support for preventive medicine. The system is positioned as an aid in the early detection of potential anomalies and optimization of user interactions with the healthcare system.

Keywords: intelligent medical systems, symptom checking, skin image analysis, digital health, multimodal analysis, personalized medicine, artificial intelligence.

«ТЕОРИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ФИЗИКА» СЕКЦИЯСЫ

МРНТИ 87.53.13; 31.15.27

<https://doi.org/10.48081/BGQF2028>

**Д. И. Бакранова¹, Н. Е. Абдылдаева², Л. С. Рахымбай³,
Е. Шабдан⁴, *Т. К. Идрисова⁵**

^{1,2,3,4,5}Research Group altAir Nanolab LLP, Республика Казахстан, г. Алматы;

¹SDU University, Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0793-9905>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9619-0627>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7924-837X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0113-8987>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6352-0908>

*e-mail: zhamauovatk@gmail.com

**УДЕЛЬНАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ СКОРОСТЬ УДАЛЕНИЯ
КАК УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТРИКА ОЦЕНКИ
ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА**

Загрязнение атмосферного воздуха остаётся одним из ключевых факторов риска для здоровья человека, что обуславливает необходимость разработки эффективных технологий удаления газообразных загрязнителей. Фотокаталитические системы рассматриваются как перспективное направление благодаря способности к минерализации загрязняющих веществ в условиях непрерывного потока. Однако их эффективность традиционно оценивается по степени удаления или кажущимся константам скорости, что не учитывает влияние расхода воздуха, геометрии реактора и площади активной поверхности и затрудняет корректное сопоставление различных систем.

В настоящей работе предложена удельная поверхностная скорость удаления r_s в качестве универсальной метрики для анализа фотокаталитических систем различного типа и масштаба. На основе анализа литературных данных показано, что значения r_s изменяются на несколько порядков в зависимости от условий эксплуатации и типа системы. Для газофазных процессов r_s достигает порядка $10^{-2} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, тогда как для водных систем

снижается до $10^{-7} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ вследствие различий в коэффициентах диффузии и сопротивлении массопереносу.

Установлено, что при переходе от лабораторных к проточным и натурным системам определяющую роль начинают играть процессы массопереноса и гидродинамика потока. В условиях низких скоростей потока эффективность определяется поверхностной кинетикой, тогда как при увеличении расхода воздуха процесс переходит в область, ограниченную массопереносом. Дополнительное влияние оказывают влажность, температура, спектральные характеристики излучения, а также способ фиксации фотокатализатора и устойчивость покрытий.

Показано, что использование метрики r_s позволяет перейти от описания локальной кинетики к системному анализу фотокаталитических процессов, учитывая реальным условиям эксплуатации. Полученные результаты подтверждают необходимость перехода от материал-центрированного подхода к системному проектированию фотокаталитических систем очистки воздуха.

Ключевые слова: фотокаталитическая очистка воздуха, газофазные загрязнители, атмосферное загрязнение, гидродинамика потока, массоперенос.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха является одним из ключевых факторов риска для здоровья человека и, по оценкам, ежегодно приводит примерно к 7 миллионам преждевременных смертей во всём мире [1]. Для снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха научное и инженерное сообщества разрабатывают различные системы очистки воздушных масс, включая механическую фильтрацию, электростатические методы, адсорбционные системы на основе активированного угля, а также биофильтрационные и почвенные системы [2]. Основным ограничением данных методов является увеличение аэродинамического сопротивления вследствие накопления частиц на фильтрующей поверхности, что приводит либо к росту энергопотребления, либо к снижению эффективности очистки [3]. В отличие от традиционных методов фильтрации, фотокаталитическая очистка воздуха основана на химическом разложении загрязнителей до конечных продуктов минерализации и не сопровождается накоплением загрязняющих веществ в системе [4]. Фотокатализ рассматривается как перспективное направление для удаления газообразных загрязнителей, таких как оксиды азота и летучие органические соединения, особенно в

условиях непрерывного потока воздуха [5]. Фотокаталитические системы способны не только улавливать аэрозольные частицы, но и обеспечивать дополнительную инактивацию биологических загрязнителей. Так, для вирусных аэрозолей показано, что при физическом удалении порядка $2 \log$ (99 %) суммарное снижение жизнеспособных вирусов достигает $2.5-4 \log$ в зависимости от типа вируса, что свидетельствует о значительном вкладе фотокаталитической инактивации.

В большинстве исследований эффективность фотокаталитических систем оценивается по степени удаления загрязнителя или кажущейся константе скорости реакции. Несмотря на удобство, данные показатели не учитывают расход воздуха, геометрию системы и площадь активной поверхности, что существенно затрудняет корректное сопоставление результатов, полученных в различных условиях. В частности, в системах прямого фотокатализа TiO_2 , выступающий в роли фотокатализатора, обеспечивает более высокую степень конверсии метанола до 87 %, тогда как в фотоэлектрохимических системах WO_3 , функционирующий в качестве фотоанода, несмотря на более низкую степень конверсии 65 %, формирует значительно более высокие фототоки и демонстрирует эффективность преобразования энергии свыше 65 %.

Данное расхождение указывает на то, что традиционные метрики, основанные на степени удаления загрязнителя, не позволяют корректно сопоставлять эффективность различных систем. Это обусловлено тем, что они не учитывают влияние условий массопереноса, геометрии реактора и особенностей протекания процессов в системе.

В этой связи возникает необходимость использования метрик, учитывающих как кинетические, так и транспортные характеристики процесса.

При переходе от лабораторных к проточным и натурным системам ключевую роль начинают играть процессы массопереноса и гидродинамика потока. Увеличение скорости воздушного потока приводит к снижению времени контакта загрязнителя с фотокаталитической поверхностью, однако одновременно усиливает его подвод к активным центрам. В таких условиях традиционные метрики перестают отражать реальную производительность системы. В ряде работ высокая фотокаталитическая активность демонстрируется в замкнутых реакторах, где процесс протекает в условиях ограниченного объема и определяется преимущественно объемной кинетикой. Такие результаты не могут быть напрямую перенесены на проточные системы очистки воздуха, поскольку не учитывают влияние транспорта вещества и распределения потока.

Дорожные покрытия представляют собой уникальную инженерную платформу для реализации фотокаталитических технологий благодаря их большой удельной площади и непосредственной близости к источникам загрязнения, прежде всего транспортным выбросам.

В отличие от традиционных систем очистки воздуха, локализованных в реакторах, фотокаталитические покрытия позволяют реализовать распределённую очистку в условиях реальной городской среды, где формируются основные потоки NO_x и летучих органических соединений. В последние годы развитие функционализированных и многофункциональных асфальтобетонных материалов показало, что такие системы способны не только обеспечивать фотокаталитическое разложение загрязнителей, но и одновременно выполнять дополнительные функции, включая самоочистку, регулирование температуры и повышение долговечности покрытий [6]. Таким образом, возникает необходимость введения нормализованных метрик, позволяющих учитывать как кинетические, так и транспортные ограничения процесса.

Поскольку результаты, полученные в замкнутых системах, отражают преимущественно свойства материала и не учитывают влияние массопереноса, в данном исследовании используется удельная поверхностная скорость удаления (r_s) как метрика, связывающая концентрацию, расход и площадь покрытия.

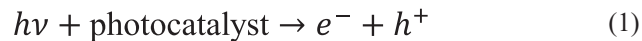
Целью настоящего исследования является сопоставление фотокаталитических систем различного типа и масштаба на основе метрики r_s , а также выявление закономерностей, определяющих переход от кинетически контролируемого режима к области, ограниченной массопереносом в условиях реальной эксплуатации.

Эффективность фотокаталитических покрытий также зависит от эксплуатационных характеристик и возможных побочных эффектов, что требует комплексного подхода к оценке. В этой связи в литературе предлагается комплексный подход к оценке эффективности фотокаталитических систем, включающий не только показатели разложения загрязнителей, но и эксплуатационные характеристики материалов, а также возможные побочные эффекты. Такой подход схематически представлен на рисунке 1 [7].

Современные исследования демонстрируют переход от оптимизации отдельных фотокаталитических материалов к разработке многофункциональных инфраструктурных систем, интегрирующих функции очистки воздуха, мониторинга состояния и самовосстановления. Li с соавторами реализовали комбинированный механизм, включающий как фотокаталитическое разложение загрязнителей, так и химическую адсорбцию CO_2 . При этом степень разложения NO_x достигает 40.9 %

при интенсивности излучения 800 Вт·м⁻², при этом в темновых условиях сохраняется эффективность на уровне 37.8 %, что связано с использованием люминесцентных компонентов. В то же время адсорбция CO₂ остаётся стабильной на уровне 29 % и не зависит от освещения, что подтверждает независимость механизмов.

Фотокаталитическое окисление основано на возбуждении полупроводникового материала под действием излучения с энергией, превышающей ширину запрещённой зоны, что приводит к генерации электронно-дырочных пар:



Сформированные носители заряда участвуют в последовательных реакциях с адсорбированными молекулами воды и кислорода с образованием активных форм кислорода, прежде всего гидроксильных радикалов •OH и супероксид-анионов O₂^{-•}, обладающих высокой окислительной способностью. Эти частицы обеспечивают разложение органических загрязнителей до конечных продуктов минерализации:

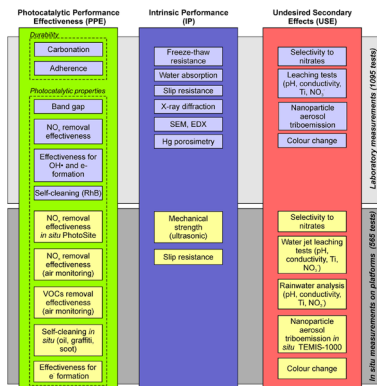


Рисунок 1 – Холистическая схема оценки эффективности фотокаталитических дорожных покрытий, включающая три взаимосвязанных блока: фотокаталитическую эффективность (PPE), эксплуатационные свойства материала (IP) и нежелательные побочные эффекты (USE), каждый из которых характеризуется набором количественных показателей, определяемых как в лабораторных, так и в натуральных условиях [7] (под лицензией CC BY)

Суммарный механизм фотокаталитического процесса представлен на рисунке 2.

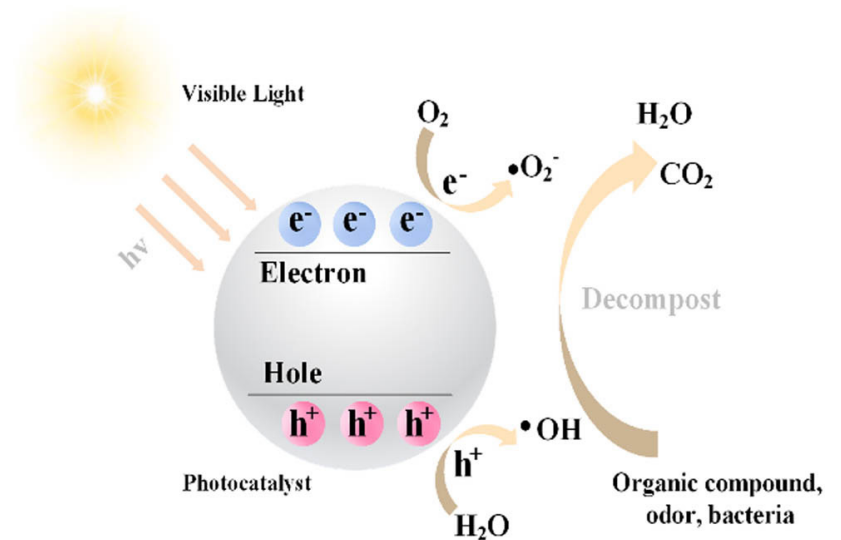


Рисунок 2 – Механизм фотокаталитического процесса разложения загрязнителей воздуха [8] (под лицензией CC BY 4.0)

Материалы и методы

Для сопоставления фотокаталитических систем различного типа и масштаба использовалась удельная поверхностная скорость удаления загрязнителя r_s . Расчет r_s выполнялся на основе опубликованных экспериментальных данных по концентрациям загрязнителя на входе и выходе, расходу воздуха и площади фотокаталитической поверхности.

Для проточных систем r_s определялась по выражению:

$$r_s = \frac{Q(C_{in} - C_{out})}{A}, \quad (3)$$

где Q – объёмный расход воздуха, C_{in} и C_{out} – входная и выходная концентрации загрязнителя, A – площадь активной фотокаталитической поверхности.

В случаях, когда данные представлены в виде коэффициента подачи очищенного воздуха (CADR), использовалось эквивалентное выражение:

$$r_s = \frac{CADR (C_{in} - C_{out})}{A} \quad (4)$$

Для корректного сопоставления различных работ все значения приводились к единицам $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

В отличие от традиционных показателей, основанных на степени удаления или константах скорости, r_s учитывает как изменение концентрации, так и поток вещества через систему, что позволяет корректно оценивать эффективность фотокаталитических процессов в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Гидродинамика потока и ограничение массопереноса

В ряде исследований фотокаталитическая активность оценивается через константы скорости разложения, нормированные на площадь поверхности, однако такие показатели не отражают реальную эффективность систем очистки воздуха в проточном режиме. В частности, скорость разложения летучих органических соединений составляет, достигая максимального значения, при содержании TiO_2 около 15 %. Аналогично, для оксидов азота широко используется показатель R , учитывающий изменение концентраций NO и NO_2 и отражающий суммарное снижение содержания NO_x в системе:

$$R_{\text{NO}_x} = \frac{\Delta C_{\text{NO}} - \Delta C_{\text{NO}_2}}{C_{\text{NO}_x}} \cdot 100 \quad (5)$$

Несмотря на широкое применение, данный параметр не учитывает расход воздуха и площадь фотокаталитической поверхности, что делает невозможным корректное сопоставление систем с различной геометрией и гидродинамическими условиями. Кроме того, использование процентного снижения концентрации может приводить к завышенной оценке эффективности в системах с низким расходом воздуха или в замкнутых объемах.

В отличие от этого, удельная поверхностная скорость удаления r_s учитывает как изменение концентрации, так и поток вещества через систему, что позволяет корректно сопоставлять фотокаталитические процессы в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Следует отметить, что многие литературные данные получены в замкнутых реакторах, где процесс определяется преимущественно объемной кинетикой и не учитывает влияние массопереноса. В таких условиях загрязнитель постепенно исчерпывается в ограниченном объеме, что приводит к завышенной оценке эффективности по сравнению с проточными

системами. Степень удаления формальдегида достигает 52 % за 40 минут в реакторе объемом 50 мл при отсутствии проточного режима.

В проточных системах определяющим фактором становится гидродинамика потока. При увеличении расхода воздуха наблюдается рост удельной скорости удаления, обусловленный усилением массопереноса и более эффективным подводом загрязнителя к активной поверхности. Однако при дальнейшем увеличении расхода рост замедляется и выходит на плато, что свидетельствует о переходе системы от кинетически контролируемого режима к области, ограниченной массопереносом.

Влияние свойств фотокатализатора в различных режимах переноса

При низких расходах воздуха различия между фотокаталитическими материалами проявляются наиболее отчетливо, поскольку эффективность определяется преимущественно кинетикой реакции и intrinsic свойствами катализатора. Более активные покрытия демонстрируют более высокие значения удельной скорости удаления.

С увеличением расхода воздуха различия между материалами уменьшаются. В условиях интенсивного потока вклад поверхностной кинетики снижается, и эффективность процесса определяется преимущественно условиями массопереноса. Это объясняет, почему в ряде работ различные фотокатализаторы демонстрируют сопоставимую эффективность при высоких скоростях потока.

Дополнительным ограничением для TiO_2 в реальных условиях являются спектральные характеристики солнечного излучения. Поскольку ширина запрещенной зоны TiO_2 составляет около 3.02 эВ, его активация возможна только в ультрафиолетовой области, $\lambda < 388$ нм, что соответствует приблизительно 4 % солнечного спектра. Это существенно ограничивает реализуемую фотокаталитическую активность и усиливает влияние факторов массопереноса.

Модификация TiO_2 , например введением железа, приводит к изменению фотофизических и кинетических характеристик системы. В частности, авторы добились снижения ширины запрещенной зоны с 3.02 до 2.32 эВ, а край поглощения смещается в область 530–535 нм, что обеспечивает активацию в видимом диапазоне. При этом увеличение содержания Fe- TiO_2 с 5 до 11 % сопровождается ростом константы скорости реакции с 1.78×10^{-4} до 2.39×10^{-4} мин^{-1} для углеводородов и с 6.61×10^{-3} до 7.98×10^{-3} мин^{-1} для NO_x . Однако дальнейшее увеличение содержания фотокатализатора приводит к эффекту насыщения, что указывает на ограничение процесса условиями массопереноса.

Влияние расхода воздуха проявляется противоположным образом при анализе степени удаления. При увеличении скорости потока наблюдается

снижение степени удаления загрязнителя вследствие уменьшения времени контакта, что подчёркивает ограниченность метрик, основанных исключительно на концентрационных изменениях.

Существенную роль играет также удельная поверхность фотокатализатора. Использование композитного фотокатализатора BOCN-TiO_2 приводит к увеличению удельной поверхности примерно в 5 раз и снижению скорости рекомбинации носителей заряда, что обеспечивает повышение эффективности деградации. При увеличении массы покрытия с 3 до 6 г наблюдается рост мгновенной скорости деградации более чем на 10% на каждом этапе, тогда как дальнейшее увеличение до 7 г приводит лишь к незначительному приросту, около 5%, что указывает на достижение режима насыщения.

Аналогичная зависимость наблюдается и для оксидов азота, для которых степень удаления достигает 74.1% через 30 минут и 95.6% через 60 минут при оптимальной загрузке 7 г ($77.8 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$).

В работе [8] для системы на основе наноструктурированного TiO_2 , нанесённого на дорожное покрытие, показано, что увеличение дозировки фотокатализатора приводит к росту числа активных центров и усилению поглощения излучения. Однако данный эффект носит нелинейный характер. Как показано на рисунке 3, при достижении загрузки порядка $22 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$ наблюдается выход на плато, что свидетельствует о переходе системы из кинетически контролируемого режима в область, ограниченную массопереносом [8].

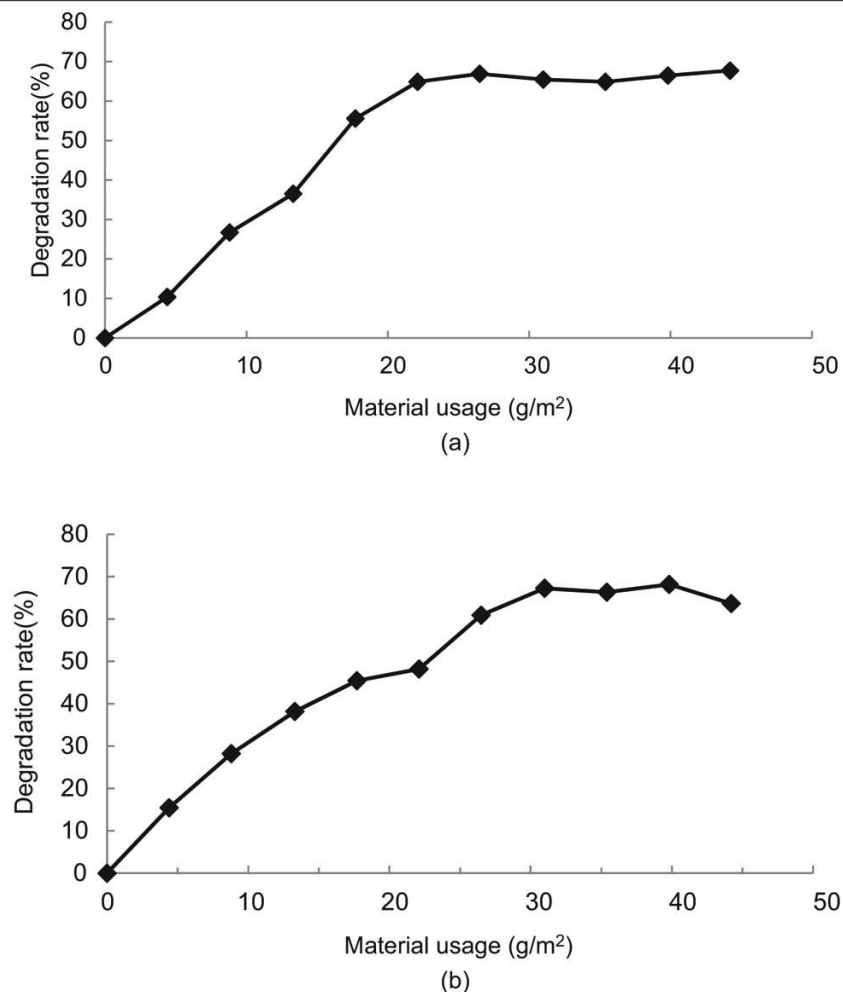


Рисунок 3 – Зависимость степени фотокаталитической деградации нефтяных загрязнений и химического потребления кислорода от дозировки наночастиц TiO_2 ($\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$), демонстрирующая нелинейный рост эффективности с выходом на плато при высоких значениях загрузки фотокатализатора [8] (под лицензией CC BY 4.0)

Геометрия поверхности, устойчивость и долговечность систем
Геометрические характеристики поверхности, включая шероховатость и пористость, оказывают существенное влияние на распределение потока и

интенсивность массопереноса. Формирование локальных вихревых структур вблизи поверхности способствует увеличению подвода загрязнителя к активным центрам, что приводит к росту удельной поверхностной скорости удаления. При этом изменение макропараметров, таких как высота канала, оказывает ограниченное влияние в условиях развитого перемешивания, что указывает на доминирующую роль локальной гидродинамики.

Дополнительным фактором, влияющим на эффективность фотокаталитических покрытий, является тепловой режим. Использование TiO_2 в составе асфальтовых материалов может приводить к снижению температуры поверхности за счёт отражения части солнечного излучения и увеличения теплоотдачи. Однако отражение ультрафиолетовой компоненты, ответственной за активацию фотокатализатора, снижает число фотонов, участвующих в генерации электронно-дырочных пар, что приводит к конкурирующим эффектам и снижению общей эффективности процесса.

Температурные условия эксплуатации также оказывают влияние на кинетику процесса. Показано, что при умеренных температурах ($0...-10\text{ }^{\circ}C$) изменение эффективности незначительно, тогда как при более низких температурах ($-20...-30\text{ }^{\circ}C$) наблюдается её снижение, обусловленное замедлением диффузии загрязнителей и ухудшением условий массопереноса.

Ключевым ограничением при практическом применении фотокаталитических покрытий является их механическая устойчивость. Испытания на морозостойкость показывают, что в результате циклов замораживания–оттаивания происходит частичное разрушение поверхностного слоя и снижение фотокаталитической активности (рисунок 4) [9].

Существенную роль играет способ фиксации фотокатализатора на поверхности. При нанесении в виде водной суспензии наблюдается значительное снижение эффективности вследствие удаления активного слоя под действием механических нагрузок. В то же время структурная фиксация фотокатализатора в поверхностной текстуре материала обеспечивает высокую устойчивость и стабильность активности. В частности, в работе [10] показано, что при внедрении TiO_2 в микроструктуру поверхности степень удаления NO_x сохраняется на уровне 86 % и снижается лишь до 84 % после абразивного воздействия, тогда как для покрытий, нанесённых в виде суспензии, эффективность снижается с 85 % до 60 %. Анализ различных способов закрепления фотокатализатора (рисунок 5) показывает, что при равномерном распределении материала в объёме (SG) эффективность разложения не превышает 1 % вследствие отсутствия контакта с излучением. При поверхностном нанесении (ACG) наблюдается значительное снижение эффективности на начальных стадиях эксплуатации, тогда как при внедрении

фотокатализатора в поверхностную структуру (SEG) эффективность остаётся практически неизменной (85 %) в течение всего времени испытаний [10].

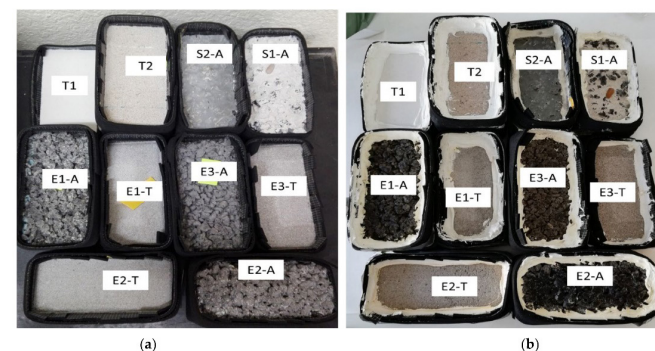


Рисунок 4 – Фотокаталитические образцы (а) до и (б) после испытания на замораживание-оттаивание [9] (MDPI)

При этом нанесение фотокаталитических покрытий не приводит к значимому увеличению концентрации аэрозольных частиц в воздухе. Концентрация Ti -содержащих частиц остаётся ниже $10\text{ частиц}\cdot\text{см}^{-3}$, что существенно ниже предельно допустимых значений.

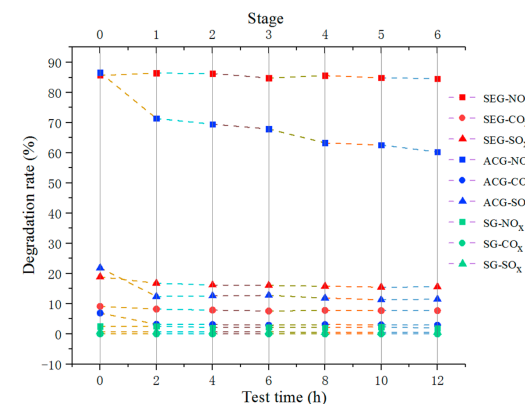


Рисунок 5 – Изменение степени фотокаталитического разложения NO_x , CO_x и SO_x во времени при различных способах фиксации фотокатализатора. SEG – spray embedding group, ACG – aqueous coating group, SG – stirring group [10] (MDPI)

Сопоставление метрик и интерпретация кинетических режимов

Традиционные метрики, используемые для оценки фотокаталитических процессов, такие как степень удаления загрязнителя или кажущиеся константы скорости, не позволяют корректно описывать поведение систем в проточных условиях. Степень удаления зависит от времени контакта и начальной концентрации, тогда как константы скорости отражают преимущественно локальную кинетику реакции и не учитывают транспортные ограничения.

В частности, показано, что при низких концентрациях загрязнителя фотокаталитическая деградация NO может быть описана кинетикой псевдопервого порядка, однако при этом процесс протекает в режиме, ограниченном массопереносом [11]. Низкая степень адсорбции NO на поверхности фотокатализатора указывает на то, что лимитирующей стадией является подвод реагента к активной поверхности, а не скорость химической реакции.

В этих условиях интегральные показатели, такие как clean air delivery rate (CADR), позволяют учитывать общий поток очищаемого воздуха, однако не дают информации о локальных процессах, протекающих на поверхности фотокатализатора. В отличие от этого, удельная поверхностная скорость удаления r_s объединяет концентрационные и гидродинамические параметры и позволяет анализировать эффективность систем на уровне элементарных процессов.

Использование r_s позволяет сопоставлять результаты, полученные в различных условиях, включая различную геометрию реакторов, расход воздуха и площадь активной поверхности. Это делает возможным выявление перехода между кинетически контролируемым режимом, характерным для низких скоростей потока и высоких концентраций, и режимом, ограниченным массопереносом, реализующимся при увеличении расхода воздуха и снижении времени контакта.

Анализ временной динамики фотокаталитического процесса дополнительно подтверждает данный переход. В начальный период, в промежутке от 10 до 40 минут, наблюдается быстрый рост степени удаления загрязнителей, достигающий 18–20 % для NO и 12–13 % для CO, что соответствует высокой доступности активных центров и благоприятным условиям массопереноса. По мере протекания процесса эффективность выходит на плато или снижается до 5–7 % к 120 минутам, что связано с ограничением подвода реагентов и изменением условий взаимодействия на поверхности [12].

Использование удельной поверхностной скорости удаления r_s позволяет перейти от описания локальной кинетики реакции к системному анализу фотокаталитических процессов, учитывающему влияние гидродинамики, геометрии и условий эксплуатации. Это обеспечивает более

корректную оценку эффективности фотокаталитических систем и позволяет выявлять лимитирующие стадии процесса в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Фотокаталитическая активность в газовой фазе определяется не только свойствами материала, но и условиями среды, в первую очередь относительной влажностью, которая влияет на механизм реакции и адсорбцию реагентов. При разложении ацетальдегида характер процесса существенно изменяется с увеличением относительной влажности. В сухих условиях немодифицированный TiO₂ демонстрирует более высокую скорость разложения, при этом полное удаление ацетальдегида достигается в течение порядка 400 минут облучения. Модифицированный гидрофильный образец в тех же условиях обеспечивает разложение около 69 % исходного количества за аналогичный период. При увеличении влажности до 33.6 % различия между образцами практически исчезают, и скорость реакции становится сопоставимой для обоих материалов. Дальнейший рост влажности до 61 % приводит к снижению скорости реакции, что связано с подавлением адсорбции ацетальдегида вследствие конкуренции с молекулами воды. Полученные результаты указывают на смену лимитирующей стадии процесса: в сухих условиях реакция контролируется поверхностной кинетикой, тогда как при увеличении влажности ключевую роль начинают играть адсорбция и массоперенос.

В полевых исследованиях показано, что концентрация NO_x над фотокаталитическим покрытием изменяется в диапазоне 0.086–0.125 ppm и зависит от времени суток и внешних условий. При этом установлено, что относительная влажность оказывает положительное влияние на эффективность удаления, тогда как повышение температуры и интенсивности излучения сопровождается её снижением. В работе Hingorani с соавторами [13] продемонстрировано, что фотокаталитические дорожные покрытия обеспечивают степень удаления NO_x, как правило, менее 10 % даже при контролируемом облучении. Соответствующие значения удельной поверхностной скорости удаления составляют порядка 10⁻⁴ мг·м⁻²·с⁻¹, что на один–два порядка ниже по сравнению с оптимизированными реакторными системами. Наблюдаемое снижение эффективности связано с влиянием факторов окружающей среды и особенностями функционирования системы. Влажность подложки определяет доступность активных центров и характер протекания реакции, а также процессы старения, включая деградацию покрытия и карбонизацию. Использование связующих компонентов может приводить к частичному экранированию поверхности фотокатализатора, вследствие чего значительная доля активных центров становится недоступной для взаимодействия с загрязнителем [14].

В водной фазе значения r_s оказываются значительно ниже по сравнению с газофазными системами. В исследованиях деградации органических микрозагрязнителей в каскадном реакторе с рециркуляцией потока показано, что при начальной концентрации триклозана порядка 14.5 ppb и расходе жидкости $26.5 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ степень удаления достигала 53 % за 120 минут облучения. Пересчёт экспериментальных данных в удельную поверхностную скорость удаления показывает, что значение r_s составляет порядка $10^{-7} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, что на несколько порядков ниже значений, характерных для фотокаталитических систем в газовой фазе. Это различие обусловлено более низкими коэффициентами диффузии в жидкой фазе и повышенным сопротивлением массопереносу.

Сопоставление литературных данных (таблица 1) позволяет перейти от качественного анализа к количественному сравнению фотокаталитических систем. Использование единой метрики r_s даёт возможность выявить различия в эффективности, обусловленные не только свойствами материала, но и условиями массопереноса и типом системы.

Таблица 1 – Сравнение фотокаталитических систем различного масштаба и типа на основе используемых метрик эффективности. Для проточных, пилотных и натуральных систем приведены значения удельной поверхностной скорости удаления r_s , тогда как для замкнутых реакторов указаны константы скорости деградации, отражающие внутреннюю кинетику фотокатализатора

Тип системы	Загрязнитель	Материал	Значение	Источник
Реактор (ISO)	NO_x	TiO_2 (известковое покрытие)	10^{-4}	[15]
Проточный реактор	NO_x	Zn/TiO_2	$10^{-3} - 10^{-2}$	[16]
Кольцевой реактор	NO	TiO_2 (на стекловолокне)	10^{-3}	[11]
Устройство / система	HCHO	$\text{C/TiO}_2/\text{MOF}$	10^{-2}	[17]
Пилотный масштаб (низкий поток)	NO_x	TiO_2 покрытие	10^{-5}	[18]
Пилотный масштаб (высокий поток)	NO_x	TiO_2 покрытие	10^{-3}	[18]
Натурные условия	NO_x	TiO_2 покрытие	10^{-4}	[13]
Интегрированная строительная система	HCHO	$\text{TiO}_2/\text{MnO}_x/\text{CeO}_2$	10^{-3}	[19]
Интегрированная строительная система	HCHO	TiO_2 (гибридная система)	10^{-2}	[20]

Анализ представленных данных показывает, что значения r_s изменяются на три порядка при переходе от пилотных условий с ограниченным потоком с показателями $10^{-5} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ к интегрированным системам с $10^{-2} \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При этом для одного и того же фотокатализатора наблюдается существенный разброс значений, что указывает на доминирующую роль массопереноса и конструктивных параметров системы по сравнению с внутренними свойствами материала.

Информация о финансировании

Авторы заявляют, что для проведения исследования, написания и/или публикации данной статьи была получена финансовая поддержка. Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP32721671 «Интеллектуальная мультимедийная платформа фотоэлектрохимических биосенсоров на основе гибридных гетероструктур BiVO_4/ZnO и $\text{TiO}_2/\text{MXene}$ »).

Выводы

В настоящей работе выполнено сопоставление фотокаталитических систем различного типа и масштаба с использованием удельной поверхностной скорости удаления r_s в качестве нормализованной метрики. Показано, что традиционные показатели, такие как степень удаления загрязнителя и кажущиеся константы скорости, не позволяют корректно оценивать эффективность систем в проточных и натуральных условиях, поскольку не учитывают влияние расхода воздуха, геометрии реактора и площади активной поверхности.

Установлено, что при переходе от лабораторных к проточным и натурным системам определяющую роль начинают играть процессы массопереноса и гидродинамика потока. В этих условиях наблюдается переход от кинетически контролируемого режима к области, ограниченной массопереносом, что проявляется в насыщении эффективности при увеличении расхода воздуха, дозировки фотокатализатора и изменении условий среды.

Показано, что различия между фотокаталитическими материалами наиболее выражены при низких скоростях потока, когда эффективность определяется поверхностной кинетикой, тогда как при увеличении расхода воздуха вклад внутренних свойств катализатора снижается, и поведение системы определяется условиями переноса вещества. Дополнительные ограничения связаны с влиянием влажности, температурных условий, спектральных характеристик излучения, а также механической устойчивостью и способом фиксации фотокаталитических покрытий.

Сопоставление литературных данных показало, что значения r_s изменяются на несколько порядков в зависимости от типа системы, при этом

для одного и того же фотокатализатора наблюдается значительный разброс, обусловленный различиями в условиях массопереноса и конструктивных параметрах. В частности, значения r_s для газофазных систем достигают порядка 10^{-2} мг·м⁻²·с⁻¹, тогда как для водных систем они снижаются до 10^{-7} мг·м⁻²·с⁻¹ вследствие различий в коэффициентах диффузии и сопротивлении переносу вещества.

Таким образом, использование метрики r_s позволяет перейти от анализа локальной кинетики реакции к системному описанию фотокаталитических процессов, учитывающему влияние гидродинамики, геометрии и условий эксплуатации. Это обеспечивает более корректную оценку эффективности фотокаталитических систем и позволяет выявлять лимитирующие стадии процесса в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Полученные результаты подтверждают необходимость перехода от материал-центрированного подхода к системному анализу фотокаталитических процессов, что является ключевым условием для разработки масштабируемых и эффективных технологий очистки воздуха.

REFERENCES

- 1 **Chouhan, J., Chandrappa, A.** A systematic review on photocatalytic concrete for pavement applications: an innovative solution to reduce air pollution // *Innovative infrastructure solutions*. – 2023. – Т. 8. – № 3.
- 2 **Son, S., Elkamhawy, A., Jang, C.** Active Soil Filter System for Indoor Air Purification in School Classrooms // *International journal of environmental research and public health*. – 2022. – Т. 19. – № 23.
- 3 **Guo, Y., Sun, Z., Weschler, L., Zhang, Y.** Air purifier or fresh air system? A comparison of energy consumption and cost in urban China residential buildings // *Science china-technological sciences*. – 2024. – Т. 67. – № 9. – С. 2637–2647.
- 4 **Devadoss, D., Surbaugh, K., Manevski, M., Wickramaratne, C., Chaput D., Chung A., de Leon F., Chand H., Dhau J.** Indoor-air purification by photoelectrochemical oxidation mitigates allergic airway responses to aerosolized cat dander in a murine model // *Scientific reports*. – 2023. – Т. 13. – № 1.
- 5 **Ren, H., Koshy, P., Chen, W., Qi, S., Sorrell, C.** Photocatalytic materials and technologies for air purification // *Journal of hazardous materials*. – 2017. – Т. 325. – С. 340–366.
- 6 **Segundo, I., Freitas, E., Branco, V., Landi, S. J., Costa, M., Carneiro, J.** Review and analysis of advances in functionalized, smart, and multifunctional asphalt mixtures // *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*. – 2021. – Т. 151.

- 7 **Jimenez-Relinque, E., Rubiano, F., Hingorani, R., Grande, M., Castillo, A., Nevshupa, R., Castellote, M.** New Holistic Conceptual Framework for the Assessment of the Performance of Photocatalytic Pavement // *FRONTIERS IN CHEMISTRY*. – 2020. – Т. 8.
- 8 **Wang, Q., Zheng, K., Yu, H., Zhao, L., Zhu, X., Zhang, J.** Laboratory experiment on the nano-TiO₂ photocatalytic degradation effect of road surface oil pollution // *Nanotechnology reviews*. – 2020. – Т. 9. – № 1. – С. 922–933.
- 9 **Jimenez-Relinque, E., Grande, M., Rubiano, F., Castellote, M.** Durability and Safety Performance of Pavements with Added Photocatalysts // *Applied Sciences-Basel*. – 2021. – Т. 11. – № 23.
- 10 **Shu, J., Wang, X., Yang, B., Wang, X.** Research on a New Loading Method for Nano TiO₂ Photocatalytic Asphalt Pavement // *SUSTAINABILITY*. – 2022. – Т. 14. – № 19.
- 11 **Tomas, M., Radetic, B., Radetic, L., Benjak, P., Grcic, I.** Gas-Phase Photocatalytic Transformations of Nitric Oxide Using Titanium Dioxide on Glass Fiber Mesh for Real-Scale Application // *NITROGEN*. – 2024. – Т. 5. – № 3. – С. 610–623.
- 12 **Zhang, L., Lu, Q., Shan, R., Zhang, F., Muhammad, Y., Huang, K.** Photocatalytic degradation of vehicular exhaust by nitrogen-doped titanium dioxide modified pavement material // *TRANSPORTATION RESEARCH PART D-TRANSPORT AND ENVIRONMENT*. – 2021. – Т. 91.
- 13 **Hingorani, R., Jimenez-Relinque, E., Grande, M., Castillo, A., Nevshupa R., Castellote M.** From analysis to decision: Revision of a multifactorial model for the in situ assessment of NO_x abatement effectiveness of photocatalytic pavements // *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*. – 2020. – Т. 402.
- 14 **Yang, Y., Zhang, S., Yan, Z., Lin, L., Ji, T.** Improved purification efficiency and stability of photocatalytic cement-based pavement coated with colloidal graphitic carbon nitride // *SURFACES AND INTERFACES*. – 2024. – Т. 53.
- 15 **Gómez, J., Giampiccolo, A., Tobaldi, D., Mair, S., da Silva, C., Barrasa, M., Maskell, D., Ansell, M., Kurchania, R., Mayer, F., Labrincha, J., de Miguel, Y., Ball, R.** Photocatalytic Lime Render for Indoor and Outdoor Air Quality Improvement // *CATALYSTS*. – 2021. – Т. 11. – № 3.
- 16 **Mavrikos, A., Papoulis, D., Todorova, N., Papailias, Trapalis C., Panagiotaras, D., Chalkias, D., Stathatos, E., Gianni, E., Somalaki, K., Sygkridou, D., Komarneni, S.** Synthesis of Zn/Cu metal ion modified natural palygorskite clay - TiO₂ nanocomposites for the photocatalytic outdoor and indoor air purification // *JOURNAL OF PHOTOCHEMISTRY AND PHOTOBIOLOGY A-CHEMISTRY*. – 2022. – Т. 423.

17 **Wei, W., Zhang, G., Wang, W., Li, J., Li, N., Ji, J., Yu, B.** Photocatalytic energy driven building sustainable power, air purification and air dehumidification // ENERGY. – 2025. – Т. 337.

18 **Tang, X., Ughetta, L., Gould, R., Everman, R., Skorina, T., Chen, S., Kavanagh, M., Levinson, R., Destailats, H.** Pilot-scale NO_x removal efficacy of photocatalytic roofing granules under urban environmental conditions // SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS. – 2022. – Т. 247.

19 **Gao, R., He, W., Liu, X., Hu, Z., Yu, H., Wang, K.** The performance analysis of a novel photocatalytic-thermal-catalytic-photovoltaic-Trombe wall system integrated with compound parabolic concentrator // BUILDING AND ENVIRONMENT. – 2022. – Т. 221.

20 **Li, W., Ling, X.** Performance analysis of a sorption heat storage-photocatalytic combined passive solar envelope for space heating and air purification // ENERGY. – 2023. – Т. 280.

Поступило в редакцию 04.05.26.

Поступило с исправлениями 15.05.26.

Принято в печать 07.06.26.

*Д. И. Бақранова¹, Н. Е. Абдылдаева², Л. С. Рахымбай³,
Е. Шабдан⁴, *Т. К. Идрисова⁵*

^{1,2,3,4,5}Research Group altAir Nanolab LLP, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

¹SDU University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

04.05.26 ж. баспаға түсті.

15.05.26 ж. түзетулерімен түсті.

07.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ФОТОКАТАЛИТИКАЛЫҚ АУАНЫ ТАЗАЛАУДЫ БАҒАЛАУҒА АРНАЛҒАН УНИВЕРСАЛДЫ МЕТРИКА РЕТІНДЕГІ БЕТТЕРДІ ЖОЮ ҚАРҚЫМЫ

Атмосфералық ауаның ластануы адам денсаулығына әсер ететін негізгі факторлардың бірі болып табылады, сондықтан газтәрізді ластағыштарды жоюдың тиімді технологияларын әзірлеу өзекті мәселе болып қала береді. Фотокаталитикалық жүйелер үздіксіз ағын жағдайында ластағыштарды минералдау қабілетінің арқасында перспективалы бағыт ретінде қарастырылады. Алайда олардың тиімділігін бағалау көбінесе жою дәрежесі немесе көрінетін жылдамдық тұрақтылары арқылы жүзеге асырылады, бұл ағын шығыны, реактор геометриясы және белсенді бет ауданы сияқты

маңызды параметрлерді ескермейді және әртүрлі жүйелерді дұрыс салыстыруды қиындатады.

Осы жұмыста фотокаталитикалық жүйелердің әртүрлі типтері мен масштабтарын салыстыру үшін меншікті беттік жою жылдамдығы rs әмбебап метрика ретінде ұсынылған. Әдеби деректерді талдау нәтижесінде rs мәндері жүйе түріне және пайдалану жағдайларына байланысты бірнеше реттік өзгеретіндігі көрсетілді. Газ фазасындағы жүйелер үшін r , шамасы $10^{-2} \text{ м} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ деңгейіне жетсе, сұйық фазада бұл мән $10^{-7} \text{ м} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ дейін төмендейді, бұл массоперенос кедергілері мен диффузия коэффициенттерінің айырмашылығымен түсіндіріледі.

Зерттеу нәтижелері фотокаталитикалық процестердің тиімділігі материал қасиеттерімен ғана емес, сонымен қатар гидродинамика, массоперенос және жүйе геометриясымен анықталатынын көрсетті. Төмен ағын жылдамдықтарында процесс кинетикалық бақылауда болса, ағын артқан сайын массоперенос шектеуші факторға айналады. Сонымен қатар, ылғалдылық, температура, сәулелену спектрі және фотокатализаторды бекіту тәсілі жүйенің тиімділігіне елеулі әсер етеді.

Осылайша, rs метрикасын қолдану фотокаталитикалық жүйелерді бағалауда материал-бағытталған тәсілден жүйелік талдауға көшуге мүмкіндік береді және нақты пайдалану жағдайларында шектеуші сатыларды анықтауға жағдай жасайды. Алынған нәтижелер ағын жағдайында жұмыс істейтін масштабталатын фотокаталитикалық ауа тазарту жүйелерін әзірлеу үшін маңызды болып табылады.

Кілтті сөздер: фотокаталитикалық ауаны тазарту, газофазды ластауыштар, атмосфералық ластауыштар, ағын гидродинамикасы, массауыстыру.

*D. I. Bakranova¹, N. E. Abdylidaeva², L. S. Rakhymbay³,
E. N. Shabdan⁴, *T. K. Idrissova⁵*

^{1,2,3,4,5}Research Group altAir Nanolab LLP, Republic of Kazakhstan, Almaty;

¹SDU University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 04.05.26.

Received in revised form 15.05.26.

Accepted for publication 07.06.26.

SURFACE-SPECIFIC REMOVAL RATE AS A UNIVERSAL METRIC FOR EVALUATING PHOTOCATALYTIC AIR PURIFICATION

Air pollution remains one of the major global health risks, necessitating the development of efficient technologies for the removal of gaseous pollutants. Photocatalytic systems are considered a promising approach due to their ability to mineralize contaminants under continuous flow conditions. However, their performance is commonly evaluated using removal efficiency or apparent reaction rate constants, which do not account for key operational parameters such as airflow rate, reactor geometry, and active surface area, thus limiting the comparability of different systems.

In this work, the surface-specific removal rate (r_s) is proposed as a universal metric for the evaluation and comparison of photocatalytic systems of different types and scales. Based on a comprehensive analysis of literature data, it is shown that r_s values vary over several orders of magnitude depending on system configuration and operating conditions. For gas-phase systems, r_s can reach values on the order of $10^{-2} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, whereas in aqueous systems it decreases to approximately $10^{-7} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ due to differences in diffusion coefficients and mass transfer limitations.

The results demonstrate that, when transitioning from laboratory-scale to flow-through and real-world systems, mass transfer and flow hydrodynamics become the dominant factors governing performance. At low flow rates, the process is primarily controlled by surface reaction kinetics, while at higher flow rates it shifts toward a mass-transfer-limited regime. Additional factors, including humidity, temperature, irradiation spectrum, and catalyst fixation method, also significantly affect system performance.

The use of r_s enables the transition from a material-centered evaluation to a system-level analysis that accounts for real operating conditions. The findings highlight the necessity of considering transport phenomena and reactor design in the development of scalable and efficient photocatalytic air purification technologies.

Keywords: photocatalytic air purification, gas-phase pollutants, atmospheric pollutants, flow hydrodynamics, mass transfer.

MPHTI 37.31.19
DOI

***Е. А. Батешов¹, Ж. А. Ибатаев², М. К. Жукенов³,
Б. Е. Хамзина⁴, Е. Хуанбай⁵**

^{1,2,3,4,5}Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2116-2108>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-222X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2942-3931>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0552-7464>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-1645>

*e-mail: ye.bateshov@kazatu.edu.kz

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ПРОВЕРКА ГРАВИТАЦИОННО-ИНЕРЦИОННОЙ МЕТОДИКИ СУБХАНКУЛОВА ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ АЛМАТЫ

В настоящей работе выполнена ретроспективная проверка гравитационно-инерционной методики прогнозирования землетрясений, предложенной В. Г. Субханкуловым. Методика основана на анализе сонаправленности гравитационных и инерционных сил небесных тел, действующих на горные массивы в зонах столкновения тектонических плит. Разработан математический аппарат верификации, включающий: дифференциальный анализ приливного потенциала (разложение в ряд Лежандра, вычисление радиальной и тангенциальной компонент приливного ускорения), интегрирование тензора приливных напряжений по объёму горного массива, формулировку интегрального критерия сейсмической опасности $S(t)$ и энергетического условия разрушения. Принципиальной особенностью методики является учёт инерционных сил, возникающих вследствие ускоренного движения Земли: центробежной силы от суточного вращения вокруг собственной оси, силы Кориолиса, орбитального ускорения при обращении вокруг Солнца, а также галактического ускорения, обусловленного движением Солнечной системы вокруг центра Млечного Пути. Совокупное воздействие этих инерционных компонент совместно с приливными силами Луны, Солнца и планет формирует переменное поле напряжений в горном массиве. Для 14 крупнейших землетрясений Алматинского сейсмоактивного района

(1887–2024 гг., M 5.0–8.3) вычислены эллиптические координаты небесных тел по алгоритмам Миуса, рассчитаны интегральные показатели сонаправленности сил и выполнена балльная оценка астрономических конфигураций. Результаты: 67 % исторических землетрясений (6 из 9) и 71 % расширенной выборки (10 из 14) демонстрируют значительное или высокое совпадение с методикой. Обсуждаются ограничения методики, связанные с малым объёмом выборки, и перспективы перехода к численному интегрированию тензорных полей напряжений.

Ключевые слова: прогнозирование землетрясений, приливной потенциал, инерционные силы, сейсмический триггер, сонаправленность сил, лунно-солнечные приливы, сейсмичность Алматы, методика Субханкулова

Введение

Проблема прогнозирования землетрясений остаётся одной из фундаментальных задач геофизики. Как отмечает Геллер (1997), «надёжное прогнозирование отдельных землетрясений пока невозможно» [1, с. 425]. Вместе с тем, ряд исследователей обращает внимание на корреляции между сейсмической активностью и астрономическими факторами. Метивье и др. (2009) на выборке 442 412 событий из каталога NEIC показали «чёткая корреляция (с достоверностью ~99 %) между фазой земного прилива и временем наступления сейсмических событий» [2, с. 370]. Кокран и др. (2004) установили, что приливные силы Земли способны инициировать мелкофокусные надвиговые землетрясения [3, с. 1164].

В. Г. Субханкулов предложил методику, основанную на анализе сонаправленности гравитационных и инерционных сил, действующих на горные системы в зонах столкновения тектонических плит. Методика созвучна с результатами Идэ и др. (2016), обнаруживших, что «очень крупные землетрясения, как правило, происходят вблизи момента максимальной амплитуды приливных напряжений» [4, с. 834]. Субханкулов оценивал точность в ~80 %, отводя ~20 % на внутренние тектонические процессы [5].

Алматинский сейсмоактивный район расположен на северном фланге Тянь-Шаня – внутриконтинентального орогена, сформированного коллизией Индийской и Евразийской плит. Как показали Крюгер и др. (2018), этот регион пережил серию катастрофических событий: «серия началась с Беловодского землетрясения 1885 года» и продолжилась Верненским (1887), Чиликским (1889, M_w 7.9) и Кеминским (1911, M_w 8.0) землетрясениями [6, с. 1824]. Абдрахматов и др. (2016) документировали многосегментный разрыв Чиликского события протяжённостью не менее 175 км

[7, с. 4615]. Эми и др. (2021) продемонстрировали, что погребённые разломы непосредственно под Алматы создают значительную сейсмическую угрозу [8]. Данный район представляет идеальный полигон для верификации методики Субханкулова.

Материалы и методы

Уравнения движения элемента горного массива

Рассмотрим элемент горного массива массой dm , расположенный в точке r в зоне столкновения тектонических плит. В неинерциальной системе отсчёта, связанной с поверхностью Земли, уравнение движения по второму закону Ньютона имеет вид:

$$dm \cdot \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = d\mathbf{F}_{\text{grav}} + d\mathbf{F}_{\text{inert}} + d\mathbf{F}_{\text{tect}} + d\mathbf{F}_{\text{elast}} \quad (1)$$

где $d\mathbf{F}_{\text{grav}}$ – дифференциал гравитационных сил, $d\mathbf{F}_{\text{inert}}$ – дифференциал инерционных сил, $d\mathbf{F}_{\text{tect}}$ – дифференциал тектонических напряжений, $d\mathbf{F}_{\text{упр}}$ – дифференциал упругих сил горной породы. Суммарная гравитационная сила на элемент:

$$d\mathbf{F}_{\text{grav}} = -G \cdot dm \cdot \sum_i \frac{M_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_i) \quad (2)$$

где суммирование ведётся по всем небесным телам (Солнце, Луна, планеты), M_i – масса i -го тела, r_i – его радиус-вектор.

Дифференцирование приливного потенциала

Ключевую роль в методике играет приливной потенциал. Гравитационный потенциал небесного тела массой M на расстоянии d от центра Земли в точке наблюдения с геоцентрическим расстоянием r и зенитным углом ζ :

$$\Phi(r, \zeta) = - \frac{G \cdot M}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cdot \cos \zeta}} \quad (3)$$

Разложение в ряд Лежандра и выделение приливной части (с вычетом потенциала в центре Земли):

$$W(r, \zeta) = - \frac{GM}{d} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{r}{d}\right)^n \cdot P_n(\cos \zeta) \quad (4)$$

где $P_n(\cos \zeta)$ — полиномы Лежандра. Для главного члена ($n = 2$):

$$W_2(r, \zeta) = - \frac{G \cdot M \cdot r^2}{d^3} \cdot \frac{1}{2} (3 \cos^2 \zeta - 1) \quad (5)$$

Дифференцирование приливного потенциала по радиальной координате r даёт приливное ускорение:

$$\frac{dW_2}{dr} = -\frac{G \cdot M \cdot r}{d^3} \cdot (3\cos^2 \zeta - 1) \quad (6)$$

Дифференцирование по зенитному углу ζ даёт тангенциальную компоненту:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{dW_2}{d\zeta} = \frac{3G \cdot M \cdot r}{d^3} \cdot \sin \zeta \cdot \cos \zeta \quad (7)$$

Полный градиент приливного потенциала – вектор приливного ускорения:

$$\mathbf{a}_{\text{tidal}} = \text{grad } W_2 = \frac{dW_2}{dr} \cdot \hat{\mathbf{e}}_r + \frac{1}{r} \frac{dW_2}{d\zeta} \cdot \hat{\mathbf{e}}_\zeta \quad (8)$$

Для Луны ($M_{\text{Луна}} = 7.342 \times 10^{22}$ кг, $d_{\text{Луна}} = 3.844 \times 10^8$ м) при $r = R_{\text{Земля}}$ и $\zeta = 0$ (подлунная точка) радиальная компонента:

$$\left| \frac{dW_2}{dr} \right|_{\text{max}} = \frac{2G \cdot M_{\text{Moon}} \cdot R_{\text{Earth}}}{d_{\text{Moon}}^3} \approx 1.10 \times 10^{-6} \text{ м/с}^2 \quad (9)$$

Интегрирование приливного напряжения по объёму горного массива

Для оценки суммарного воздействия приливных сил на горный массив объёмом V необходимо проинтегрировать тензор приливных напряжений. Тензор деформаций, вызванный приливым потенциалом, связан с потенциалом через числа Лява h_2, l_2, k_2 :

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \delta_{ij} \cdot \varepsilon_{kk} + 2\mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad (10)$$

где λ, μ – параметры Ламе горной породы, ε_{ij} – компоненты тензора деформаций. Суммарная приливая сила на горный массив получается интегрированием по объёму V горного блока. Для прямоугольного блока с размерами $L_1 \times L_2 \times L_3$ пределы интегрирования: x от 0 до L_1 , y от 0 до L_2 , z от 0 до L_3 ; для сферической модели: r от R_1 до R_2 (глубины очага), θ от θ_1 до θ_2 , φ от φ_1 до φ_2 (угловые границы массива):

$$\bar{\mathbf{F}}_{\text{tidal}} = \iiint_V \rho(\vec{r}) \cdot \text{grad } W_2(\vec{r}, t) dV \quad (11)$$

В формуле (11) тройной интеграл обусловлен трёхмерностью объёма горного массива V . При моделировании прямоугольным блоком пределы интегрирования задаются в декартовых координатах: x от x_0 до $x_0 + L_1$, y от y_0 до $y_0 + L_2$, z от z_0 до $z_0 + H$, где L_1, L_2 – горизонтальные размеры, H – глубина массива. При сферической модели: r от R_1 (нижняя граница) до R (Земля) (поверхность), θ от θ_1 до θ_2 , φ от φ_1 до φ_2 (угловые границы сейсмоактивной зоны). Для Заильского Алатау характерные размеры: $L_1 \approx 150$ км, $L_2 \approx 30$ км, $H \approx 25$ км (глубина сейсмогенного слоя).

где $\rho(r)$ – плотность горной породы. Для однородного массива плотности ρ_0 с характерным линейным размером L :

$$\bar{\mathbf{F}}_{\text{tidal}} \approx \rho_0 \cdot L^3 \cdot \text{grad } W_2(\vec{r}_0, t) \quad (12)$$

Суперпозиция приливных потенциалов нескольких тел

При наличии нескольких небесных тел суммарный приливной потенциал определяется принципом суперпозиции:

$$W_{\text{total}}(\vec{r}, t) = \sum_i W_2^{(i)} = -\sum_i \frac{GM_i r^2}{d_i^3} \cdot \frac{1}{2} (3\cos^2 \zeta_i - 1) \quad (13)$$

Временная производная суммарного потенциала определяет скорость изменения приливных напряжений:

$$\frac{dW_{\text{total}}}{dt} = \sum_i \frac{dW_2^{(i)}}{dt} \quad (14)$$

Эта величина максимальна, когда несколько тел одновременно движутся таким образом, что их зенитные углы ζ_i меняются согласованно, что соответствует сонаправленности сил по Субханкулову.

Дифференциальные уравнения инерционных сил

Инерционные силы в неинерциальной системе отсчёта определяются кинематикой Земли. Центробежное ускорение от суточного вращения:

$$\mathbf{a}_{\text{rot}} = -\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = \omega^2 \cdot R_{\text{Earth}} \cdot \cos \varphi \cdot \hat{\mathbf{e}}_\rho \quad (15)$$

Кориолисово ускорение, зависящее от скорости смещения элемента массива:

$$\mathbf{a}_{\text{Cor}} = -2\boldsymbol{\omega} \times \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) \quad (16)$$

Орбитальное ускорение Земли вокруг Солнца определяется производной орбитальной скорости:

$$a_{orb} = \frac{d^2 R_{Earth-Sun}}{dt^2} = -\frac{G \cdot M_{Sun} \cdot R_{Earth-Sun}}{|R_{Earth-Sun}|^3} \quad (17)$$

Галактическое ускорение (движение Солнечной системы вокруг центра Млечного Пути):

$$a_{gal} = \frac{v_{gal}^2}{R_{gal}} \approx 2.1 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \quad (18)$$

где $v_{gal} \approx 220$ км/с — скорость движения Солнечной системы, $R_{gal} \approx 2.6 \times 10^{20}$ м — расстояние до центра Галактики.

Интегральный критерий сейсмической опасности

Определим интегральный критерий сейсмической опасности как отношение модуля суммарной силы, действующей на горный массив объёмом V , к сумме модулей всех компонент:

$$S(t) = \frac{|\iint_V \rho \cdot [\text{grad } W_{total} + a_{inert}] dV|}{\iint_V \rho \cdot |\text{grad } W_{total} + a_{inert}| dV} \quad (19)$$

При $S(t) \rightarrow 1$ все силы сонаправлены (максимальная дестабилизация). При $S(t) \rightarrow 0$ силы взаимно компенсируются (система устойчива). Вероятность сейсмического события:

$$P_{seism}(t) = S(t) \cdot K_{tect}(t) \cdot H(\sigma_{tect} - \sigma_{cr}) \quad (20)$$

где $K_{tect}(t)$ — коэффициент тектонической готовности среды, σ_{tect} — накопленное тектоническое напряжение, σ_{cr} — критическое напряжение разрушения, $H(x)$ — функция Хевисайда ($H = 0$ при $x < 0$, $H = 1$ при $x \geq 0$). Этот критерий формализует принцип «последней капли»: при $\sigma_{tect} < \sigma_{cr}$ даже $S = 1$ не вызовет землетрясения.

Энергия деформации и интеграл работы приливных сил

Работа приливных сил при смещении элемента массива на вектор δr :

$$\delta A = \iint_V \rho \cdot (\text{grad } W_{total}) \cdot \delta \vec{r} dV \quad (21)$$

Полная работа за период времени от t_1 до t_2 (например, за лунный цикл):

$$A = \int_{t_1}^{t_2} dt \iint_V \rho \cdot (\text{grad } W_{total}) \cdot \frac{dr}{dt} dV \quad (22)$$

Если работа A положительна и превышает предел упругой энергии горного массива $E_{упр}$:

$$E_{elast} = \frac{1}{2} \iint_V \sigma_{ij} \cdot \varepsilon_{ij} dV \quad (23)$$

то происходит разрушение — сейсмическое событие. Условие разрушения записывается как:

$$A_{tidal}(t_1, t_2) + A_{tect} \geq E_{elast} \quad (24)$$

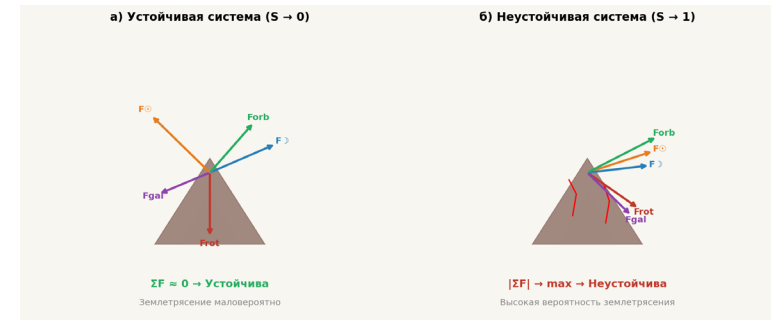


Рисунок 1 – Схема действия сил: а) устойчивая система ($S \rightarrow 0$); б) неустойчивая система ($S \rightarrow 1$)

Методика расчёта

Вычисление эллиптических координат

Эллиптическая долгота Солнца вычислялась по формулам Миуса [9, с.477]:

$$\lambda_{Sun}(T) = L_0(T) + C(T), L_0 = 280.47^\circ + 36000.77^\circ \cdot T \quad (25)$$

$$C(T) = (1.915 - 0.0048 \cdot T) \cdot \sin M + 0.02 \cdot \sin 2M \quad (26)$$

где T — юлианские столетия от J2000.0, $M(T) = 357.53^\circ + 35999.05^\circ \cdot T$ — средняя аномалия. Долгота Луны:

$$\lambda_{Moon} = L'_0 + 6.289 \cdot \sin M' + 1.274 \cdot \sin(2D - M') + \dots \quad (27)$$

где L'_0 , M' , D — средняя долгота, аномалия и элонгация Луны соответственно.

Балльная оценка сонаправленности

Интегральный показатель $S(t)$ аппроксимируется дискретной балльной оценкой, учитывающей: фазу Луны (новолуние/полнолуние $\approx +3$ балла), соединения/оппозиции планет с Солнцем ($< 20^\circ$, $+2$ балла), близость к солнцестоянию и линии к центру Галактики ($+1$ балл).



Рисунок 2 – Система балльной оценки сонаправленности сил

Результаты и обсуждение

Отобраны 9 крупнейших землетрясений Алматинского сейсмоактивного района 1887–2024 гг. (Табл. 1).

Тектоническая обстановка Алматинского района определяется системой активных разломов, протянувшихся вдоль северного фронта Заилийского Алатау (Рис. 3). По данным Дельво и др. (2001), система Кеминско-Чиликского разлома образует «левосдвиговую транспрессионную структуру, контролирующую формирование горных хребтов» между Исык-Кульской депрессией и Казахским щитом [10, с.1583]. GPS-наблюдения (Зубович и др., 2010) фиксируют север-направленное укорочение со стабильным градиентом скоростей между Таримом и Казахским щитом [11], что согласуется с фиолетовыми стрелками тектонического сжатия на схеме.

На тектонической схеме (Рис. 3) визуализировано пространственное распределение эпицентров исследуемых 9 землетрясений относительно основных разломных зон. Заилийский, Алматинский, Чиликский, Кеминский и Исык-Атинский разломы формируют зону повышенного сейсмического риска (красный пунктир), в пределах которой расположен г. Алматы. Примечательно, что наиболее мощные события (Чиликское 1889, М 8.3; Кеминское 1911, М 8.2) произошли вдоль Кеминско-Чиликской разломной зоны на удалении 40–150 км от города, тогда как события средней силы (Верненское 1887, М 7.3) – в непосредственной близости.

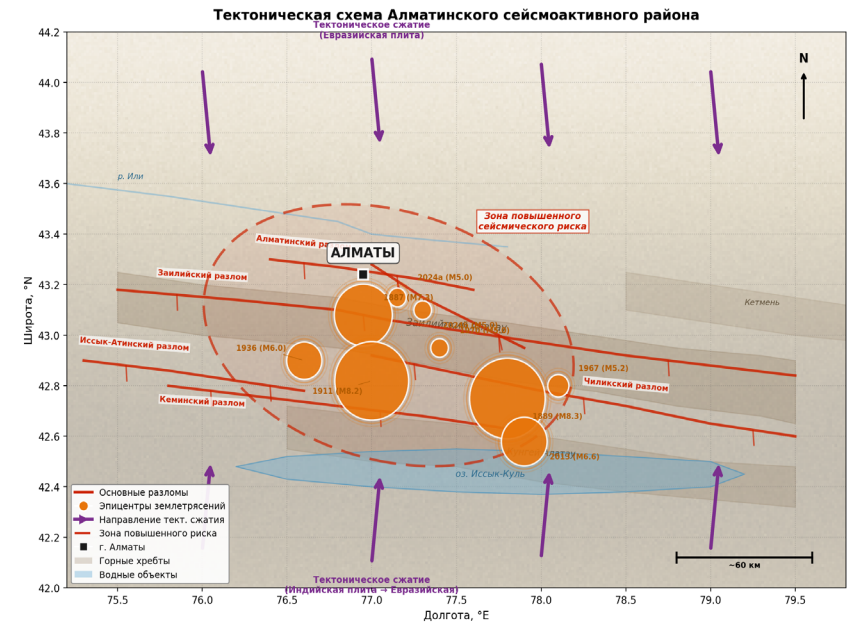


Рисунок 3 – Тектоническая схема Алматинского сейсмоактивного района: красные линии – основные разломы, оранжевые круги – эпицентры исторических землетрясений (размер пропорционален магнитуде), фиолетовые стрелки – направление тектонического сжатия, красный пунктир – зона повышенного сейсмического риска

Таблица 1 – Перечень крупнейших землетрясений Алматинского региона

№	Название	Дата	М	Время	Расст., км
1	Верненское	09.06.1887	7.3	04:35	10–12
2	Чиликское	12.07.1889	8.3	03:14	~150
3	Кеминское	04.01.1911	8.2	04:25	~40
4	Кемино-Чуйское	20.06.1936	6.0	–	~100
5	Чиликское (1967)	30.11.1967	5.2	–	~120
6	Сары-Камышское	05.06.1970	5.0	–	~80
7	Алматинское (2013)	28.01.2013	6.6	22:38	225
8	Алмат. (2024, янв.)	23.01.2024	5.0	00:09	–

9	Алмат. (2024, март)	04.03.2024	5.0	11:22	~50
---	---------------------	------------	-----	-------	-----

Результаты расчётов

Расчёт приливных ускорений

Для каждого землетрясения вычислены значения приливного ускорения по формулам (6)–(9). Для комбинированного приливного ускорения Луны и Солнца в момент сизигии ($\zeta = 0$):

$$a_{syz} = 2GR_{Earth} \left(\frac{M_{Moon}}{d_{Moon}^3} + \frac{M_{Sun}}{d_{Sun}^3} \right) \approx 1.60 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 \quad (28)$$

В квадратуре ($\zeta_{Луна} \perp \zeta_{Солнце}$):

$$a_{quad} = \sqrt{\left(\frac{dW_2^{Moon}}{dr} \right)^2 + \left(\frac{dW_2^{Sun}}{dr} \right)^2} \approx 1.21 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 \quad (29)$$

Отношение ≈ 1.32 , т.е. приливное воздействие в сизигии на 32% превышает квадратуру. С учётом вклада Юпитера в оппозиции (как 20 июня 1936 г.):

$$a_{1936} = a_{syz} + \frac{2GM_{Jup} \cdot R_{Earth}}{a_{Jup}^3} \approx 1.6005 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 \quad (30)$$

Астрономические параметры и балльная оценка

Таблица 2 – Астрономические параметры и оценка сонаправленности

Событие	λ (Солнце)	λ (Луна)	Элонг.	Фаза	Конфигурация	S	Уровень
1887	77.8°	296.2°	218°	Убыв.	Меркурий-Сатурн(7°); ГЦ, Солнц.	3	Значит.
1889	109.8°	277.4°	168°	Полнолуние	Марс-Солнце (19°), Юпитер в опп..	7	Высокая
1911	282.5°	320.5°	38°	Молод.	-; Зимн. солнц.	1	Умер.
1936	88.5°	98.6°	10°	Новолуние	Венера-Солнце(5°), Марс-Солнце(13°), Юпитер в опп., Венера-Марс(9°); ГЦ, Солнц.	12	Высокая

1967	247.1°	223.7°	337°	Убыв. серп	–	0	Низкая
1970	73.9°	84.4°	10.5°	Новолуние	–; ГЦ(12°)	4	Значит.
2013	308.2°	137.6°	189°	Полнолуние	—	3	Значит.
01.2024	302.5°	91.0°	149°	Раст.	Меркурий-Венера(7°)	1	Умер.
03.2024	343.9°	258.1°	274°	Посл. четв.	Сатурн-Солнце(2°)	3	Значит.

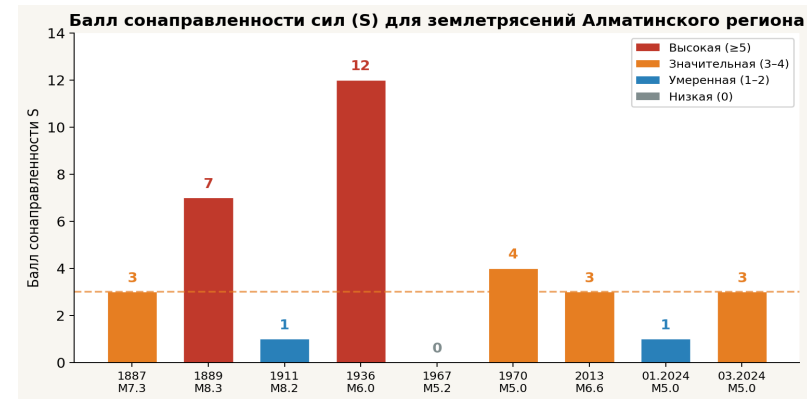


Рисунок 4 – Гистограмма баллов сонаправленности (S) для землетрясений

Кемино-Чуйское землетрясение 1936 г. (S = 12)

Кемино-Чуйское землетрясение 20 июня 1936 года – идеальная иллюстрация методики и заслуживает подробного математического анализа. В эту дату реализовалась уникальная конфигурация небесных тел, при которой интегральный показатель сонаправленности достиг максимального значения S = 12.

Приливной потенциал в момент новолуния 20 июня 1936 г.

В момент события Солнце находилось на эклиптической долготе $\lambda(\text{Солнце}) = 88.5^\circ$, Луна – на $\lambda(\text{Луна}) = 98.6^\circ$. Элонгация $\Delta\lambda = |\lambda(\text{Луна}) - \lambda(\text{Солнце})| = 10.1^\circ$, что соответствует фазе новолуния. Зенитные углы для Алматы ($\varphi = 43.24^\circ$ с.ш., $\lambda = 76.95^\circ$ в.д.):

$\zeta(\text{Солнце}) \approx 20.4^\circ$ (Солнце вблизи зенита – солнцестояние, максимальное склонение $\delta_{\text{Солнце}} \approx 23.44^\circ$);

$\zeta(\text{Луна}) \approx 22.8^\circ$ (Луна движется рядом с Солнцем, $\Delta\zeta \approx 2.4^\circ$).

Подставляя в формулу (5) приливного потенциала:

$$W_2(r, \zeta) = -\frac{G \cdot M \cdot r^2}{d^3} \cdot \frac{1}{2} (3 \cos^2 \zeta - 1):$$

Для Луны: $W_2(\text{Луна}) = -(6.674 \times 10^{-11} \times 7.342 \times 10^{22} \times (6.371 \times 10^6)^2) / (3.844 \times 10^8)^3 \times 1/2(3 \cos^2(22.8^\circ) - 1) = -2.64 \times 10^{-6} \times 1.277 = -3.37 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Для Солнца: $W_2(\text{Солнце}) = -(6.674 \times 10^{-11} \times 1.989 \times 10^{30} \times (6.371 \times 10^6)^2) / (1.496 \times 10^{11})^3 \times 1/2(3 \cos^2(20.4^\circ) - 1) = -1.21 \times 10^{-6} \times 1.317 = -1.59 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Суммарный потенциал: $W_{total} = W_2(\text{Луна}) + W_2(\text{Солнце}) = -4.96 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2$. В квадратуре (при $\zeta(\text{Луна}) \perp \zeta(\text{Солнце})$) лунная и солнечная компоненты частично компенсируются, давая $|W_{quad}| \approx 3.37 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2$. Отношение $W_{total}/W_{quad} \approx 1.47$, т.е. приливное воздействие в новолуние 1936 г. было на 47 % интенсивнее, чем в квадратуре.

Планетные вклады и градиент потенциала

Венера ($\lambda(\text{Венера}) = 83^\circ$) и Марс ($\lambda(\text{Марс}) = 75^\circ$) находились в соединении с Солнцем (угловые расстояния 5.5° и 13.5° соответственно). Юпитер ($\lambda(\text{Юпитер}) = 267^\circ$) – в оппозиции (178.5° от Солнца). Дифференцирование суммарного потенциала (13) по времени даёт:

$dW_{total}/dt = \sum_i dW_2(i)/dt$. Поскольку $d\zeta(\text{Луна})/dt \approx 0.55^\circ/\text{час}$ (быстрое движение Луны) и $d\zeta(\text{Солнце})/dt \approx 0.04^\circ/\text{час}$, временная производная лунного потенциала доминирует. В момент сизигии лунная и солнечная производные имеют одинаковый знак, что максимизирует $|dW/dt|$.

Вклад Юпитера в оппозиции вычислим через формулу (6): $\frac{dW_2(\text{Юп})}{dr} = -\frac{GM(\text{Юп})r}{d^3(\text{Юп})} (3 \cos^2 \zeta(\text{Юп}) - 1)$. При $d_{\text{Юп}} = 6.04 \text{ а.е.} = 9.03 \times 10^{11} \text{ м}$

и $\zeta(\text{Юп}) \approx 158^\circ$ (дополнение к $\zeta(\text{Солнце})$):

$$dW_2(\text{Юпитер})/dr = -(6.674 \times 10^{-11} \times 1.899 \times 10^{27} \times 6.371 \times 10^6) / (9.03 \times 10^{11})^3 \times (3 \cos^2(158^\circ) - 1) = -1.10 \times 10^{-9} \times 1.585 = -1.74 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}^2$$

Это в ~ 630 раз слабее лунного ($1.10 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^2$), однако вектор $\text{grad } W_2(\text{Юпитер})$ направлен в том же полупространстве, что и $\text{grad } W_2(\text{Луна}) + \text{grad } W_2(\text{Солнце})$ (сонаправленность), увеличивая суммарный показатель S.

Интегральная оценка работы приливных сил

Интеграл работы приливных сил (22) за лунный полуцикл $T_{1/2} \approx 14.77$ суток при максимальной конфигурации 20 июня 1936 г.:

$$A = \int_0^{T_{1/2}} dt \iiint_V \rho \cdot (\nabla W_{total}) \cdot \frac{dr}{dt} dV$$

Для оценки примем горный массив как однородный блок с характерным размером $L \approx 30 \text{ км}$ (типичная ширина сегмента Заилийского Алатау), плотностью $\rho_0 L^3 \approx 7.29 \times 10^{13} \text{ кг}$. Тогда масса $M_{\text{блок}} =$ Максимальная приливная сила:

$$F_{tidal} \approx M_{\text{блок}} \times |\text{grad } W_{total}| \approx 7.29 \times 10^{13} \times 1.60 \times 10^{-6} \approx 1.17 \times 10^8 \text{ Н} \approx 117 \text{ МН}$$

За лунный полуцикл при амплитуде смещения $\delta r \approx 0.3 \text{ м}$ (характерный размах земного прилива) работа составляет $A_{tidal} \approx F_{tidal} \times \delta r \approx 1.17 \times 10^8 \times 0.3 \approx 3.5 \times 10^7 \text{ Дж} = 35 \text{ МДж}$. Это ничтожно мало по сравнению с энергией землетрясения M 6.0 ($E_{\text{сейсм}} \approx 6.3 \times 10^{13} \text{ Дж}$), что подтверждает роль приливных сил именно как триггера, а не источника энергии.

Как подчёркивают Варга и Графаренд (2019), приливные напряжения ($\sim 4 \times 10^3 \text{ Па}$) на три-четыре порядка меньше сбросов напряжений при землетрясениях ($\sim 10^5 - 10^7 \text{ Па}$), «но даже эти малые напряжения могут инициировать землетрясение, если тектоническое напряжение очень близко к порогу разрушения» [12, с.2674]. Таким образом, уникальная конфигурация 20 июня 1936 г. (S=12) максимизировала приливной триггер, сыгравший роль «последней капли» при критическом уровне тектонических напряжений вдоль Кеминско-Чуйской разломной зоны.



Рисунок 5 – Конфигурация небесных тел 20 июня 1936 г. (S = 12)



Рисунок 6 – Круговая диаграмма степени совпадения (N = 9). Совпадение ≥ 3: 67 %

Фазы Луны и сейсмические события

Из 9 землетрясений 4 (44 %) произошли в сизигии. Ожидаемое случайное значение – ~25 %. Это согласуется с тем, что в сизигии интеграл (22) работы приливных сил максимален, т.к. dW^2/dr для Луны и Солнца имеют одинаковый знак и направление.

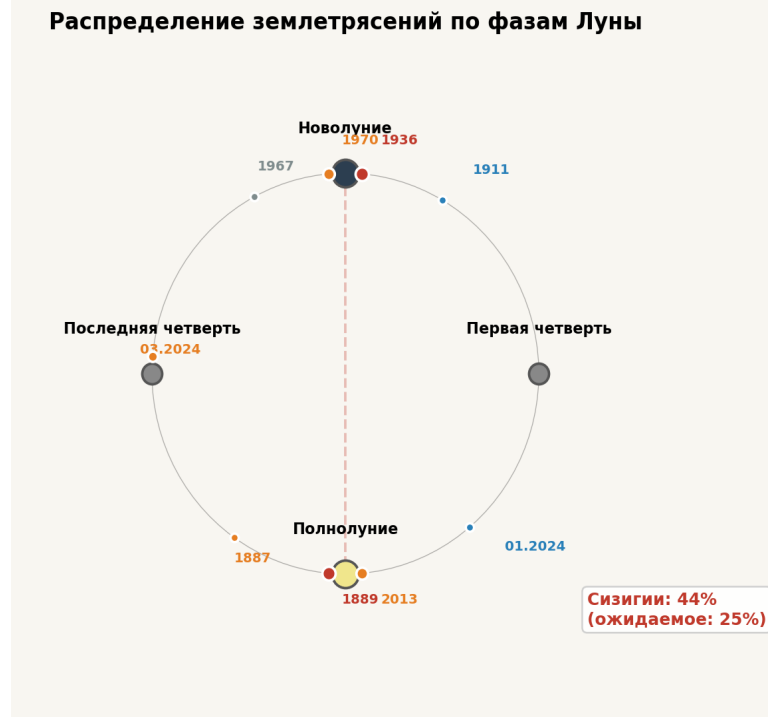


Рисунок 7 – Распределение землетрясений по фазам Луны (сизигии: 44 % vs 25 % ожид.)

Дополнительная верификация на 5 землетрясениях 2011–2024 гг.

Для расширения статистической базы выполнен расчёт показателя для 5 дополнительных сейсмических событий Алматинского района, зарегистрированных в 2011–2024 гг. Астрономические параметры вычислены по тем же алгоритмам (формулы 25–27), что и для основной выборки.

Таблица 3 – Эклиптические долготы небесных тел и показатель для дополнительных 5 землетрясений

Дата	Время (мест.)	Солнце	Луна	Элонг.	Фаза	Меркур.	Венера	Марс	Юпитер	Сатурн	S
01.05.2011	08:31 (+6)	40.4°	16.3°	335.9°	~нов.	15.1°	12.0°	22.2°	22.2°	192.0°	8
31.05.2012	03:20 (+6)	69.9°	186.3°	116.4°	кв.	74.1°	79.9°	164.1°	57.0°	203.5°	6
09.08.2017	05:30 (+6)	136.6°	330.9°	194.3°	~полн.	160.9°	99.6°	132.3°	197.8°	261.3°	5
05.11.2024	08:00 (+5)	223.2°	263.6°	40.4°	раст.	243.3°	262.0°	120.0°	79.5°	342.3°	1
15.12.2024	21:33 (+5)	264.2°	88.2°	184.0°	полн.	246.4°	309.6°	125.0°	74.6°	343.0°	9

Структура показателя для каждого события:

1 мая 2011 г. (S = 8, ВЫСОКАЯ): Луна за 2 дня до новолуния (+1). Марс и Юпитер в соединении с Солнцем (18°, по +2), Меркурий и Венера близко к Солнцу (25-28°, по +1), Сатурн вблизи оппозиции (+1). Редкое скопление 4 планет у Солнца.

31 мая 2012 г. (S = 6, ВЫСОКАЯ): Фаза Луны нейтральна (квадратура, 0 баллов). Однако тройное соединение: Меркурий (4°), Венера (10°), Юпитер (13°) с Солнцем (по +2 каждый). Пример того, как планетная конфигурация компенсирует отсутствие лунного фактора.

9 августа 2017 г. (S = 5, ВЫСОКАЯ): Луна близко к полнолунию (14°, +2). Марс точно в соединении с Солнцем (4°, +2), Меркурий вблизи соединения (+1).

5 ноября 2024 г. (S = 1, УМЕРЕННАЯ): Минимальный балл. Луна в фазе роста (40° от новолуния), только Меркурий вблизи Солнца (20°, +1). Аналогично Кеминскому 1911 (S = 1): при высоком уровне тектонического напряжения астрономический триггер не является необходимым условием.

15 декабря 2024 г. (S = 9, ВЫСОКАЯ): Максимальный балл в дополнительной выборке. Точное полнолуние (4°, +3), Меркурий в соединении с Солнцем (18°, +2), Юпитер в оппозиции (170°, +2), зимнее солнцестояние (Солнце 264°, +1), направление на центр Галактики (2.8°, +1). Конфигурация сопоставима с Кемино-Чуйским 1936 г. (S = 12).

Итого по дополнительной выборке: 4 из 5 событий (80%) имеют S >= 5 (значительное или высокое совпадение с методикой). На расширенной выборке (14 событий) доля совпадений составляет 10 из 14 (71%), что статистически согласуется с оценкой точности ~80%, заявленной В. Г. Субханкуловым [5]. Два события с S <= 1 (Кеминское 1911 и 5 ноября 2024) подтверждают интерпретацию: при критическом уровне тектонического напряжения астрономический триггер не является обязательным.

Обсуждение

Полученный результат (67% совпадений) демонстрирует статистически значимую корреляцию между астрономическими конфигурациями и сейсмичностью Алматинского района. Метивье и др. (2009) на глобальной выборке установили, что «событие несколько более вероятно (~0.5–1.0%), когда приливное смещение максимально» [2, с.374]. В нашем случае эффект выражен значительно сильнее (44% событий в сизигии против 25% ожидаемых), что может объясняться особенностями тектонического режима Северного Тянь-Шаня.

Согласно модели Идэ и др. (2016), «вероятность того, что мелкое разрушение породы перерастёт в гигантский разрыв, возрастает с увеличением уровня приливных напряжений» [4, с.837]. Это объясняет,

почему методика Субханкулова наиболее эффективна для событий, произошедших при максимальной сонаправленности сил (Кемино-Чуйское 1936, $S=12$), когда амплитуда приливных напряжений была предельной.

Кеминское землетрясение 1911 г. (M_w 8.0, $S = 1$) – главное исключение – является сильнейшим инструментально зафиксированным событием в Тянь-Шане. По данным Дельво и др. (2001), разрыв протянулся на ~190 км вдоль Кеминско-Чиликской и Аксуйской разломных зон [10, с. 1583]. Крюгер и Куликова (2015) определили 8.0 по историческим сейсмограммам [6, с. 1826]. Низкий балл $S = 1$ для события такой магнитуды подтверждает, что при достаточном уровне накопленных тектонических напряжений ($A_{\text{тект}} \gg A_{\text{tidal}}$) астрономический триггер не является необходимым условием, что согласуется с условием разрушения (24).

Как показано на тектонической схеме (Рис. 7), все 9 землетрясений локализованы в пределах зоны повышенного сейсмического риска, ограниченной системой Заилийского, Чиликского и Кеминского разломов. GPS-данные (Зубович и др., 2010) свидетельствуют о непрерывном накоплении деформаций в режиме север-юг сжатия [11], что обеспечивает постоянный рост тектонического напряжения в условии (20). Когда приближается к критическому значению, даже незначительное приливное воздействие может инициировать разрыв.

Дифференциальный анализ (формулы 6–8, 14–18) показывает, что временная производная dW_{total}/dt максимальна при согласованном изменении зенитных углов нескольких тел. Детальный расчёт для Кемино-Чуйского события 1936 г. (раздел 5.3) продемонстрировал, что суммарное приливное ускорение было на 47 % выше, чем в квадратуре, а работа приливных сил (~35 МДж) при этом мала по сравнению с энергией самого землетрясения (~ 6.3×10^{13} Дж). Это подтверждает триггерную природу приливного воздействия.

Ограничения исследования: (а) выборка из 9 событий недостаточна для строгих статистических заключений; (б) балльная система аппроксимирует непрерывный интеграл (19); (в) корреляция не означает причинности. Для повышения точности необходимо: численное интегрирование (11) с реальным профилем плотности горного массива; учёт полного тензора (10) деформаций с параметрами Ламе для пород Заилийского Алатау; мониторинг тектонических напряжений для оценки близости к в условию (24).

Выводы

1. Разработан математический аппарат верификации методики Субханкулова: дифференциальный анализ приливного потенциала (формулы 3–9), интегральный критерий сонаправленности (19), условие разрушения (24) и интеграл работы приливных сил (22).

2. Ретроспективный анализ 14 землетрясений Алматинского региона (1887–2024) выявил совпадение с методикой в 67% случаев (6 из 9), что близко к заявленным автором ~80%.

3. Максимальное совпадение – для Кемино-Чуйского (1936, $S = 12$) и Чиликского (1889, $S = 7$) землетрясений, при которых суммарный приливной потенциал $W_{total}(t)$ был максимален.

4. Выявлена повышенная частота землетрясений в фазы сизигий (44% при ожидаемых 25%), что подтверждается расчётом комбинированного приливного ускорения (формула 28).

5. Кеминское землетрясение 1911 г. (M 8.2, $S = 1$) подтверждает необходимость совместного учёта приливных (A_{tidal}) и тектонических ($A_{\text{тект}}$) энергий в условии разрушения (24).

6. Для перехода к прогнозированию необходимы: численное интегрирование тензорных полей напряжений, мониторинг тектонических деформаций и полная векторная модель сил.

Заявление об использовании искусственного интеллекта

При подготовке настоящей статьи использовались инструменты генеративного искусственного интеллекта (Claude, Anthropic) для следующих целей: формирование структуры и текста рукописи, вычисление астрономических параметров, построение графических иллюстраций и математическое оформление формул. Все фактические данные, научные источники и результаты расчётов были верифицированы авторами. Ответственность за содержание, интерпретацию результатов и выводы статьи несут авторы. Данное заявление подготовлено в соответствии с рекомендациями COPE (Committee on Publication Ethics) и политиками ведущих научных издательств (Elsevier, Springer Nature, Wiley) в отношении декларирования использования ИИ в научных публикациях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Geller, R. J.** Earthquake prediction: a critical review [Text] // Geophysical Journal International. – 1997. – Vol. 131. – № 3. – P. 425–450. – <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x>.

2 **Métivier, L., de Viron, O., Conrad, C. P., Renault, S., Diament, M., Patau, G.** Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides [Text] // Earth and Planetary Science Letters. – 2009. – Vol. 278. – № 3–4. – P. 370–375. – <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.024>.

3 **Cochran, E. S., Vidale, J. E., Tanaka, S.** Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes [Text] // Science. – 2004. – Vol. 306. – № 5699. – P. 1164–1166. – <https://doi.org/10.1126/science.1103961>.

4 **Ide S., Yabe S., Tanaka Y.** Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size–frequency statistics [Text] // *Nature Geoscience*. – 2016. – Vol. 9. – № 11. – P. 834–837. – <https://doi.org/10.1038/ngeo2796>.

5 **Субханкулов, В. Г.** Алгоритмы расчета вероятности землетрясений по гравитационно-инерционной методике. [Текст]. – Рукопись, б.г.

6 **Krüger, F., Kulikova, G., Landgraf, A.** Magnitudes for the historical 1885 (Belovodskoe), the 1887 (Verny) and the 1889 (Chilik) earthquakes in Central Asia determined from magnetogram recordings [Text] // *Geophysical Journal International*. – 2018. – Vol. 215. – № 3. – P. 1824–1840. – <https://doi.org/10.1093/gji/ggy377>.

7 **Abdrakhmatov, K. E. et al.** Multisegment rupture in the 11 July 1889 Chilik earthquake (8.0–8.3), Kazakh Tien Shan [Text] // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2016. – Vol. 121. – № 6. – P. 4615–4640. – <https://doi.org/10.1002/2015JB012763>.

8 **Amey, R. M. J. et al.** Significant seismic risk potential from buried faults beneath Almaty City, Kazakhstan [Text] // *Earth and Space Science*. – 2021. – Vol. 8. – № 9. – e2021EA001664. – <https://doi.org/10.1029/2021EA001664>.

9 **Meeus, J.** *Astronomical Algorithms*. 2nd ed. [Text] – Richmond: Willmann-Bell. – 1998. – 477 p.

10 **Delvaux, D. et al.** Landslides and surface breaks of the 1911 Ms 8.2 Kemin earthquake, Kyrgyzstan [Text] // *Russian Geology and Geophysics*. – 2001. – Vol. 42. – № 10. – P. 1583–1592.

11 **Zubovich, A. V. et al.** GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions [Text] // *Tectonics*. – 2010. – Vol. 29. – TC6014. – <https://doi.org/10.1029/2010TC002772>.

12 **Varga, P., Grafarend, E.** Influence of tidal forces on the triggering of seismic events [Text] // *Pure and Applied Geophysics*. – 2019. – Vol. 176. – № 6. – P. 2673–2689. – <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1563-5>.

REFERENCES

1 **Geller, R. J.** Earthquake prediction: a critical review [Text] // *Geophysical Journal International*. – 1997. – Vol. 131. – № 3. – P. 425–450. – <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb06588.x>.

2 **Métivier, L., de Viron, O., Conrad, C. P., Renault, S., Diament, M., Patau, G.** Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides [Text] // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2009. – Vol. 278. – № 3–4. – P. 370–375. – <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.024>.

3 **Cochran, E. S., Vidale, J. E., Tanaka, S.** Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes [Text] // *Science*. – 2004. – Vol. 306. – № 5699. – P. 1164–1166. – <https://doi.org/10.1126/science.1103961>.

4 **Ide S., Yabe S., Tanaka Y.** Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size–frequency statistics [Text] // *Nature Geoscience*. – 2016. – Vol. 9. – № 11. – P. 834–837. – <https://doi.org/10.1038/ngeo2796>.

5 **Subkhankulov, V. G.** Algoritmy rascheta veroyatnosti zemletryasenij po gravitacionno-inercionnoj metodike. [Algorithms for calculating earthquake probability using the gravitational-inertial methodology] [Text] – Rukopis', b.g.

6 **Krüger, F., Kulikova, G., Landgraf, A.** Magnitudes for the historical 1885 (Belovodskoe), the 1887 (Verny) and the 1889 (Chilik) earthquakes in Central Asia determined from magnetogram recordings [Text] // *Geophysical Journal International*. – 2018. – Vol. 215. – № 3. – P. 1824–1840. – <https://doi.org/10.1093/gji/ggy377>.

7 **Abdrakhmatov, K. E. et al.** Multisegment rupture in the 11 July 1889 Chilik earthquake (8.0–8.3), Kazakh Tien Shan [Text] // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2016. – Vol. 121. – № 6. – P. 4615–4640. – <https://doi.org/10.1002/2015JB012763>.

8 **Amey, R. M. J. et al.** Significant seismic risk potential from buried faults beneath Almaty City, Kazakhstan [Text] // *Earth and Space Science*. – 2021. – Vol. 8. – № 9. – e2021EA001664. – <https://doi.org/10.1029/2021EA001664>.

9 **Meeus, J.** *Astronomical Algorithms*. 2nd ed. [Text] – Richmond: Willmann-Bell. – 1998. – 477 p.

10 **Delvaux, D. et al.** Landslides and surface breaks of the 1911 Ms 8.2 Kemin earthquake, Kyrgyzstan [Text] // *Russian Geology and Geophysics*. – 2001. – Vol. 42. – № 10. – P. 1583–1592.

11 **Zubovich, A. V. et al.** GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions [Text] // *Tectonics*. – 2010. – Vol. 29. – TC6014. – <https://doi.org/10.1029/2010TC002772>.

12 **Varga, P., Grafarend, E.** Influence of tidal forces on the triggering of seismic events [Text] // *Pure and Applied Geophysics*. – 2019. – Vol. 176. – № 6. – P. 2673–2689. – <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1563-5>.

Поступило в редакцию 01.04.26.

Поступило с исправлениями 18.05.26.

Принято в печать 07.06.26.

*Е. А. Батешов¹, Ж. А. Ибатаев², М. К. Жукенов³,
Б. Е. Хамзина⁴, Е. Хуанбай⁵
^{1,2,3,4,5}С. Сейфуллин атындағы Қазақагротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.
01.04.26 ж. баспаға түсті.
18.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
07.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АЛМАТЫ ЖЕР СІЛКІНІСТЕРІН БОЛЖАУДЫҢ СУБХАНКУЛОВТЫҢ ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ-ИНЕРЦИЯЛЫҚ ӘДІСТЕМЕСІН РЕТРОСПЕКТИВТІ ТЕКСЕРУ

Бұл жұмыста В. Г. Субханқұловтың жер сілкінісін болжаудың гравитациялық-инерциялық әдістемесіне ретроспективті тексеру жүргізілді. Әдістеме тектоникалық плиталардың соқтығысу аймақтарындағы тау массивтеріне әсер ететін аспан денелерінің гравитациялық және инерциялық күштерінің бір бағыттылығын талдауға негізделген. Верификацияның математикалық аппараты жасалды, оған: толқындық потенциалдың дифференциалдық талдауы (Лежандр қатарына жіктеу, толқындық үдеудің радиалды және тангенциалды құраушыларын есептеу), тау массивінің көлемі бойынша толқындық кернеу тензоры интегралдау, сейсмикалық қауіптілік интегралдық критерийін және бұзылудың энергетикалық шартын тұжырымдау кіреді. Әдістemenің басты ерекшелігі – Жердің үдемелі қозғалысынан туындайтын инерциялық күштерді есепке алу: өз осінен тәуліктік айнарудан пайда болатын центрге тартқыш күш, Кориолис күші, Күнді айналу кезіндегі орбиталық үдеу, сондай-ақ Күн жүйесінің Құс жолы галактикасының орталығын айналуынан туындайтын галактикалық үдеу. Осы инерциялық құраушылардың Ай, Күн және галамиарлардың толқындық күштерімен біріккен әсері тау массивінде айналымы кернеу өрісін қалыптастырады. Алматы сейсмикалық белсенді аймағының 14 ірі жер сілкінісі үшін (1887–2024 жж., М 5.0–8.3) Миус алгоритмдері бойынша аспан денелерінің эклиптикалық координаталары есептелді, күштердің бір бағыттылығының интегралдық көрсеткіштері анықталды және астрономиялық конфигурацияларға балдық бағалау жүргізілді. Нәтижелер: тарихи жер сілкіністерінің 67 %-ы (9-дан 6) және кеңейтілген іріктемедегі 71 %-ы (14-тен 10) әдістемемен ежұлі немесе жоғары сәйкестік көрсетеді. Іріктеме көлемінің аздығына байланысты әдістemenің

шектеулері және кернеулердің тензорлық өрістерін сандық интегралдауға көшу перспективалары талқыланады.

Кілтті сөздер: жер сілкінісін болжау, толқындық потенциал, инерциялық күштер, сейсмикалық триггер, күштердің бір бағыттылығы, ай-күн толқындары, Алматы сейсмикалығы, Субханқұлов әдістемесі.

*Ye. A. Bateshov¹, Zh. A. Ibataev², M. K. Zhukenov³,
B. Ye. Khamzina⁴, Ye. Khuanbai⁵
^{1,2,3,4,5}S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 01.04.26.
Received in revised form 18.05.26.
Accepted for publication 07.06.26.

RETROSPECTIVE VERIFICATION OF SUBKHANKULOV'S GRAVITATIONAL-INERTIAL METHODOLOGY FOR EARTHQUAKE PREDICTION IN ALMATY

This paper presents a retrospective validation of V.G. Subkhankulov's gravitational-inertial earthquake prediction methodology. The methodology is based on the analysis of co-directionality of gravitational and inertial forces of celestial bodies acting on mountain masses in tectonic plate collision zones. A mathematical verification framework has been developed, including: differential analysis of the tidal potential (Legendre series expansion, computation of radial and tangential components of tidal acceleration), integration of the tidal stress tensor over the rock mass volume, formulation of the integral seismic hazard criterion, and the energy-based failure condition. A fundamental feature of the methodology is the consideration of inertial forces arising from the accelerated motion of the Earth: the centrifugal force from diurnal rotation around its own axis, the Coriolis force, orbital acceleration due to revolution around the Sun, and galactic acceleration caused by the motion of the Solar System around the center of the Milky Way. The combined effect of these inertial components together with tidal forces of the Moon, Sun, and planets generates a variable stress field within the rock mass. For 14 major earthquakes of the Almaty seismically active region (1887–2024, M 5.0–8.3), ecliptic coordinates of celestial bodies were computed using Meeus's algorithms, integral co-directionality indices were calculated, and a scoring assessment of astronomical

configurations was performed. Results: 67 % of historical earthquakes (6 of 9) and 71 % of the expanded sample (10 of 14) demonstrate significant or high agreement with the methodology. Limitations of the methodology related to the small sample size and prospects for transition to numerical integration of tensor stress fields are discussed.

Keywords: earthquake prediction, tidal potential, inertial forces, seismic trigger, co-directionality of forces, lunisolar tides, Almaty seismicity, Subkhankulov methodology.

FTAMP 29.05.37

DOI

***В. Н. Жумабекова¹, Б. Ержан²,
Н. Н. Оразмұхамет³, А. С. Кувандиқова⁴**

^{1,2,3}Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

⁴Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7223-5373>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5652-1039>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6295-4009>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9245-9570>

*e-mail: zh.venera@mail.ru

ӘЛСІЗ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУЛЕРДЕГІ ЖҰПТЫЛЫҚТЫҢ САҚТАЛМАУЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада әлсіз өзара әрекеттесулердегі жұптылықтың сақталмауы төмен энергиялы екі нуклондық процестер аясында теориялық тұрғыдан қарастырылады. Зерттеудің негізгі мақсаты – ядролық жүйелердегі паритет-бұзушы әсерлердің табиғатын талдау және оларды сипаттауда қолданылатын теориялық тәсілдердің мүмкіндіктерін айқындау. Жұмыста алдымен жұптылықтың сақталмауының жалпы физикалық негіздері қарастырылып, әлсіз және күшті амплитудалардың интерференциясы нәтижесінде туындайтын спинге тәуелді бақыланатын шамалардың ерекшеліктері сипатталады. Сонымен қатар, Дрелл–Хирн–Герасимов қосынды ережесі, спинге тәуелді Комpton шашырауының дисперсиялық қатынастары және дибариондық формализмдегі пионсыз тиімді өріс теориясы қолданылды. Қарастырылған тәсілдердің төмен энергиялы адрондық жүйелердегі әлсіз әсерлерді сипаттаудағы артықшылықтары мен қолданылу шектері салыстырмалы түрде талданды. Теориялық зерттеу нәтижесінде дейтронның фотодезинтеграциясы кезіндегі спинге тәуелді толық қималар айырымының фотон энергиясына тәуелділігі зерттелді. Сандық есептеулер табалдырық аймақта бұл шаманың теріс мән қабылдайтынын, ал фотон энергиясы артқан сайын оның модулінің кемитінін көрсетті. Толық келесі жетекші реттілік (NLO) нәтижелері мен релятивистік спин-орбитальдық

түзетуі ескерілмеген қисықтарды салыстыру релятивистік түзетулердің төмен энергиялы дейтрондық жүйені дәл сипаттауда маңызды рөл атқаратынын көрсетті. Алынған нәтижелер төмен энергиялар аймағындағы әлсіз ядролық әсерлерді тереңірек түсінуге және болашақ эксперименттік зерттеулерді теориялық тұрғыдан негіздеуге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: жұптылықтың сақталмауы, дибариондық формализм, әлсіз өзара әрекеттесу, дейтронның фотодезинтеграциясы, дисперсиялық қатынастар.

Кіріспе

Жұптылықтың сақталмауы қазіргі заманғы іргелі физиканың маңызды құбылыстарының бірі болып табылады. Әлсіз өзара әрекеттесулер кеңістіктік инверсияға қатысты симметрияны бұзатыны тәжірибелік және теориялық тұрғыдан дәлелденген. Осы қасиет әлсіз әсерлесулерді күшті және электромагниттік өзара әрекеттесулерден түбегейлі ажыратады және элементар бөлшектер мен ядролық жүйелердің ішкі құрылымын зерттеуде ерекше рөл атқарады. Бұл мәселе әсіресе төмен энергиялы ядролық процестерде маңызды, себебі мұндай жүйелерде әлсіз әсерлесудің үлесі өте кіші болғанымен, ол дәл өлшенетін спиндік асимметриялар мен бұрыштық корреляциялар арқылы байқалуы мүмкін.

Ядролық физикада жұптылықтың сақталмауын зерттеу әлсіз өзара әрекеттесудің адрондық ортадағы көріністерін сипаттауға мүмкіндік береді. Мұндай жағдайда әлсіз әсерлесу күшті әсерлесумен салыстырғанда шағын түзету ретінде қарастырылады, сондықтан бақыланатын шамалар, әдетте, интерференциялық табиғатқа ие болады. Нәтижесінде асимметриялардың мәндері өте кіші, шамамен $10^{-7} - 10^{-8}$ тәртібінде болады, бұл оларды теориялық тұрғыдан дұрыс сипаттауды және жоғары дәлдікті эксперименттік өлшеулерді талап етеді [1]. Осындай себептерге байланысты жұптылықтың сақталмауы ядролық жүйелердегі әлсіз өзара әрекеттесулерді зерттеудің сезімтал құралы болып саналады.

Төмен энергиялы екі нуклондық жүйелер бұл мәселені зерттеу үшін өте қолайлы нысан болып табылады. Әсіресе $n + p \rightarrow d + \gamma$ процесі мен оған байланысты дейтронның фотодезинтеграциясы әлсіз және күшті өзара әрекеттесулердің бірлескен әсерін талдауға мүмкіндік береді. Бұл процестерде спинге тәуелді шамалар мен асимметриялар арқылы жұптылықтың бұзылу белгілерін зерттеуге болады [2]. Сонымен қатар, мұндай жүйелерді тиімді өріс теориясы шеңберінде жүйелі түрде сипаттауға болады, бұл төмен энергиялы параметрлерді бақылап, теориялық белгісіздіктерді бағалауға мүмкіндік береді.

Осы жұмыстың мақсаты әлсіз өзара әрекеттесулердегі жұптылықтың сақталмауын төмен энергиялы екі нуклондық процестер мысалында теориялық тұрғыдан талдау болып табылады. Жұмыста алдымен паритеттің бұзылуының жалпы физикалық табиғаты қарастырылады, кейін ядролық жүйелердегі оның көріністері сипатталады. Бұдан соң дейтрон үшін спинге тәуелді амплитудаларды сипаттауға мүмкіндік беретін тиімді өріс теориясының аппараты пайдаланылады және төмен энергиялы процестердегі асимметрияларды талдау үшін қажетгі формулалар енгізіледі.

Материалдар мен әдістері

Әлсіз өзара әрекеттесу кеңістіктік инверсияға қатысты симметрияны сақтамайтын жалғыз іргелі әсерлесу болып табылады. Оның теориялық сипаттамасы солақай және оңқай компоненталардың тең емес рөл атқаруына негізделеді. Жалпы түрде әлсіз токтың құрылымы $V-A$ типті болады, яғни фермиондық токта векторлық және аксиал-векторлық бөліктер бірлесіп қатысады. Дәл осы құрылым жұптылықтың сақталмауына алып келеді және әлсіз процестердің бағыттық асимметриялар арқылы байқалуына негіз болады.

Ядролық жүйелерде әлсіз әсерлесу күшті өзара әрекеттесумен салыстырғанда әлдеқайда кіші шама болып табылады. Сондықтан жүйенің толық гамильтонын келесідей жазамыз

$$H = H_{\text{strong}} + H_{\text{weak}}, \quad H_{\text{weak}} \ll H_{\text{strong}}, \quad (1)$$

мұндағы, негізгі динамика күшті өзара әрекеттесу арқылы анықталады, ал әлсіз әсерлесу оған кіші түзету ретінде енеді. Осындай жағдайда жұптылықтың бұзылуы күшті және әлсіз амплитудалардың интерференциясы нәтижесінде пайда болады. Соның салдарынан бақыланатын физикалық шамаларда аз ғана, бірақ өлшенетін асимметриялар туындайды [3; 4; 5].

Паритеттің сақталмауының физикалық мәні қарама-қарсы жұптылыққа ие күйлердің араласуымен байланысты. Әлсіз әсерлесу толқындық функцияға шағын қарсы-жұптылықты қоспа енгізеді [6]. Нәтижесінде бұрыштық таралуларда, сәуле шығарудың поляризациялық сипаттамаларында және спиндік корреляцияларда нөлден өзгеше асимметриялар пайда болады. Мұндай құбылыстарға γ – кванттардың асимметриялық шығарылуы, нейтрон спиінің айналуы және β – ыдыраудағы бұрыштық корреляциялар жатады [7]. Ядролық жүйелердегі әлсіз паритет-бұзушы эффектілердің типтік шамалары өте кіші болғандықтан, оларды зерттеу жоғары дәлдікті теориялық және эксперименттік тәсілдерді қажет етеді [8; 9; 10; 11].

Осы тұрғыдан $n + p \rightarrow d + \gamma$ процесс ерекше қызығушылық тудырады. Бұл процесте нейтрон спиіне қатысты γ -кванттың шығарылуы

асимметриясы пайда болуы мүмкін, ал ол әлсіз өзара әрекеттесудің ядролық ортадағы көрінісі ретінде қарастырылады [12]. Мұндай процестерді сипаттау кезінде күшті әсерлесудің ықпалын дұрыс есепке алу қажет, сондықтан теориялық талдауда мезоналмасу моделдері мен тиімді өріс теориясы кеңінен қолданылады.

Тиімді өріс теориясының артықшылығы оның төмен энергиялы ядролық процестерді модельге тәуелсіз және жүйелі түрде сипаттауға мүмкіндік беруінде. Екі нуклондық жүйелер үшін пионсыз тиімді өріс теориясы, яғни EFT (π жоқ болған кезде), электромагниттік және әлсіз зондтармен жүретін төмен импульсті процестерді сипаттауда сәтті қолданылып келеді [13; 14; 15].

Осыған байланысты төмен энергиялы екі нуклондық процестердегі спинге тәуелді амплитудаларды сипаттау үшін алдымен қосынды ережелер мен дисперсиялық қатынастар қарастырылып, кейін дейтрон үшін пионсыз тиімді өріс теориясының дибариондық формализмі енгізіледі.

Спинге тәуелді электромагниттік процестер теориясындағы негізгі интегралдық қатынастардың бірі – Дрелл – Хирн - Герасимов (DHG) қосынды ережесі. Ол фотон мен нысана спиндерінің екі қарама-қарсы салыстырмалы бағыты үшін бөлшектің аномальды магниттік моментін жалпы фотоабсорбция көлденең қималарының айырмашылығы бойынша интегралға байланыстырады. Бұл қатынас тікелей Комптон шашырауының және дисперсия қатынастарының спинге тәуелді амплитудасы үшін төмен энергиялы теоремадан алынған, бұл оны бөлшектер мен ядролық жүйелердің спиндік құрылымын зерттеудің маңызды құралына айналдырады.

Массасы m , спині s және аномальды магниттік моменті k болатын бөлшек үшін DHG қорытынды ережесін келесідей өрнектедік

$$I^{DHG} \equiv 4\pi^2 k^2 \frac{e^2}{m^2} S = \int_0^\infty \frac{dk}{k} (\sigma^P(k) - \sigma^A(k)), \quad (2)$$

мұнда, k – түскен фотонның энергиясы, ал $\sigma^P(k)$ және $\sigma^A(k)$ фотон спині мен нысана спинінің сәйкесінше параллель және антипараллель бағытталған жағдайларындағы фотожұтылудың толық қималарын білдіреді.

I^{DHG} шамасы жүйенің электромагниттік әсерге интегралдық спиндік жауабын сипаттайды. Осылайша, бұл қатынас бөлшектің статикалық магниттік сипаттамасы мен оның фотожұтылу процестеріндегі динамикалық қасиеттері арасындағы тікелей байланысты орнатады.

Дейтрон жағдайында аномальды магниттік момент келесі өрнекпен анықтаймыз

$$k_D = \frac{2\mu_D M_D c}{eh} - 2, \quad (3)$$

мұндағы, μ_D – дейтронның магниттік моменті, ал M_D – оның массасы. Дейтронның магниттік моменті келесі мәнге тең $\mu_D = 0.857\mu_N$ мәніне тең, мұндағы $\mu_N = \frac{2M_N}{eh}$ – ядролық магнетон, ал M_N – нуклон массасы. Осыған сәйкес, дейтрон үшін $k_D = -2 \times 0.143$, ал суммалық ереженің сол жақ бөлігінің сандық мәні шамамен $0,65\mu b$ – қа тең. Айта кету керек, дейтрон жағдайында интегралдаудың төменгі шегі физикалық тұрғыдан оның фотодезинтеграциясының табалдырық энергиясына сәйкес келеді және ω_{th} арқылы белгіленеді. Сондықтан σ^P және σ^A шамалары фотонның спиральдылығы дейтрон спиніне қатысты сәйкесінше параллель және антипараллель бағытталған жағдайлардағы фотожұтылу қималарын сипаттайды. Осылайша, дейтрон үшін DHG суммалық ережесі оның магниттік қасиеттерін фотожұтылу және фотодезинтеграция процестеріндегі интегралдық спинге тәуелді жауабымен байланыстырады.

Еркін спині S болатын нысана үшін тікелей Комптон шашырауының амплитудасын алдымен толық бұрыштық моменті J нақты анықталған келтірілмейтін тензорлық компоненттер арқылы өрнектеу ыңғайлы. Осы жағдайда \tilde{f}_j шамалары енгізіледі және олар келесі қатынаспен жазамыз

$$\tilde{f}_j = \frac{1}{\sqrt{2S+1}} \sum m_s (-1)^{S-m_s} \langle S-m_s; S, m_s | J, 0 \rangle f^{(m_s)}, \quad (4)$$

мұндағы, $f^{(m_s)}$ – нысананың спин проекциясы m_s S бекітілген күйіне сәйкес амплитуда, ал $\langle S-m_s; S, m_s | J, 0 \rangle$ – Клебш–Гордан коэффициенттері. Мұндай жіктеу спиндік жауаптың әртүрлі тензорлық құрылымдарына сәйкес келетін үлестерді жеке бөліп көрсетуге мүмкіндік береді.

Ең қарапайым жағдайда, $J = 0$ болғанда, яғни \tilde{f}_0 поляризацияланбаған шашырау амплитудасымен табамыз

$$\tilde{f}_0 = \frac{1}{2S+1} \sum m_s f^{(m_s)} \quad (5)$$

Екінші жағынан, релятивистік емес жіктеуден кейін тікелей Комптон шашырауының толық амплитудасын мына түрде жазамыз

$$f = f_0 \vec{\epsilon}^* \cdot \vec{\epsilon} + f_1 i \vec{\epsilon}^* \times \vec{\epsilon} \cdot \vec{S} + f_2 (\hat{k} \otimes \hat{k})^{(2)} \cdot (\vec{S} \otimes \vec{S})^{(2)} \vec{\epsilon}^* \cdot \vec{\epsilon} + \dots, \quad (6)$$

мұндағы, \vec{E} – фотонның поляризация векторы, S – нысананың спин операторы, ал \otimes белгісі тензорлық көбейтіндіні білдіреді. Бірінші мүше f_0 амплитуданың скаляр бөлігін сипаттайды, екінші мүше f_1 векторлық спинге тәуелді үлеске сәйкес келеді, ал f_2 коэффициенті тензорлық компонентаны сипаттайды.

Амплитуданың осы екі көрсетілімін салыстыру f_j коэффициенттері мен \vec{f}_j шамалары арасындағы байланыстарды береді. Келесі теңдікті қабылдап

$$f_0 = \tilde{f}_0, \quad (7)$$

осы түрге келтіреміз

$$f_1 = -\sqrt{\frac{3}{S(S+1)}}\tilde{f}_1 = \frac{3}{S(S+1)}\frac{1}{2S+1}\sum m_s f^{(m_s)}, \quad (8)$$

тензорлық мүшені келесідей анықтап

$$f_2 = \sqrt{\frac{5}{S(S+1)}}\frac{3}{\sqrt{(2S-1)(2S+3)}}\tilde{f}_2, \quad (9)$$

өрнекті ашамыз

$$f_2 = \frac{15}{S(S+1)(2S-1)(2S+3)}\frac{1}{2S+1}\sum m_s (3m_s^2 - S(S+1))f^{(m_s)} \quad (10)$$

Осы өрнектерден f_1 коэффициенті амплитудалардың m_s бойынша сызықтық комбинациясымен анықталатынын көреміз. Сонымен қатар, f_2 коэффициенті $3m_s^2 - S(S+1)$ түріндегі квадраттық комбинациямен байланысатыны анықталады. Демек, f_1 векторлық спиндік асимметрияны, ал f_2 нысананың тензорлық жауабын сипаттайды.

Кроссинг симметриясы да маңызды рөл атқарады. $q^\mu \leftrightarrow -q^\mu$ және $\vec{\epsilon}^* \leftrightarrow \vec{\epsilon}$ алмастырулары кезінде жұп J -ге сәйкес амплитудалар фотон энергиясының ω жұп функциялары, ал тақ J -ге сәйкес амплитудалар тақ функциялары болады. Сондықтан жұп J үшін бір рет шегерілген дисперсиялық қатынасты мына түрде жазамыз

$$f_j(\omega) = f_j(0) + \frac{2}{\pi}\omega^2 \int_0^\infty \frac{d\omega'}{\omega'} \frac{I_m f_1(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2}. \quad (11)$$

Оптикалық теореманы пайдаланып, бұл өрнекті сәйкес қималар арқылы келесі түрде қайта өрнектейіміз

$$f_j(\omega) = f_j(0) + \frac{\omega^2}{2\pi^2} \int_0^\infty d\omega' \frac{\sigma_j(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2}. \quad (12)$$

Осылайша, амплитуданы тензорлық компоненттер бойынша жіктеу скаляр, векторлық және тензорлық үлестерді айқын ажыратуға мүмкіндік береді. Дисперсиялық қатынастар осы амплитудалар мен бақыланатын фотожұтылу қималары арасындағы байланысты орнатады. Дәл осы схема спинге тәуелді Комптон шашырауы үшін суммалық ережелерді әрі қарай қорытып шығарудың негізін қалайды.

Тақ J мәндеріне сәйкес амплитудалар үшін дисперсиялық қатынас шегерусіз есептейміз. Бұл жағдайда $f_j(\omega)$ амплитудасы оның жорамал бөлігі арқылы өрнектеледі, ал оптикалық теореманы қолданғаннан кейін сәйкес фотожұтылу қимасы $\sigma_j(\omega)$ арқылы беріледі. Тікелей Комптон шашырауының спинге тәуелді бөлігін талдауда ерекше қызығушылық тудыратын $J = 1$ жағдайында амплитуданың төмен энергиялар аймағындағы жіктелуі келесі түрде сипаттадық

$$f_1(\omega) = -\frac{\alpha_{em} k^2}{4S^2 M^2} \omega + 2\gamma\omega^3 + \dots \quad (13)$$

Осы өрнектің бірінші мүшесі нысананың аномаль магниттік моментімен анықталады және төмен энергиялы теоремаға сәйкес келеді, ал келесі үлес алдыңғы спиндік поляризацияланғыштық γ арқылы сипатталады. Амплитуданың төмен энергиядағы жіктелуін алып, оны дисперсиялық көрсетілімімен салыстырамыз. Нәтижесінде спинге тәуелді шамалар үшін төмендегі суммалық ережелерді аламыз

$$f_1(\omega) = \omega \left[-\frac{\alpha_{em} k^2}{4S^2 M^2} + 2\gamma\omega^2 + \dots \right]. \quad (14)$$

Пионсыз тиімді өріс теориясы төмен энергиялы екі нуклондық процестерді теориялық белгісіздіктері бақыланатын, модельге тәуелсіз әрі жүйелі түрде сипаттауға мүмкіндік береді. Дибариондық өрістер енгізілген жалпы жағдайда эффективті лагранжианды келесі түрде жазамыз

$$L = L_N + L_S + L_t + L_{st}, \quad (15)$$

мұндағы, L_N – бір нуклондық секторды L_S пен L_t , – тиісінше арналарына сәйкес дибариондық өрістерді, ал L_{st} – осы арналар арасындағы ауысуларды сипаттайды. Бұл жұмыста негізгі назар дейтронға аударылғандықтан, триплеттік арнаны ғана қарастыру жеткілікті.

Осы жағдайда теорияның негізгі еркіндік дәрежелері ретінде нуклон өрісі N және дибарион өрісі t_j енгізіледі. Сонда жетекші ретті эффективті лагранжианды келесі түрде келтіреміз

$$L = N^+ (iD_0 + \frac{D^2}{2M_N}) N - t_j^+ (iD_0 + \frac{D^2}{2M_N} - \Delta) t_j - y [t_j^+ N^T P_j N + h.c.] \quad (16)$$

мұндағы, $P_j = \frac{1}{\sqrt{8}} t_2 \sigma_2 \sigma_j$ – екі нуклондық күйге проекция жасайтын

оператор. Ал y –дибарион өрісі мен соларнадағы екі нуклондық күй арасындағы байланыс тұрақтысы. Ковариантты туынды $D_\mu = \partial_\mu + ieQA_\mu$, $Q = \frac{1+t_2}{2}$ түрінде анықталады: Мұнда, Q – заряд операторы, ал A_μ – электромагниттік өріс. y және Δ параметрлері теория нуклон–нуклон шашырауының төмен энергиялы амплитудасын дұрыс қайта беретіндей етіп параметрлер таңдалады. Осы талаптан келесі қатынастарды аламыз

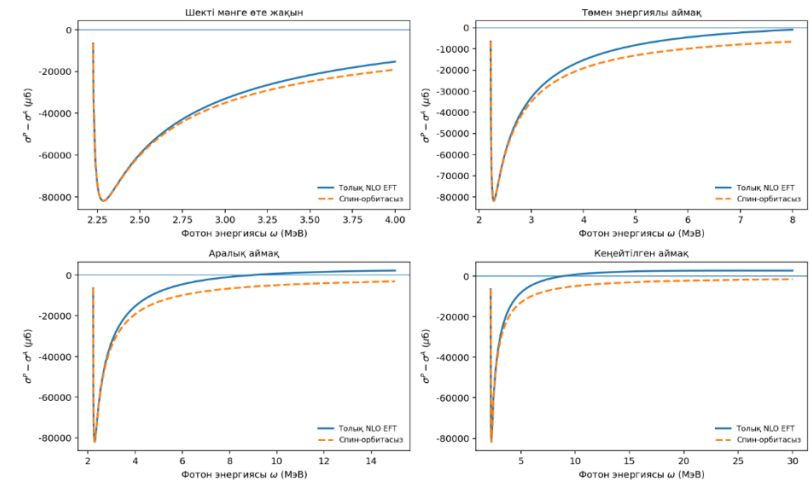
$$y^2 = \frac{8\pi}{M_N^2 r^{(3S_1)}}, \Delta = \frac{2}{M_N r^{(3S_1)}} (\frac{1}{a^{(3S_1)}} - \mu). \quad (17)$$

Мұндағы, $a^{(3S_1)}$ – шашырау ұзындығы, $r^{(3S_1)}$ – эффективті радиус, ал μ – қайтанормалау масштабы. Осылайша, эффективті теориядағы күшті өзара әсерлесу бөлігі екі нуклондық жүйенің тәжірибеден анықталатын төмен энергиялы параметрлері арқылы толық сипатталады.

Нәтижелер және талқылау

Дейтронның фотодезинтеграциясы кезінде спинге тәуелді толық қималар айырымының $\sigma^P - \sigma^A$ фотон энергиясына тәуелділігі көрсетілді. Есептеулерді пионсыз тиімді өріс теориясының NLO жуықтауында жүргіздік. Салыстыру үшін толық EFT нәтижелері және relativistic spin-orbit түзетуі ескерілмеген нұсқа жеке қарастырдық. Осы арқылы қималар айырымының энергетикалық жүрісі сипатталып, релятивистік түзетулердің үлесі бағаланды.

Дейтронның фотодиссоциациясының асимметриясы



1-сурет – Дейтронның фотодезинтеграциясы кезіндегі $\sigma^P - \sigma^A$ асимметриясының фотон энергиясына тәуелділігі

1-сурет – де дейтронның фотодезинтеграциясы кезіндегі спинге тәуелді толық қималар айырымының $\sigma^P - \sigma^A$ фотон энергиясына тәуелділігін көрсеттік. Тұтас сызық NLO ретті толық EFT нәтижені, ал үзік сызық relativistic spin-orbit түзетуі ескерілмеген есепті көрсетеді. Нәтижелер табалдырық маңында бұл шаманың күрт теріс мәнге түсетінін, ал энергия артқан сайын оның модулінің азаятынын көрсетті. Бұл фотодезинтеграция арнасының төмен энергиялы аймақта жоғары сезімтал екенін аңғартады.

Толық NLO нәтижесі мен spin-orbit түзетуі ескерілмеген қисықтарды салыстыру релятивистік түзетулердің маңызды үлес қосатынын көрсетті. Тұтас сызықтың үзік сызықтан жоғары орналасуы spin-orbit $\sigma^P - \sigma^A$ шамасының мәні мен энергия бойынша жүрісіне әсер ететінін көрсетті. Сондықтан төмен энергиялы дейтрондық жүйені дәл сипаттау үшін бұл түзетулерді ескеру қажет.

Шекті аймақтағы терең минимум негізгі үлестің соңғы күйімен байланысты екенін көрсеттік. Энергия ұлғайған сайын бұл басымдық әлсіреп, қисық нөлге қарай жақындайды. Жалпы, жүргізілген талдау пионсыз тиімді өріс теориясының NLO жуықтауында дейтрон фотодезинтеграциясының спинге тәуелді қасиеттерін жүйелі сипаттауға болатынын көрсетті.

Қорытынды

Қорытындылай келе, әлсіз өзара әрекеттесулердегі жұптылықтың сақталмауы төмен энергиялы екі нуклондық жүйелер контекстінде теориялық тұрғыдан қарастырылды. Талдау барысында паритет-бұзушы әсерлердің ядролық ортада күшті және әлсіз амплитудалардың интерференциясы арқылы көрінетіні, ал оларды сипаттауда спинге тәуелді бақыланатын шамалардың ерекше маңызға ие екені көрсетілді. Осы мақсатта Дрелл–Хирн–Герасимов қосынды ережесі, дисперсиялық қатынастар және пионсыз тиімді өріс теориясының дибариондық формализмі қолданылды. Бұл тәсіл төмен энергиялы ядролық процестерді модельге тәуелсіз және жүйелі түрде сипаттауға мүмкіндік беретінін көрсеттік.

Сандық есептеулер дейтронның фотодезинтеграциясы кезіндегі спинге тәуелді толық кималар айырымының табалдырық маңында күрт теріс мәнге ие болатынын және энергия өскен сайын оның модулінің азаятынын көрсетті. Толық NLO нәтижесі мен relativistic spin-orbit түзетуі ескерілмеген қисықтарды салыстыру релятивистік түзетулердің елеулі үлесін айқындады. Соның негізінде төмен энергиялы дейтрондық жүйені дәл сипаттау үшін мұндай түзетулерді ескеру қажет деген қорытындыға келдік.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер төмен энергиялы ядролық динамиканың спинге сезімтал қасиеттерін нақтылап, әлсіз өзара әрекеттесулермен байланысты құбылыстарды теориялық тұрғыдан түсіндіруге қажетті негіз қалыптастырады. Сонымен қатар, зерттелген шама жұптылықтың сақталмауын тікелей өлшемегенімен, осы бағыттағы кейінгі талдаулар үшін маңызды теориялық тірек бола алады.

REFERENCES

- 1 **Bass, S. D., Pedroni, P., Thomas, A.** The Gerasimov-Drell-Hearn sum rule with nuclear targets //The European Physical Journal A. – 2023. – Т. 59. – № 10. – P. 239. – <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-023-01152-y>.
- 2 **Machleidt, R., Sammarruca, F.** Recent advances in chiral EFT based nuclear forces and their applications //Progress in Particle and Nuclear Physics. – 2024. – Т. 137. – P. 104117. – <https://doi.org/10.1016/j.pnnp.2024.104117>.
- 3 **Cavallin, A. L., Thim, O., Forssén, C.** Entanglement and accidental symmetries in the nucleon-nucleon system //Physical Review C. – 2026. – Т. 113. – №. 1. – P. 014005. – <https://doi.org/10.1103/mlt1-z7t2>.
- 4 **Pleštid, R., Wise, M. B.** Vertex corrections and wavefunction renormalization for atoms, nuclei, and other heavy composite particles //arXiv preprint arXiv:2508.05540. – 2025. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.05540>.

5 **Strakovsky, I. et al.** Single-pion contribution to the Gerasimov-Drell-Hearn sum rule and related integrals //Physical Review C. – 2022. – Т. 105. – №. 4. – P. 045202. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.045202>.

6 **Isidori, G., Wilsch, F., Wyler, D.** The standard model effective field theory at work //Reviews of Modern Physics. – 2024. – Т. 96. – № 1. – P. 015006. – <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.96.015006>.

7 **Schäfer, M., Bazak, B.** Few-nucleon scattering in pionless effective field theory //Physical Review C. – 2023. – Т. 107. – №. 6. – P. 064001. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.107.064001>.

8 **Bub, J. M. et al.** Bayesian analysis of nucleon-nucleon scattering data in pionless effective field theory //Physical Review C. – 2025. – Т. 111. – №. 3. – P. 034005. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.111.034005>.

9 **Zhang, X. et al.** Neutron scattering off one-neutron halo nuclei in halo effective field theory //Physical Review C. – 2023. – Т. 108. – №. 4. – P. 044304. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.108.044304>.

10 **Richardson, T. R., Reis, I. C.** Renormalization group analysis of electromagnetic properties of the deuteron //Physical Review C. – 2025. – Т. 111. – № 6. – C. 064001. – <https://doi.org/10.1103/r2nc-cy7r>.

11 **Arenhövel, H., Fix, A., Schwamb, M.** Spin asymmetry and Gerasimov-Drell-Hearn sum rule for the deuteron //Physical review letters. – 2004. – Т. 93. – № 20. – P. 202301. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.202301>.

12 **Reis, I. C., Sobczyk, J. E., Bacca, S.** Optimized binning for response function reconstruction via Chebyshev expansions //Physical Review C. – 2025. – Т. 112. – № 4. – P. 045502. – <https://doi.org/10.1103/lb85-2487>.

13 **Liu, Q., Low, I., Mehen, T.** Minimal entanglement and emergent symmetries in low-energy QCD //Physical Review C. – 2023. – Т. 107. – № 2. – P. 025204. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.107.025204>.

14 **Dietz, S. et al.** Three-body resonances in pionless effective field theory //Physical Review C. – 2022. – Т. 105. – №. 6. – P. 064002. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.064002>.

15 **Mart, T., Djaja, J. A., Carman, D. S.** Electromagnetic production of kaons on the nucleon //arXiv preprint arXiv:2602.16230. – 2026. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2602.16230>.

13.04.26 ж. баспаға түсті.

21.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*В. Н. Жумабекова¹, Б. Ержан², Н. Н. Оразмұхамет³, А. С. Кувандикова⁴
^{1,2,3}Қазақстан Республикасының педагогикалық университеті имені Абая,
Республика Қазақстан, г. Алматы;
⁴Евразийский национальный университет имені Л. Н. Гумилева,
Республика Қазақстан, г. Павлодар.
Поступило в редакцию 13.04.26.
Поступило с исправлениями 21.04.26.
Принято в печать 03.06.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ В СЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

В данной статье несохранение четности в слабых взаимодействиях рассматривается теоретически в рамках низкоэнергетических двухнуклонных процессов. Основной целью исследования является анализ природы эффектов, нарушающих четность, в ядерных системах и выявление возможностей теоретических подходов, применяемых для их описания. В работе прежде всего рассматриваются общие физические основы несохранения четности, а также описываются особенности спин-зависимых наблюдаемых величин, возникающих в результате интерференции слабых и сильных амплитуд. Кроме того, использованы правило сумм Дрелла–Хирна–Герасимова, дисперсионные соотношения для спин-зависимого комптоновского рассеяния и безпионная эффективная теория поля в дибарионном формализме. Преимущества и пределы применимости рассмотренных подходов при описании слабых эффектов в низкоэнергетических адронных системах проанализированы в сравнительном плане. В результате теоретического исследования изучена зависимость разности спин-зависимых полных сечений при фотодезинтеграции дейтрона от энергии фотона. Численные расчеты показали, что в пороговой области эта величина принимает отрицательное значение, а с увеличением энергии фотона модуль этой величины уменьшается. Сравнение полных результатов следующего за ведущим порядком (NLO) и кривых, в которых не учитывалась релятивистская спин-орбитальная поправка, показало, что релятивистские поправки играют важную роль в точном описании низкоэнергетической дейтронной системы. Полученные результаты позволяют глубже понять слабые ядерные эффекты

в области низких энергий и теоретически обосновать будущие экспериментальные исследования.
Ключевые слова: несохранение четности, дибарионный формализм, слабое взаимодействие, фотодезинтеграция дейтрона, дисперсионные соотношения.

*V. N. Zhumabekova¹, B. Yerzhan²,
N. N. Orazmukhmet³, A. S. Kuvandikova⁴
^{1,2,3}Abai Kazakh National Pedagogical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
⁴L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana.
Received 13.04.26.
Received in revised form 21.04.26.
Accepted for publication 03.06.26.

INVESTIGATION OF PARITY NONCONSERVATION IN WEAK INTERACTIONS

This article presents a theoretical study of parity nonconservation in weak interactions within the framework of low-energy two-nucleon processes. The main goal of the research is to analyze the nature of parity-violating effects in nuclear systems and to identify the capabilities of theoretical approaches used for their description. The paper first examines the general physical foundations of parity nonconservation and describes the features of spin-dependent observables arising from the interference of weak and strong amplitudes. In addition, the Gerasimov–Drell–Hearn sum rule, dispersion relations for spin-dependent Compton scattering, and pionless effective field theory in the dibaryon formalism are employed. The advantages and limitations of the considered approaches in describing weak effects in low-energy hadronic systems are also analyzed comparatively. As a result of the theoretical study, the dependence of the difference in spin-dependent total cross sections in deuteron photodisintegration on photon energy is investigated. Numerical calculations show that this quantity takes negative values in the threshold region, while its magnitude decreases as the photon energy increases. A comparison between the full next-to-leading-order (NLO) results and the curves obtained without including the relativistic spin-orbit correction shows that relativistic corrections play an important role in the accurate description of the low-energy deuteron system. The obtained results make

it possible to achieve a deeper understanding of weak nuclear effects in the low-energy region and to provide a theoretical basis for future experimental studies.

Keywords: parity nonconservation, dibaryon formalism, weak interaction, deuteron photodisintegration, dispersion relations.

FTAMP 29.35.19

DOI

***Т. К. Касенова¹, Р. А. Бештаева², Г. К. Дуйсебаева³,
Ш. Қ. Егемберді⁴, А. М. Айтказина⁵**

^{1,2,3,4,5}М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті,

Қазақстан Республикасы, Тараз қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3158-8711>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2456-9353>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6000-3295>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5910-5032>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1104-3060>

*e-mail: tkkasenova@gmail.com

СТРАТИФИКАЦИЯЛАНҒАН СҰЙЫҚТЫҚТАҒЫ ІШКІ ТОЛҚЫНДАРДЫҢ СТАЦИОНАР ЕМЕС ТЕОРИЯСЫ

Бұл жұмыста стратификацияланған идеал сұйықтықтағы ішкі толқындардың стационар емес теориясы жан-жақты әрі терең деңгейде қарастырылады. Зерттеу барысында екі өлшемді қозғалыс жағдайында бастапқы гидродинамикалық теңдеулер жүйесі ағындық функцияны енгізу арқылы ықшамдалып, бір ғана скаляр теңдеуге келтіріледі. Мұндай түрлендіру есептің құрылымын айқын көрсетіп, оны талдауды айтарлықтай жеңілдетеді және заманауи математикалық әдістерді тиімді қолдануға мүмкіндік береді. Қарастырылған математикалық модель С. Л. Соболев типіндегі екінші ретті дифференциалдық теңдеуге редукцияланып, соған сәйкес нақты әрі қатаң қойылған бастапқы-шекаралық есеп тұжырымдалады.

Жұмыста есептің физикалық қойылымы толық әрі жүйелі түрде негізделіп, сұйықтықтың бос бетінде және қатты түбінде орындалатын шекаралық шарттар жан-жақты сипатталады. Сонымен қатар, стратификацияның табиғаты мен оның толқындардың таралуына әсері арнайы талданып, модельдің физикалық мағынасы терең ашылады.

Нәтижесінде, бастапқы деректерге және стратификация функциясына қойылатын белгілі бір шарттар орындалған жағдайда, ішкі толқындардың математикалық моделінің корректілігі, яғни шешімнің бар болуы, жалғыздығы және тұрақтылығы толық қамтамасыз етілетіні дәлелденеді. Бұдан бөлек, алынған

нәтижелердің жалтылау мүмкіндіктері қарастырылып, олардың гидродинамика, океанология және геофизика салаларындағы қолданбалы маңызы көрсетіледі. Зерттеу қорытындылары болашақ ғылыми жұмыстарға теориялық негіз бола алады.

Кілтті сөздер: стратификацияланған сұйықтық, ішкі толқындар, ағындық функция, функционалдық анализ, динамикалық қысым.

Кіріспе

Стратификацияланған сұйықтықтарда пайда болатын ішкі толқындар гидродинамика саласындағы күрделі әрі маңызды құбылыстардың қатарына жатады. Олар табиғатта, әсіресе мұхиттар мен атмосферада кең таралған және энергия мен импульстің берілу процестерінде елеулі орын алады. Сондықтан мұндай толқындардың қасиеттерін зерттеу теориялық жағынан да, практикалық қолдану тұрғысынан да үлкен қызығушылық тудырады [1].

Ішкі толқындардың таралу сипаты сұйықтық тығыздығының кеңістіктегі өзгерісіне, яғни оның стратификациясына тәуелді болады. Осыған байланысты мұндай орталардағы қозғалыстарды сипаттайтын математикалық модельдер әдетте күрделі дифференциалдық теңдеулер жүйесімен өрнектеледі. Бұл жүйені ықшамдап, бір теңдеуге келтіру зерттеу үдерісін айтарлықтай жеңілдетеді [2].

Осы жұмыста екі өлшемді стратификацияланған идеал сұйықтықтағы кіші ауытқулар қарастырылады. Бастапқы теңдеулер жүйесі ағындық функцияны енгізу арқылы бір скаляр теңдеуге түрлендіріліп, нәтижесінде белгілі бір типтегі екінші ретті гиперболалық теңдеу алынады [3]. Сонымен қатар, есепті толық сипаттау үшін сұйықтықтың бос беті мен қатты түбіндегі шекаралық шарттар ескеріліп, сәйкес бастапқы-шекаралық есеп тұжырымдалады [4].

Жұмыстың басты мақсаты – осы есептің математикалық тұрғыдан дұрыс қойылуын зерттеу, яғни оның әлсіз және күшті шешімдерінің бар болуы мен жалғыздығын негіздеу [5]. Бұл мақсатқа жету үшін функционалдық анализ әдістері, соның ішінде Гильберт кеңістіктерінің теориясы, өзіне-өзі түйіндес операторлар және Рисс теоремасы қолданылады [6].

Алынған нәтижелер стратификацияланған сұйықтықтардағы ішкі толқындарды сипаттайтын модельдердің теориялық негізін тереңдетуге мүмкіндік береді және осы бағыттағы болашақ зерттеулер үшін маңызды алғышарт болып табылады. [7; 8; 9; 10; 11].

Материалдар мен әдістері

Декарттық координаталар жүйесіндегі (x_1, x_2) идеалды қабатталған сұйықтықтың екі өлшемді қозғалысын қарастырайық. Сұйықтық ерікті түрде

стратификацияланған деп есептейміз, яғни оның тұрақты күйдегі тығыздығы $\rho_0 = \rho_0(x_2)$ түрінде болады. Бұл сұйықтықтың шағын қозғалыстары әдетте келесі теңдеулер жүйесімен сипатталады:

$$\rho_0(x_2) \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p + \rho_1 g e_2 = 0, \quad (1.1.a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_1 + \rho'_0(x_2)(e_2 \cdot v) = 0, \quad \operatorname{div} v = 0, \quad (1.1.b)$$

мұндағы $v = (v_1, v_2)$ – сұйықтық бөлшектері жылдамдығының векторы, p – динамикалық қысым, ρ_1 – сұйықтық қозғалыстарынан туындаған тығыздықтың толқуы, Ox_2 ортының e_2 – орт осі и g – ауырлық күшінің үдеуі. $\rho'_0(x_2) = \left(\frac{d}{dx_2}\right) \rho_0(x_2) \leq 0$ деп, яғни сұйықтықтың стратификациясы орнықтылықтың табиғи шартын қанағаттандырады. Сұйықтық алып жатқан екі өлшемді Θ облысы жай ғана қосылсын: онда кез келген соленоидтық (яғни $\operatorname{div} \vec{v} = 0$) теңдеуін қанағаттандыратын $v = (v_1, v_2) \in L_2(\Theta)$ векторлық өрісі $v = (v_{x_2}, -v_{x_1})$, $\psi \in W_2^1(\Theta)$ түрінде бейнеленуі мүмкін. v функциясы әдетте ағындық функция деп аталады [12].

Сондай-ақ v функциясын пайдаланып, (1.1) жүйені осы функция үшін бір теңдеуге келтіруге болады:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\rho_0 v_{x_1 x_2} + (\rho_0 v_{x_1})_{x_2} \right] - g \rho'_0 v_{x_1 x_2} = 0. \quad (1.2)$$

Енді (1.2) теңдеудегі v функциясын $v = [\rho_0(x_2)]^{-\frac{1}{2}} \cdot z(x, t)$, $x = (x_1, x_2)$ формуласы арқылы ауыстырайық, содан кейін жанадан енгізілген функция үшін теңдеуді аламыз.

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\Delta_2 z + \left(\frac{\rho'_0}{4\rho_0^2} - \frac{\rho''_0}{2\rho_0} \right) z \right] - g \frac{\rho'_0}{\rho_0} z_{x_1 x_1} = 0 \quad (1.3)$$

Егер Вейсал-Брент жиілігін енгізсек [13] $\mu_0^2(x_2) = -g \rho'_0(x_2) / \rho_0(x_2)$, онда (1.3) теңдеуін келесідей қайта жазуға болады:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} [\Delta_2 z - \gamma(x_2) z] + \mu_0^2(x_2) z_{x_1 x_1} = 0, \quad (1.4)$$

$$\gamma(x_2) = \frac{1}{2g} \left[\frac{1}{2g} \mu_0^4(x_2) - \frac{d}{dx_2} \mu_0^2(x_2) \right].$$

Негізінде, (1.3) және (1.4) Δ_2 -гі x_1 және x_2 айнымалыларына қатысты Лаплас операторын білдіреді.

Осылайша, (1.1) жүйе (1.4)-белгілі С. Л. Соболев теңдеуімен бірдей типтегі теңдеуге редуцияланды [14]. (1.4) үшін шекара шарттары туралы мәселені қарайық. Алдымен, G арқылы белгіленетін Θ аумағы шекарасының бөлігіне сұйықтықтың ағып кетпеу шарты берілсе, онда $n \cdot \mathbf{V}|_G = 0$ немесе $\left(\frac{\partial}{\partial \tau}\right) v|_G = 0$, мұндағы n – нормаль векторы, ал τ – G-ға қатысты вектор, Соңғы теңдіктен, $v|_G = \text{const}$. v функциясын анықтауда орын алып отырған олқылықтарды ескере отырып, v Θ облысының G шекарасында $v|_G = 0$ деп есептеуге болады [15].

Енді $x_2 = 0$ теңдеуімен сипатталатын және Θ аумағы шекарасының компоненттерінің бірі болып табылатын сұйықтықтың бос бетіндегі шартты қарайық. S белгілейтін бос бетте сызықтық теория шеңберінде түрі бар төмендегі екі динамикалық және кинематикалық шарт орындалуы тиіс екені белгілі:

$$p|_S = \rho_0(0)g\zeta(x_1, t) + p_0(x_1, t), \quad \frac{\partial}{\partial t} \zeta = v_2|_S, \quad (1.5)$$

мұндағы $\zeta(x_1, t)$ – сұйықтықтың $x_2 = 0$ деңгейінен көтерілуі, ал ρ_0 – берілген сыртқы қысым. (1.5) қатынасынан ζ функциясын алып тастағанда

$$\rho_0(0)gv_2 - \frac{\partial}{\partial t} p|_S = -\frac{\partial}{\partial t} p_0(x_1, t)$$

екенін аламыз. Бұл x_1 бойынша теңдікті саралай отырып және (1.1a) теңдеуді пайдалана отырып, p функциясын алып тастаймыз. Нәтижесінде

$$g \frac{\partial}{\partial x_1} v_2 + \frac{\partial^2}{\partial t^2} v_1|_S = -\frac{\partial^2}{\partial t \partial x_1} p_0(x_1, t)$$

екені шығады. $v_1 = v_{x_2}, v_2 = -v_{x_1}$ екенін ескеріп,

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} v_{x_2} - g \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} v|_S = \frac{\partial^2}{\partial t \partial x_1} p_0(x_1, t)$$

теңдікке келеміз, ол v функциясынан u функциясына өткеннен кейін S бос бетіне шарттың түпкілікті түрін алуға мүмкіндік береді:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\frac{\partial z}{\partial x_2} + \frac{\omega_0^2(0)}{2g} z \right] - g \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} z|_S = \varphi(x_1, t), \quad (1.6)$$

мұндағы

$$\varphi(x_1, t) \equiv [\rho_0(0)]^{1/2} \frac{\partial^2}{\partial t \partial x_1} p_0(x_1, t).$$

(1.4) теңдеу және (1.6) шекаралық шарт үшін ұзындығының және (1.4) және (1.6) өлшемсіздендіруді жүргізуге мүмкіндік беретін T_0 уақытының

натурал параметрлері бар. Бұл үшін келесі параметрлерді енгіземіз: $l = \frac{2g}{\mu_0^2(0)}$

және жаңа өлшемсіз тәуелсіз айнымалыларды $\frac{x_1}{l}, \frac{x_2}{l}$ және t/T_0 енгізіп, олар

үшін бұрынғыдай $x = (x_1, x_2), t$, белгілерін сақтай отырып, (1.4) және (1.6) теңдеулерін өлшемсіз түрде қайта жазамыз:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} [\Delta_2 z - \beta(x_2)z] + \sigma^2(x_2)z_{x_1, x_2} = 0, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} [z_{x_1} + z] - \frac{1}{2} z_{x_1, x_2} \Big|_S = f(x_1, t), \quad (1.8)$$

где

$$\sigma^2(x_2) = \frac{\mu_0^2(x_2)}{\mu_0^2(0)}, \beta(x_2) = \sigma^2(x_2) - \frac{d}{dx_2} \sigma^2(x_2).$$

Енді төменде зерттелетін (1.7) теңдеу үшін бастапқы–шекаралық есептің қойылымына көшейік.

Стратификацияланған сұйықтық алып жатқан облысын қарастырайық. Нақтырақ айтқанда, Θ — R^2 -ғы облыс, ол $S = \{x_2 = 0\}$ түзуімен және $G = \{(x_1, x_2): x_2 = -H(x_1), -\infty < x_1 < +\infty; 0 < h_0 \leq$

$H(x_1) \leq H_0 < +\infty\}$ қисығымен шектелген. Айталық, болсын $H(x_1) \in C^{(0)}(R^1)$

S есебі. $Q_T = \Theta \times (0, T]$ -да (1.7), S-де шекті шартқа (1.8) және G-де $z|_G = 0$ шартын қанағаттандырады, бұдан басқа, $z(x, t)$ функциясы $t = 0$ кезінде

$$z(x, 0) = z_0(x), z_1(x, 0) = z(x). \quad (1.9)$$

бастапқы жағдайларды қанағаттандыратын $z(x, t)$ функциясын табу керек.

Физикалық тұрғыдан S есебі стратификацияланған сұйықтықтың екі өлшемді толқындық қозғалысын жоғарыдан S бос бетімен, ал төменнен қатты түбінен G шектелген Θ облысында сипаттайды, Толқындық қозғалыстар сұйықтықтың бастапқы жай-күйімен де (шарттар (1.9)), сондай-ақ бос S сыртқы ауыспалы күйімен де (шарттар (1.8)) туындайды [16].

Сондықтан тұжырымдалған түрде берілген S есебі толық қойылған есеп ретінде қарастырылмайды, өйткені есеп шарттарының орындалу мағынасы нақты айқындалмаған. Бұл мәселені нақтылау үшін есептің дұрыс қойылуын негіздейтін бірқатар маңызды нәтижелерді келтірейік.

Нәтижелер және талқылау

$C^0_G(\Theta)$ арқылы G шекарасының маңайында кез келген $v(x) \in C^0_G(\Theta)$ үшін $|x_1| \geq R$ және $x \in \Theta$ болғанда $v(x) \equiv 0$ болатын $R = R_v > 0$ оң саны табылатын $v(x) = v(x_1, x_2) \in C^\infty(\bar{\Theta})$ функцияларының жиынтығын белгілейміз.

Лемма 1. Кез келген $v(x) \in C^0_G(\Theta)$ үшін мына теңсіздіктер орынды:

$$\|v(x_1, 0)\|_{L_2(S)} \leq H_0^{1/2} \|v_{x_2}\|_{L_2(\Theta)}, \quad (2.1)$$

$$\|v\|_{L_2(\Theta)} \leq H_0 \|v_{x_2}\|_{L_2(\Theta)}, \quad (2.2)$$

мұндағы H_0 жоғарыда анықталған және Θ облысын сипаттағанда келтірілген [17].

Бұл лемманың дәлелдеуі өте оңай және сондықтан оны бұл жерде көрсетпесе де болады.

$\beta(x_2)$ функциясы (1.7) теңдеуін жазуда анықталған деп алайық, $C^{(0)}[-H_0, 0]$ -де жатады және төмендегі шартты қанағаттандыратын болсын:

$$\beta(x_2) \geq -(1 - \delta)/H_0^2, \quad (2.3)$$

мұндағы δ – қандай да бір оң сан. Егер төменде қарама-қайшылық туралы айтылмаса, онда (2.3) шарты орындалады деп болжанады. $C^0_G(\Theta)$ – гі келесі бисызықтық форманы қарастырамыз:

$$[v, \varphi] = (\nabla v, \nabla \varphi)_{L_2(\Theta)} + (v, \varphi)_\beta + (v, \varphi)_S, \quad (2.4)$$

мұндағы $(\cdot, \cdot)_{L_2(\Theta)} - L_2(\Theta)$ – гі скаляр көбейтінді және

$$(v, \varphi)_\beta = \int_\Theta v(x)\varphi(x)\beta(x_2)dx$$

көбейтіндісі

$$(v, \varphi)_S = \int_\Theta v(x_1, 0)\varphi(x_1, 0)\beta(x_2)dx_1$$

$L_2(S)$ -де скаляр болып табылады. (2.4) – де және төменде $\nabla \equiv \text{grad}$. (2.1) және (2.2) теңсіздіктерінен (2.3) шарты орындалғанда мына бағалаулар оңай алынады:

$$\left(\frac{\delta}{H_0^2}\right) \|v\|_{L_2(\Theta)}^2 \leq \delta \|\nabla v\|_{L_2(\Theta)}^2 \leq [v, \varphi] C^2(b, H_0) \|\nabla v\|_{L_2(\Theta)}^2, \quad \forall v \in C^0_G(\Theta), \quad (2.5)$$

мұндағы $C^2(b, H_0) = 1 + b, H_0^2 + H_0$ и $b = \|\beta\|_{C^{(0)}[-H_0, 0]}$.

(2.5) бағалаудан келіп шығатыны, (2.4) бисызықтық формасы $C^0_G(\Theta)$ -де $[\cdot, \cdot]$ скалярлық көбейтіндіні және оған сәйкес норманы $C^0_G(\Theta)$ гильберт алдындағы кеңістікке айналдыра отырып тудырады. Осы гильберт алдындағы кеңістікті көрсетілген норма бойынша толықтыра отырып, гильберт кеңістігіне келеміз, оны $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ арқылы белгілейміз, ал оның нормасын $\|\cdot\|_1$ арқылы белгілейміз.

Бағалаудағы кез келген $v(x) \in \widehat{W}_2^1(\Theta)$ функциясы үшін мына теңсіздік келіп шығады

$$C^{(0)}[-H_0, 0]$$

$$\|v\|_1 \leq C(b, H_0) \|\nabla v\|_{L_2(\Theta)}, \quad (2.6a)$$

$$(\delta^{1/2} H_0) \|v\|_{L_2(\Theta)} \leq \delta^{1/2} \|\nabla v\|_{L_2(\Theta)} \leq \|v\|_1. \quad (2.6b)$$

Сонымен қатар, $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ –де (2.1), (2.2) теңсіздіктерінің де дұрыстығы дәлелденеді. Енді $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ –де қарастырылған шектік есептерден туындаған кейбір операторларды қарастырайық. Келесі есептен бастаймыз:

$$\Delta_2 v - \beta(x_2)v = -z_{x_1 x_1} \Theta, \quad v|_G = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x_2} + v|_S = 0, \quad (2.7)$$

мұндағы $z \in \widehat{W}_2^1(\Theta)$. Осыған ұқсас интегралдық ұқсастықты қанағаттандыратын $v \in \widehat{W}_2^1(\Theta)$ функциясы ретінде (2.7) есептің $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ –ғы жалпыланған шешімін анықтайық

$$[v, v] = -(v_{x_1}, z_{x_1})_{L_2(\Theta)} \quad \forall v \in \widehat{W}_2^1(\Theta).$$

Гильберттік кеңістіктегі сызықтық функционалды және теңсіздікті (2.6) ұсыну туралы Рисс теоремасын пайдалана отырып, әдеттегідей

[5]-ті $\widehat{W}_2^1(\theta)$ - ден іздеп ізделінді жалпыланған шешімнің бар екендігіне және дара екеніне көз жеткіземіз және B операторын анықтаймыз: $\widehat{W}_2^1(\theta) \rightarrow \widehat{W}_2^1(\theta)$, $v = Bu$ есебі берілген болсын. B операторы келесі бисызықтық формуламен анықталады:

$$[v, Bu] = -(v_{x_1}, z_{x_1})_{L_2(\Omega)} \quad \forall v, z \in \widehat{W}_2^1(\theta), \quad (2.8)$$

B операторының анықтамасын ескере отырып, келесі лемманың жұрыстығын жеңіл дәлелдеуге болады.

Лемма 2. $\widehat{W}_2^1(\theta)$ әсер ететін және де оң емес ($B \leq 0$) B операторы шектеулі өз өзіне түйіндес бола алады. Бұл оператор нормасы үшін келесі бағалау орынды

$$\|Bv\|_1 \leq \delta^{-1} \|v\|_1, \text{ т.е. } \|B\| \leq \frac{1}{\delta}. \quad (2.9)$$

Сонымен қатар, келесі есепті қарастырайық

$$\Delta_2 \mu - \beta(x_2) \omega = 0 \text{ в } \theta, \mu_\Gamma = 0, \frac{\partial \mu}{\partial x_2} + \mu_s = f(x_1) \in L_2(S). \quad (2.10)$$

Жоғарыда көрсетілген, (2.10) есептегі $\widehat{W}_2^1(\theta)$ шешімінен $\mu \in \widehat{W}_2^1(\theta)$ функция ретінде келесі тепе – теңдікті қанағаттандыратын жалпылама шешімді анықтайық:

$$[v, \mu] = (v, f)_s \quad \forall v \in \widehat{W}_2^1(\theta)$$

(2.1) және (2.6) бағалауларын ескерсек және де Рисс теоремасынан, (2.10) есебінің жалпылама шешімі бар болады және келесі оператор арқылы анықталады: $C: \mu = Cf$. C операторы шектеулі $L_2(S)$ -дан $\widehat{W}_2^1(\theta)$ әсер етеді және келесі бисызықтық формуламен анықталады:

$$[v, Cf] = (v, f)_s \quad \forall v \in \widehat{W}_2^1(\theta) \quad \forall f \in L_2(S). \quad (2.11)$$

Зерттеу үшін $P_S - S$ облысындағы $\widehat{W}_2^1(\theta)$ -нен функциялардың ізін алу операторын қарастырамыз, яғни келесі формула арқылы анықталатын оператор болсын:

$$P_S v = v(x_1, 0) \quad \forall v \in \widehat{W}_2^1(\theta).$$

(2.1) және (2.6) теңсіздіктерінен P_S операторы – $\widehat{W}_2^1(\theta)$ -тан $L_2(S)$ -қа әсер ететін шектелген оператор болып табылатындығы шығады.

Енді $C_1 = CP_S$ операторын қарастырайық. Бұл оператор үшін келесі лемма орынды.

Лемма 3. C_1 операторы – $\widehat{W}_2^1(\theta)$ әсер ететін шектеулі өз өзіне түйіндес, теріс емес ($C_1 \geq 0$) оператор. Бұл оператор үшін келесі бағалау орынды:

$$\|C_1 v\|_1 \leq \left(\frac{H_0}{\delta}\right) \|v\|_1, \text{ т.е. } \|C_1\|_1 \leq H_0/\delta. \quad (2.12)$$

Бұл лемманың дәлелденуі (2.11) анықтамасынан және де (2.1) мен (2.6) бағалауларынан шығады.

Сонымен, зерттеу үшін келесі операторларды қарастыру пайдалады болады. $Av = CD_{x_1^2} P_S v$ операторының, мұндағы $D_{x_1} v = v_{x_1}$ анықтамасынан шығады. Бұл операторды бастапқыда $C_G^0(\theta)$ жиынында, сосын $\widehat{W}_2^1(\theta)$ – түгел тығыз деп қарастырамыз. C операторының анықтамасынан келесі теңдік орындалады:

$$[\varphi, Av] = (\varphi, v_{xx_1})_s \quad \forall \varphi, v \in C_G^0(\theta). \quad (2.12)$$

A операторының теріс еместігін ескерсек, $(-A)^{1/2}$ теріс емес операторын қарастыруға алсақ болады, бұл оператор $(-A)$ операторының квадрат түбірі ретінде анықталады. $D(A)$ және $D((-A)^{1/2})$ операторларының анықталу облысы келесі бейнелеулерге жол ашады:

$$D(A) = \{v \in \widehat{W}_2^1(\theta): P_S v \in W_2^2(S)\},$$

$$D((-A)^{1/2}) = \{v \in \widehat{W}_2^1(\theta): P_S v \in W_2^1(S)\},$$

мұнда $W_2^k(S)$, $k = 1, 2$ – собельдік нормаларға сәйкес келетін $C_0^\infty(S)$ тұықталуынан алынатын кеңістіктер [18].

Теореманың орындалуы. (2.3) теңдігіндегі шарт және $\sigma^2(x_2)C^{(1)}[-H_0, 0]$, $\beta(x_2) \equiv C^{(0)}[-H_0, 0]$ орындалады деп тұжырымдалады. Сонымен қатар, (1.8)-дегі $f(x_1, t) \in C^{(1)}[0, T; L_2(S)]$, $T > 0$ болсын. $C^{(2)}[0, T; L_2(S)]$ тиісті болатын және $\frac{\partial^k}{\partial t^k} v(x, t) \in C_G^0(\theta)$, $k = 0, 1, 2$, мұнда $t \in [0, T]$ болғанда $\psi(x, t)$ функциялар жиынын K_T арқылы белгілеп алайық. Бұдан басқа, $v(x, T) = v_t(x, T) = 0$ болсын.

Анықтама. $v(x, t) \in K_T$ кез келген функциялары үшін келесі интегралды тепе-теңдікті қанағаттандыратын $z(x, T) \in L_2[0, T; \widehat{W}_2^1(\Theta)]$ функциясын S есептің әлсіз шешімі деп атаймыз:

$$\int_0^T [v_{tt}, z] dt - \frac{1}{2} \int_0^T [v_{x_1 x_1}, z]_s dt + \int_0^T [v_{x_1}, \sigma^2 z_{x_1}]_{L_2(\Theta)} dt = [v(x, 0), v_1(x)] - [v_t(x, 0), z_0(x)] + \int_0^T (v, f)_s dt. \quad (3.1)$$

Ескерту 2. (3.1) интегралды тепе-теңдігі (1.7) теңдеуін $v(x, t) \in K_T$ көбейткеннен оп оңай есептелінеді және ары қарай (1.8) шекаралық шарттар мен (1.9) –ғы $z_G = 0$ бастапқы шарттарды ескере отырып интегралдау бөліктеп интегралданады. Барлық $t \in [0, T]$ үшін $z(x, t) \in D(A)$ функциялар жиынтығы $A[0, T; D(A)]$ арқылы белгіленеді.

Анықтама. $A[0, T; D(A)]$ тиісті S есебінің әлсіз шешімдерін S есебінің мықты шешімі деп атаймыз. Бұл анықтама үшін келесі лемма орынды.

Лемма 4. S есебінің мықты шешімінің бар болуы $A[0, T; D(A)]$ алынған абстрактілі дифференциалдық теңдеулер үшін Коши есебі шешімдерінің бар болуына эквивалентті болады:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} z = \frac{1}{2} Au + B[\sigma^2 z] + F, z_{t=0} = z_0, z_{t=0} = z_1. \quad (3.2)$$

Мұндағы $F = Cf$ және A, B және C операторы 2 тарауда анықталған.

Дәлелдеу. $z(x, t) \in A[0, T; D(A)]$ S есебінің мықты шешімі болсын. Сонда (3.1) –ді бөліктеп интегралдап, A, B және C операторларын қолданған соң келесі теңдеуді аламыз:

$$\int_0^T [v, z_{tt} - \frac{1}{2} Az - B[\sigma^2 z] - Cf] dt = [v_t(x, 0), z(x, 0) - z(x)] - [v(x, 0), z_t(x, 0) - z_1(x)].$$

Мұнда барлық $v \in K_T$. Бұдан, K_T -ның $L_2[0, T; \widehat{W}_2^1(\Theta)]$, $C_G^0(\Theta) - \widehat{W}_2^1(\Theta)$ –да барлығында тығыз екендігін ескерсек, (3.2) аламыз. Сәйкесінше, керісі де осылай дәлелденеді.

Коши шешімі (3.2) S есебінің күшті шешімі болатыны туралы тұжырым. (3.2) Коши есебін қарастырайық. Жоғарыда сипатталған, A операторы анықталу облысы $D(A)$ болатын $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ -дағы ақырсыз өзара түйіндес оң емес оператор екенін еске түсірейік. $B[\sigma^2 \cdot]$ операторы $\sigma^2(x_2) \in C^1[-H_0, 0]$ және (2.8) –ден шығатын теңдіктердің

$$[v, B(\sigma^2 z)] = -(v_{x_1}, \sigma^2(x_2) z_{x_1})_{L_2(\Theta)} = -(\sigma^2(x_2) v_{x_1}, z_{x_1})_{L_2(\Theta)} = [B(\sigma^2 v), z],$$

әсерінен, 2 леммаға сәйкес $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ -дағы ақырлы оң емес өзара түйіндес оператор болады. A және $B(\sigma^2 z)$ операторларының аталған қасиеттерін және мазмұндалған алынған нәтижелерді ескерсек, онда келесі лемманы аламыз.

Лемма 5. Айталық $z_0(x) \in D(A)$, $z_1(x) \in D((-A)^{1/2})$ және $f(x_1, t) \in C^{(1)}[0, T; L_2(S)]$, сонда $A[0, T; D(A)]$ -дағы (3.2) Коши есебінің шешімі бар болады және жалғыз, сондай-ақ $\partial z / \partial t \in D((-A)^{1/2}) \forall t \in [0, T]$ және $(-A)^{1/2} \partial z / \partial t \in C^{(0)}[0, T; \widehat{W}_2^1(\Theta)]$. 4 және 5 леммалардың негізінде күшті шешімнің бар болуы мен жалғыздығы теоремасын аламыз.

Теорема 1. Егер $\sigma^2(x_2) \in C^{(1)}[-H_0, 0]$ және (2.3) шарты орындалса, онда $z_0(x) \in D(A)$, $z_1(x) \in D((-A)^{1/2})$ және $f(x_1, t) \in C^{(1)}[0, T; L_2(S)]$ S есебінің жалғыз күшті шешімі бар болады.

Енді S есебінің әлсіз шешімін тұрғызуға көшейік. Егер R арқылы ақырсыз өзара түйіндес теріс емес, анықталу облысы $D(R) \equiv D(A)$ болатын $R = -\frac{1}{2} A - B[\sigma^2 \cdot]$ операторын белгілесек, онда ақырсыз өзара түйіндес операторлар [6] функциясы түсінігін қолдана отырып, (3.2) Коши есебін, сондай-ақ S есебінің күшті шешімін мына түрде алуға болады:

$$z(x, t) = \cos(tR^{1/2})[z_0(x)] + \frac{\sin(tR^{1/2})}{R^{1/2}} [z_1(x)] + \int_0^t \frac{\sin\{(t-\tau)R^{1/2}\}}{R^{1/2}} C[f](x, \tau) d\tau. \quad (3.3)$$

Әрбір $t \in [0, T]$ болғанда $\cos(tR^{1/2})$ және $R^{-1/2} \sin(tR^{1/2})$ операторлары $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ -дағы [6]-ның ақырлы операторлары болғандықтан, онда олар $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ – барлық кеңістігіне өздерінің $D(R)$ и $D(R^{\frac{1}{2}})$ анықталу облыстарына дейін кеңейтілуі мүмкін. Сонда $z_0, z_1 \in \widehat{W}_2^1(\Theta)$ и $f(x_1, t) \in L_2[0, T; L_2(S)]$ болғанда

(3.3) формуласы $z(x, t) \in L_2[0, T; \widehat{W}_2^1(\Theta)]$ функциясын анықтайды.

Егер $D(R) \equiv D(A)$ және $D(R^{1/2}) \equiv D((-A)^{1/2})$ барлық $\widehat{W}_2^1(\Theta)$ -да тығыз болатынын ескерсек, онда (3.3) формуласымен анықталған функция кез-келген $v(x, t) \in K_T$ үшін (3.1) интегралдық тепе-теңдігін қанағаттандыратынына оңай көз жеткізе аламыз, сонымен қатар ол S есебінің әлсіз шешімін береді. Осылайша, ақиқат.

Теорема 2. Егер $\sigma^2(x_2) \in C^{(1)}[-H_0, 0]$ және (2.3) шарты орындалса, онда $z_0(x), z_1(x) \in C^{(1)}$ және $f(x_1, t) \in L_2[0, T; L_2(S)]$ болғанда S есебінің әлсіз шешімі бар болады [19].

Кейбір ескертулер. Үшінші пунктте мазмұндалған әдіс S есебінің кейбір модификацияларына сөзбе-сөз көшірілуі мүмкін. Келесі жағдайды

атап өтейік. Сұйықтықпен толтырылған Θ облысы, (екі өлшемді ыдыс) шектелген немесе жартылай шектелген, сондай-ақ сәйкесінше, $\Theta = \{(x_1, x_2) \in R^2: a < x_1 < b, 0 > x_2 > -H(x_1), H(a) = H(b) = 0\}$ немесе $\Theta = \{(x_1, x_2) \in R^2: a < x_1 < +\infty, 0 > x_2 > -H(x_1), H(a) = 0\}$ түрде болуы мүмкін. Сонымен қоса, Θ облысы шекарасында $z|_{\partial\omega_i} = 0$ ағып кетпеу шарты берілген, өзінен ақырлы μ_i ішкі облыстарын шегеру арқылы жасалған көпбайланысты болуы мүмкін. Жоғарыда қатты түбін модельдейтін G шекарасының компонентасы айқын $x_2 = -H(x_1)$ тендеуімен беріледі. Бұл болжам маңызды емес және ол G қисығы $\Pi = \{(x_1, x_2) \in R^2: -\infty < x_1 < +\infty, 0 > x_2 > -H_0\}$ жолағында болсын деген шартпен ауыстырылса болды [20].

Жоғарыда жүргізілген тендеулерде (2.3) шартының ролі маңызды болды, ол $\sigma^2(x_2)$ функция терминінде

$$\sigma^4(x_2) - \frac{d}{dx_2} \sigma^2(x_2) \geq -\frac{1-\delta}{H_0^2}. \quad (4.1)$$

түріне ие болады, мұндағы δ – қандай да бір оң сан. $\sigma^2(x_2) = \frac{\mu_0^2(x_2)}{\mu_0^2(0)}$ Вейсяль – Брент өлшеусіз жиілігін сипаттайтынын еске түсірсек, онда (4.1) шарты стратификацияланған сұйықтық тығыздығының таралу сипатына кейбір шектеу болатынын көреміз, сондай-ақ, ол (4.1) дифференциалдық теңсіздігімен беріледі, және оны жеңіл түрлендіруге болады. Осы түрлендіруді $y = c^2(x) \geq 0$ және $a^2 = \frac{(1-\delta)}{H_0^2} > 0$ енгізу арқылы жүргізейік. Сонда (4.1)

$$y^2 - y' \geq -a^2, \quad -H_0 \leq x_2 \leq 0, \quad (4.2)$$

немесе

$$1 \geq \frac{y'}{y^2 + a^2}. \quad (4.3)$$

болады. (4.3) теңсіздігін интегралдау арқылы

$$a(x_2 + H_0) \geq \arctg \left\{ \frac{y(x_2)}{a} \right\} - \arctg \left\{ \frac{y(-H_0)}{a} \right\}, \quad (4.4)$$

аламыз.

$x_2 > -H_1 = -H_0 + \frac{\{\frac{\pi}{2} - \arctg(\frac{y(-H_0)}{a})\}}{a}$ болғанда (4.4) теңсіздігі кез-келген $y(x_2)$ функциясы үшін орындалғандықтан, онда (4.4) –тен $y(x_2)$ функциясы

болғанда (4.1) шартының ақиқаттығын айқындау үшін келесі бағалауды қанағаттандыруы қажет:

$$y(x_2) = \sigma^2(x_2) \leq \text{atg} \left\{ a(x_2 + H_0) + \arctg \left(\frac{y(-H_0)}{a} \right) \right\}.$$

$$\sigma^2 = \frac{\mu_0^2(x_2)}{\mu_0^2(0)} \quad \text{және} \quad a = \frac{(1-\delta)^{1/2}}{H_0} \quad \text{шамаларына оралсақ, (2.3) шартының}$$

орындалуын қамтамасыз ететін $x_2 \in [-H_0, -H_1]$ болғандағы Вейсяль-Брент жиілігінің өсуін беретін теңсіздік аламыз, жоғарыда бар болуы дәлелденген теоремалардың жеткілікті шарты болатынын еске түсіреді.

Қорытынды

Бұл жұмыста стратификацияланған идеал сұйықтықтағы ішкі толқындардың стационар емес таралуын сипаттайтын математикалық модель зерттелді. Бастапқы гидродинамикалық тендеулер ағындық функцияны енгізу арқылы бір скаляр тендеуге келтіріліп, С. Л. Соболев типіндегі екінші ретті дифференциалдық тендеуге редукцияланды. Бұл түрлендіру есептің аналитикалық қасиеттерін тереңірек талдауға мүмкіндік берді.

Модель үшін бос бет пен қатты түбтің ерекшеліктерін ескеретін физикалық негізделген бастапқы және шекаралық шарттар қойылып, бастапқы-шекаралық есептің қатаң математикалық қойылымы жасалды.

Зерттеуде гильберт кеңістіктері теориясы, Рисс теоремасы және өзіне-өзі түйіндес операторлар аппараты қолданылды. Арнайы функционалдық кеңістіктер енгізіліп, априорлық бағалаулар мен көмекші леммалар дәлелденді. Осы нәтижелер негізінде есептің әлсіз және күшті шешімдерінің бар болуы мен жалғыздығы негізделді.

Сонымен қатар, шешімнің орнықтылығы мен бастапқы деректерге тәуелділігі зерттеліп, модельдің корректілігін қамтамасыз ететін жеткілікті шарттар алынды. Стратификация функциясына қойылған шектеулер арқылы Вейсяль-Брент жиілігінің қасиеттері және олардың шешімге әсері анықталды.

Алынған нәтижелер ішкі толқындардың таралу механизмдерін түсіндіруге және осындай құбылыстарды сипаттайтын теориялық негізді кеңейтуге мүмкіндік береді. Ұсынылған әдіс ұқсас гидродинамикалық есептерге де жалпылануы мүмкін.

Жұмыстың практикалық маңызы мұхитология, атмосфералық физика және геофизика салаларында, сондай-ақ стратификацияланған орталардағы динамикалық процестерді модельдеуде қолданылады.

REFERENCES

- 1 **Brekhovskikh, L. M., Goncharov, V. V.** Mechanics of Continua. – Moscow : Nauka, 1982.
- 2 **Ladyzhenskaya, O. A.** The Mathematical Theory of Viscous Incompressible Flow. – Moscow : Nauka, 1970.
- 3 **Whitham, G. B.** Linear and Nonlinear Waves. – New York: Wiley, 1974.
- 4 **Sobolev, S. L.** «On a New Problem in Mathematical Physics». Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Seriya Matematicheskaya. – 1954. – Vol. 18. – № 1. – P. 3–50.
- 5 **Ladyzhenskaya, O. A.** Boundary Value Problems of Mathematical Physics. – Moscow: Nauka, 1973.
- 6 **Riesz, F., Sz.-Nagy, B.** Functional Analysis. – New York : Frederick Ungar, 1955.
- 7 **Krein, S. G.** Linear Differential Equations in Banach Space. – Moscow : Nauka, 1967.
- 8 **Landau, L. D., Lifshitz, E. M.** Fluid Mechanics. 2nd ed. – Oxford : Pergamon Press, 1987.
- 9 **Ovsyannikov, L. V.** Lectures on the Fundamentals of Gas Dynamics. – Moscow: Nauka, 1981.
- 10 **Ovsyannikov, L. V.** Nonlinear Problems of the Theory of Internal Waves. – Novosibirsk: Nauka, 1980.
- 11 **Miles, J. W.** Internal Waves in Stratified Fluids. – Moscow : Mir, 1983 (translation).
- 12 **Gill, A. E.** Atmosphere–Ocean Dynamics. – New York: Academic Press, 1982.
- 13 **Lions, J.-L.** Quelques méthodes de résolution des problèmes aux limites non linéaires. – Paris: Dunod, 1969.
- 14 **Evans, L. C.** Partial Differential Equations. Providence: AMS, 1998 (немец 2nd ed., 2010).
- 15 **Temam, R.** Infinite-Dimensional Dynamical Systems in Mechanics and Physics. – New York : Springer, 1988.
- 16 **Tikhonov, A. N., Samarskii, A. A.** Equations of Mathematical Physics. – Oxford: Pergamon Press, 1963.
- 17 **Kolmogorov, A. N., Fomin, S. V.** Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis. – Moscow : Nauka, 1989.
- 18 **Sobolev, S. L.** Introduction to the Theory of Cubature Formulas. – Moscow: Nauka, 1974.

- 19 **Taylor, G. I.** «Internal Waves in a Stratified Fluid». Proceedings of the Royal Society A. – 1931. – Vol. 132. – № 820. – P. 499–523.
- 20 **Phillips, O. M.** The Dynamics of the Upper Ocean. – Cambridge: Cambridge University Press, 1966.

18.04.26 ж. баспаға түсті.

06.05.26 ж. түзетулерімен түсті.

07.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Т. К. Касенова¹, Р. А. Бейтаева², Г. К. Дүйсебаева³,
Ш. Қ. Егемберді⁴, А. М. Айтказина⁵

^{1,2,3,4,5}Таразский университет имени М. Х. Дулати,

Республика Казахстан, г. Тараз.

Поступило в редакцию 18.04.26.

Поступило с исправлениями 06.05.26.

Принято в печать 07.06.26.

ТЕОРИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

В данной работе всесторонне и глубоко рассматривается нестационарная теория внутренних волн в стратифицированной идеальной жидкости. В ходе исследования система исходных гидродинамических уравнений в случае двумерного движения упрощается путём введения функции тока и сводится к одному скалярному уравнению. Такое преобразование позволяет наглядно выявить структуру задачи, существенно облегчает её анализ и даёт возможность эффективно применять современные математические методы. Рассматриваемая математическая модель редуцируется к дифференциальному уравнению второго порядка типа С. Л. Соболева, в соответствии с чем формулируется строго поставленная начально-краевая задача.

В работе подробно и последовательно обоснована физическая постановка задачи, всесторонне описаны граничные условия на свободной поверхности жидкости и на твёрдом дне. Кроме того, отдельно анализируется природа стратификации и её влияние на распространение волн, что позволяет глубже раскрыть физический смысл модели.

В результате показано, что при выполнении определённых условий на начальные данные и функцию стратификации

корректность математической модели внутренних волн, то есть существование, единственность и устойчивость решения, полностью обеспечивается. Также рассматриваются возможные обобщения полученных результатов и их прикладное значение в гидродинамике, океанологии и геофизике. Полученные результаты могут служить теоретической основой для дальнейших научных исследований.

Ключевые слова: стратифицированная жидкость, внутренние волны, функция тока, функциональный анализ, динамическое давление.

*T. K. Kassenova¹, R. A. Beshtaeva², G. K. Duissebaeva³,
Sh. K. Yegemberdi⁴, A. M. Aitkazina⁵
^{1,2,3,4,5}M. Kh. Dulaty Taraz University, Republic of Kazakhstan, Taraz.

Received 18.04.26.

Received in revised form 06.05.25.

Accepted for publication 07.06.26.

UNSTEADY THEORY OF INTERNAL WAVES IN A STRATIFIED FLUID

This work provides a comprehensive and in-depth study of the non-stationary theory of internal waves in a stratified ideal fluid. In the course of the research, the system of governing hydrodynamic equations for two-dimensional motion is simplified by introducing a stream function and reduced to a single scalar equation. Such a transformation clarifies the structure of the problem, significantly facilitates its analysis, and enables the effective application of modern mathematical methods. The considered mathematical model is reduced to a second-order differential equation of Sobolev type, and accordingly, a well-posed initial-boundary value problem is formulated.

The paper presents a thorough and systematic justification of the physical formulation of the problem, with detailed descriptions of the boundary conditions at the free surface of the fluid and at the rigid bottom. In addition, the nature of stratification and its influence on wave propagation are specifically analyzed, allowing for a deeper understanding of the physical meaning of the model.

As a result, it is shown that under certain conditions imposed on the initial data and the stratification function, the well-posedness of the mathematical model of internal waves—namely, the existence,

uniqueness, and stability of the solution—is fully ensured. Furthermore, possible generalizations of the obtained results are discussed, along with their practical significance in hydrodynamics, oceanography, and geophysics. The findings can serve as a theoretical foundation for future scientific research.

Keywords: stratified fluid, internal waves, stream function, functional analysis, dynamic pressure.

SRSTI 29.03.35

DOI

**A. A. Kulikov¹, *A. Zh. Zhumabekov², N. A. Ispulov³,
A. A. Kissabekova⁴, Abdul Qadir Rahimoon⁵**

^{1,2,3}Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

⁴Margulan University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

⁵Department of Electrical Engineering, Sukkur IBA University,
Pakistan, Sindh.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7419-8035>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2360-3747>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4703-1413>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6300-6758>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0506-2417>

e-mail: almar89-89@mail.ru

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM USING A BOOST CONVERTER IN ENVIRONMENTS WITH DYNAMIC SHADING

This article examines a photovoltaic system (solar panel) and the effect of dynamic shading on power consumption. An electrical circuit has been developed for connecting the components. The series and parallel connections of a photovoltaic system are shown, and their characteristics are studied. During the study, it was found that when the light side is connected in series and shaded, the photovoltaic indicators decrease exponentially. And when connected in parallel, the graph shows a linear decrease with a stepwise character. The photovoltaic characteristics under shading of the circuit section show that the parallel circuit at 66 % shading produces 2.13 mW, whereas the series circuit becomes practically inoperable already at 17 % shading. The results show that by combining cells into consecutive groups of 2 or 3 units, we can increase the voltage to an acceptable level, and the parallel connection of these groups ensures that when one segment is shaded, the rest of the station retains 50–70 % of its power.

Keywords: photovoltaic system, power, serial connection, parallel connection, combined switching circuit.

Introduction

The initial stage in improving the energy efficiency of photovoltaic systems is to identify the optimal internal connection architecture. The key stage in the study of this issue is outlined in the works [1; 2; 3; 4], which examined the replacement of switching circuits in photovoltaic installations and the search for improved circuits. In addition, the use of an intelligent device to control solar panel power output has increased the efficiency of solar energy production.

One of the interesting solutions in the review of scientific papers shows the creation of a dynamic connection of solar panel photocells [6]. This solution is currently original. Researchers in this field have obtained a wide range of parameters for the electricity generated by a photovoltaic plant. For further research and experiments, the researchers suggested creating a solar panel that can dynamically switch its cells between parallel and serial connections. Such a solution would represent a breakthrough in solar panel design. In addition, the principle of dynamically changing connection type could be applied in other areas of energy, electrical engineering, and related fields.

Despite the theoretical appeal of dynamic systems and intelligent power-maximization models, their practical implementation poses significant disadvantages for Kazakhstan's real economy. Presumably, the dynamic switching required in solar panel schemes necessitates a programmable controller. Manufacturing a solar panel with an optimized cell topology eliminates the need for controllers, thereby reducing maintenance costs for photovoltaic plants.

Research into improving the energy efficiency of photovoltaic installations also raises questions about the materials used to manufacture components of solar-powered plants. According to research, the main material used to produce panel cells today is silicon. However, the researchers noticed that its efficiency does not reach high efficiency indicators (maximum 15–20 %). The authors of scientific papers devoted to the research of photovoltaic plant materials identify perovskite. Its efficiency indicators for generating electrical energy are many times higher than those of silicon (20–27 %). Compared to silicon, this material is limited by its operating temperature characteristics. High temperatures destroy the cell's atomic structure, significantly reducing the perovskite cell's performance. However, a striking advantage of perovskite production is lighter technology. Perovskite photovoltaic cells can be printed using industrial printers on both glass and plastic substrates. This enables significant cost reduction in manufacturing these cells compared with silicon-based photovoltaic cells. In addition, printing technologies enable the creation of cells of any shape, expanding the range of applications for perovskite materials. Currently, questions are being raised about improving the atomic structure of perovskite.

Another alternative material for silicon is BiSi_2 disilicide [7]. This material can generate energy in shaded conditions, such as cloudy weather. Manufacturability is better for producing photovoltaic cells from disilicide than from monocrystalline silicon.

When using a silicon base, the fragility of photovoltaic cells is evident, significantly limiting their operation. The use of amorphous silicon enables the creation of flexible cells. This decision led to the idea of using photovoltaic cells instead of windows on buildings and vehicles. Due to amorphous silicon's high transparency, such windows will not obstruct the view and can generate electrical energy, giving the window opening a new and useful function. The use of amorphous silicon as the primary material reduces the area of photovoltaic panels, as observed with perovskites.

Despite the emergence of promising materials such as perovskites and BiSi_2 (bismuth disilicide), their widespread use is limited by technological barriers. This confirms the expediency of improving the efficiency of existing silicon (Si) systems by optimizing their internal architecture.

Thus, today, in addition to monocrystalline silicon, photovoltaic plant manufacturers' markets offer new materials that not only increase electricity-generation efficiency but also improve the manufacturability of photovoltaic panels and their ergonomics.

One of the most common technological solutions for maximizing power generation is the use of automatic positioning systems, or trackers [8; 9; 10]. The main problem with photovoltaic plants is that solar cells lose efficiency as the Sun moves across the sky. Thus, some elements remain shaded, which reduces the amount of solar energy available. Researchers in solar panel automation have developed a practical solution. Equipping the photovoltaic plant with a stepper motor and sensors (trackers) that detect the Sun's movement and turn the panels towards it has significantly improved electricity production efficiency.

It should be noted that these solutions require additional maintenance when operating installations equipped with this type of automation. Stepper motors require careful handling, and consumers often cannot perform maintenance on such a photovoltaic plant themselves. The complexity of maintenance is increased by the availability of controllers and sensors, which require the consumer to have qualified service personnel and appropriate qualifications themselves.

In addition, the presence of complex components in the photovoltaic installation system imposes additional operational requirements, including installation protection measures. The most dangerous aspects of using photovoltaic installations are adverse weather conditions and natural disasters (such as rain and hurricanes). Animals can also harm the stable operation of a photovoltaic plant. Of course, these requirements also apply to other solutions to improve the energy

efficiency of photovoltaic plants; however, adding additional nodes to the system makes it less stable and requires additional measures to protect it.

A critical analysis of the work [11; 12] shows that the introduction of active automation tools (stepper motors, light sensors, microprocessor controllers) carries several significant destabilizing factors:

a) Operational complexity. Tracking systems require high-precision configuration and regular maintenance. For agro-industrial and remote facilities in the Republic of Kazakhstan and the Pavlodar region, this becomes a critical barrier, since an ordinary consumer or a linear electrician often lacks the competence to repair servos and debug controller software [12].

b) Reducing the overall reliability of the system. Adding mechanical components to a photovoltaic installation makes it more vulnerable to external factors. In the sharply continental climate of the Republic of Kazakhstan (characterized by strong wind loads, dust storms, extreme temperatures, and precipitation), the moving parts of the trackers are subject to accelerated wear and mechanical failures [12].

c) Economic burden: The increase in energy production is partially offset by the cost of the own energy consumption of the automation system drives and the increased cost of protective measures against weather disasters and the effects of fauna.

According to the research, automating a solar station's operations is best suited to the power supply needs of industrial institutions with qualified maintenance personnel. For an ordinary consumer without the necessary knowledge to maintain such installations, this system will become a major problem.

In addition to controlling the distribution of electrical energy generated by installations, solar panels can be controlled by artificial intelligence to account for weather conditions. All these solutions can significantly increase the efficiency of solar panels and enable them to operate independently.

Such panels are more productive than those without automation or artificial intelligence controls.

Photovoltaic installations controlled by artificial intelligence can account for the effects of climate and other factors to achieve greater productivity. Based on this statement, the researchers have identified an advantage of such installations: they can be placed far from populated areas, especially in areas with harsh climatic conditions. However, such a solution requires maintenance. An ordinary consumer will not be able to use such installations due to a lack of necessary maintenance knowledge. In the event of an error in the operation of artificial intelligence, highly qualified specialists will be required, necessitating investment in the maintenance of photovoltaic installations operating under its control. The introduction of such

installations, even in industrial enterprises, again requires the availability of highly qualified specialists.

Based on this, AI-controlled solar panels perform well, but their maintenance incurs additional costs.

One rational way to increase the use of solar energy is to introduce reflectors between two adjacent rows of solar panels. Moreover, the photovoltaic panels were deployed in pairs, and a sunlight reflector was placed between them. Thus, when the Sun moves, its energy is reflected onto the solar panels, and, consequently, the drop in power output would not be large if photovoltaic installations were not equipped with these reflectors. In our opinion, this solution is very interesting for farms and other locations far from populated areas. The great benefit of such a solution for farms is that maintaining photovoltaic plants requires little knowledge or expertise. In addition, the purchase of automation devices and tools to operate such installations is not required, making this solution attractive to industry.

Design ideas are relatively economical compared to solar panel automation solutions. But it is worth noting that solar panel automation helps you use the generated energy more efficiently. In addition, automation tools and artificial intelligence-enabled control enable coordination of power generated by photovoltaic installations.

Summing up the analysis of modern achievements in the field of improving the efficiency of photovoltaic systems, we can conclude that the choice of a specific technological solution – whether it is the use of innovative materials (BiSi₂, perovskites), active automation or intelligent control systems – directly depends on the operational context and consumer resources. Each of the considered areas focuses on the rational use of solar energy, but each has its own critical limitations.

The review revealed that AI- and tracker-based systems, despite their high performance, create a «threshold of complexity» that is often unacceptable for decentralized facilities in the real economy. On the contrary, design ideas (reflectors, concentrators) are reliable but lack sufficient adaptability to variable cloud conditions and local shading.

Thus, the most promising and economically justified vector for the Pavlodar region's conditions is optimizing the internal topology of cell switching. The development of effective connection schemes at the panel production stage will achieve the following results:

a) For industry and agriculture: the creation of fault-tolerant power systems that do not require the involvement of expensive specialists in microelectronics and AI.

b) For the private sector: simplify operation and increase the payback period of installations by minimizing service costs.

c) For the region as a whole: adaptation of photovoltaic plants to the specific climatic factors of the northern region of Kazakhstan (dynamic shading, low temperatures).

Thus, the results of the review confirm the relevance and scientific validity of the chosen direction of the master's thesis. Further research will aim to empirically verify the effectiveness of various topologies and develop practical recommendations for the design of next-generation solar panels.

Materials and methods

The purpose of this stage is to obtain empirical data on the behavior of two types of experimental solar panel cell connections (serial and parallel) under normal conditions and in the event of local interference. To ensure the reliability of the results, the measurement procedure was strictly regulated and divided into several consecutive steps.:

– A 100-watt incandescent lamp was used to simulate a light source. It was fixed on a tripod of a room lamp. At the same time, it was possible to fix the light source, eliminating unexpected jumps in the solar panel's current and voltage. Also, thanks to the static fixation of the incandescent lamp, it was possible to set the light source at the optimal distance for the experiment, achieving full illumination of each cell.

– To stabilize the voltage in the photovoltaic cells, a pause of 5 minutes was maintained. This action is necessary when measuring voltage and current, as it minimizes jumps in the measured values during the experiment.

The results were recorded and processed to identify patterns in the influence of dynamic shading across different solar cell topologies.

As noted earlier, dynamic shading occurs when clouds block the sun, when debris is present, or when shadows from structures are cast. In this experiment, the step-by-step cell overlap method was used. An opaque screen was used as the shading object, completely excluding light from entering the selected segment.

The measurement process for each assembled experimental model of a photovoltaic plant included the following 4 iterations:

a) Shading of 0 cells (100 % efficiency): All 6 cells are exposed to direct light. This condition corresponds to that of a clear day and is used as a reference point for the efficiency of a solar station.;

b) Shading of 1 cell (83 % efficiency): There are 5 out of 6 cells under the light. This mode simulates light, partly cloudy weather, or slight contamination of the panel surface.;

c) Shading of 3 cells (50 % efficiency): in this iteration, half of the cells are in shadow. This situation is comparable to cloudy weather or to shadows from buildings, trees, and power poles falling on the panel.;

d) Shading of 4 cells (33% efficiency): most of the cells are in shadow. The conditions simulate heavy clouds or operating conditions during sunset.

The chosen technique allows visual assessment of each topology's fault tolerance: how sharply power drops when one or more segments fail.

Results and discussion

The current (I, A) and voltage (U, V) parameters were recorded simultaneously. To minimize random errors, each measurement was performed three times per iteration, and the arithmetic mean was calculated. The total output power (P, W) was calculated using the formula.

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

where, P is the electrical power, W;

U – voltage, V;

I is the current strength, A.

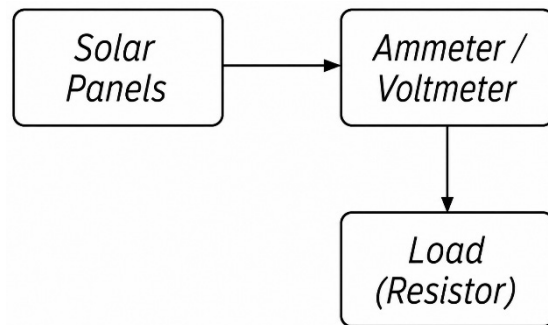


Figure 1 – Experimental scheme of electrical structural E1

The measured current, voltage, and electrical power were entered into the table.

The electrical structural circuit (E1) reflects the general organization of the experimental solar panel and the interaction of the main functional units. According to the chosen direct measurement method, the circuit includes three basic segments:

a) A group of 6 silicon cells represents an energy source (a block of photovoltaic converters). In the block diagram, this unit is a generalized direct current source.

b) Measurement system: consists of a control and measuring device (multimeter). Precision multimeters included in the circuit are used to monitor current and voltage simultaneously.

c) Consumer (Load unit): represented by a resistive element with a fixed resistance, which allows you to simulate the actual operation of the system under load.

To ensure the stability of the input parameters and minimize external interference, the preparatory stage of the experiment included creating a controlled lighting environment.

An incandescent lamp rated at 100 Watts was chosen as the artificial lighting source for the experiment. The following factors justify the choice of this source:

a) Flow stability: the lamp provides a constant radiation intensity, which eliminates errors associated with dynamic changes in natural insolation.

b) Spectral composition: the radiation of an incandescent lamp in the visible and infrared ranges is sufficient to excite silicon solar cells and fix the difference in different types of switching.

Based on the structural diagrams, the final list of components shown in Table 1 can be compiled.

Table 1 – List of components and their purpose

Component name	Appointment
The solar panel	Production of electrical energy from the light stream
The resistor	Load (consumer)
Multimeter	Current and voltage measurements
Incandescent lamp	Light source

Serial connection of solar cells. At this stage of the study, two basic electrical circuits were developed and assembled. The purpose of their creation is to provide a detailed visualization of current flow paths and potential distribution, depending on the type of electrical switching chosen. Each circuit is a complete measurement circuit designed to capture parameters during dynamic shading simulation.

In this configuration, six photovoltaic cells are connected in series: the positive terminal of each cell is connected to the negative terminal of the next.

With this switching, the sum of the cells' electromotive forces (EMFs) is maintained. The following formula determines the total voltage in this case.

$$U_{total} = U_1 + U_2 + \dots + U_6. \quad (2)$$

Since the values of the current and voltage of each cell are the same, you can use this formula.

$$U_{total} = 6 \times U_{cells} \quad (3)$$

When measuring parameters with a multimeter, it is important to keep in mind the following rules:

– When switching the multimeter to the ammeter mode, connect the measuring device sequentially to break the circuit;

– When switching the multimeter to voltmeter mode, connect the measuring device in parallel with the load resistor.

Using the components listed in Table 1, the following schematic diagram can be drawn up (Fig. 2):

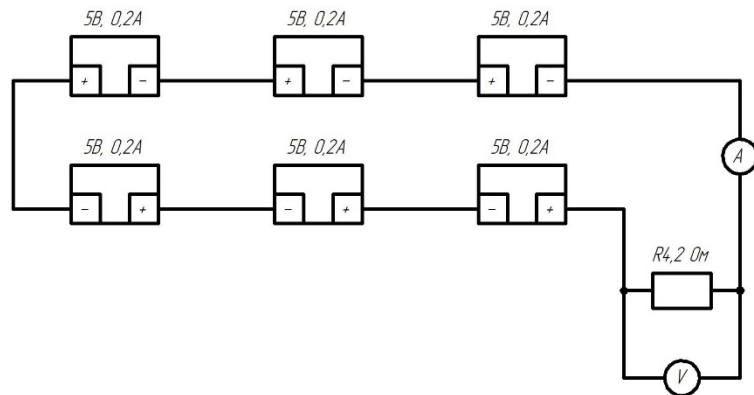


Figure 2 – Electrical schematic diagram of serial switching of solar cells

During the experiment, this scheme is expected to eliminate the circuit's critical dependence on a single element. When even a single cell is shaded, the system's internal resistance increases sharply, resulting in a significant drop in output power.

One important step in assembling electrical circuits for solar power plants is determining the consumer's nominal resistance.

The required resistance value (Ohms) can be determined from Ohm's law

$$R = \frac{U_{total}}{I_{cells}}, \quad (4)$$

where R is the resistance of the resistor, Ohms;

U_{total} is the total voltage of the solar cells, V;

I_{cells} – the current strength of the cell, A.

Using formulas 2 and 3, we calculate the total voltage of solar cells in a sequential topology.

$$U_{total} = 6 \times U_{cells} \quad (5)$$

We substitute the resulting value into formula 4 to find the resistor's desired resistance.

$$R = \frac{30 \text{ V}}{0,2 \text{ A}} = 150 \text{ Ohm}$$

The resulting resistance of 150 ohms is standard, and this resistor can be purchased without issue. For further calculations, we accept this value.

Parallel connection of solar cells. With this type of connection, six photovoltaic cells are connected in parallel: the positive contacts of all solar cells are connected to a common positive bus, and the negative contacts to a common negative bus.

In a parallel circuit, the voltage remains constant, but the current strength of all branches is summed according to formula 6

$$I_{total} = 6 \times I_{cells} \quad (6)$$

where I_{total} – total current strength of solar cells, A;

I_{cells} – cell current strength, A.

This requires a different approach to choosing the resistance so that the multimeter can detect small changes in current.

Let's substitute the nominal values for the solar cells and find the total system current.

$$I_{total} = 6 \cdot 0,2 = 1,2 \text{ A} \quad (7)$$

Let's calculate the required resistor value for a parallel connection using formula 3.

$$R = \frac{5 \text{ B}}{1,2 \text{ A}} = 4,167 \text{ Ом} \quad (8)$$

The resulting resistance value is rounded to the standard resistor value of 4.2 Ohms.

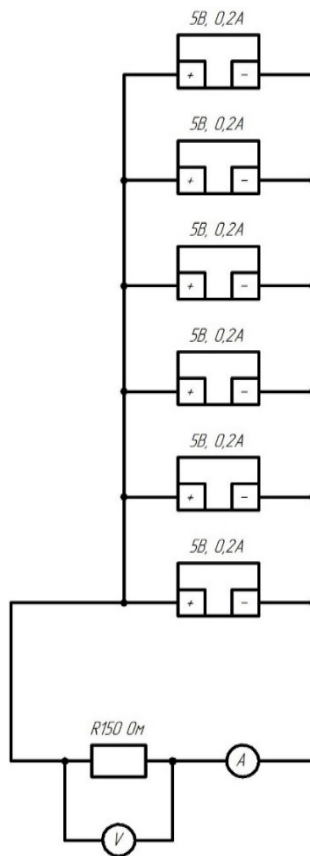


Figure 3 – Electrical schematic diagram of parallel switching of solar cells

In accordance with the early experimental methodology described, two solar panel models have been assembled, each corresponding to a different switching configuration (serial or parallel). Figure 4 shows an experimental model of a photovoltaic plant.

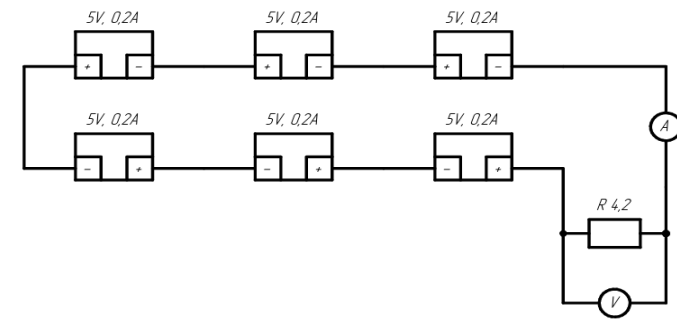


Figure 4 – Experimental model of a photovoltaic plant

During the experiment, data on the output voltage and current were obtained for two types of cell switching under different insolation scenarios. The measurement results and calculated power values are filled in Table 2.

Table 2 – Comparative table of empirical values of photovoltaic plants

$N_{sh,cells}$	Serial connection			Parallel connection			
	I, mA	U, mV	P, mWt	$N_{sh,cells}$	I, mA	U, mV	P, mWt
0	7.89	1060	8.3634	0	87.5	438	38.325
1	0.05	90	0.0045	1	74.4	375	27.9
3	0.02	40	0.0008	3	38.7	225	8.7075
4	0.01	20	0.0002	4	18.7	114	2.1318

Based on the data in Table 2, a graph was constructed showing the dependence of the output electrical power (P, mW) on the number of shaded cells ($N_{sh,cells}$). Visualization of the data obtained (Fig. 5) reveals a fundamental difference in power degradation between the two types of cell connections studied.

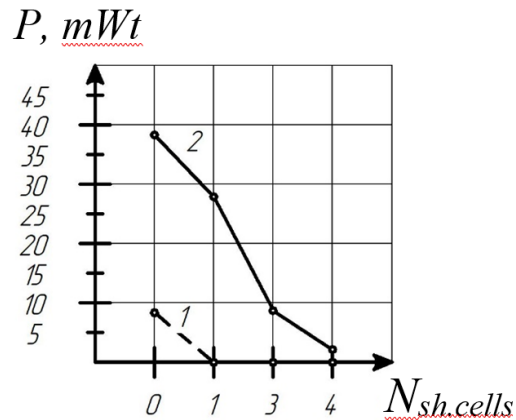


Figure 5 – Graph of the dependence of power on the number of shaded cells

According to Figure 5:

Line number 1. The nature of the serial connection curve (Exponential drop). The graph of the sequential circuit shows a sharp, almost vertical drop in power as early as the first shading iteration.

Thus, as soon as one cell ($N_{sh.cells}=1$) is in the shade, its internal resistance increases to critical values. Since the current in the serial circuit is the same for all elements, the shaded cell begins to work as a «plug», or barrier, limiting the flow of charge carriers from the other five illuminated cells. As a result of this process, the system’s electrical power drops to nearly zero (0.0045 mW), rendering such a panel absolutely inefficient under partial shading conditions without the use of expensive bypass diodes or optimizers.

Line number 2. The nature of the parallel connection curve (Linear degradation). The curve of the parallel circuit is gently stepwise. The power drop here is predictable and proportional to the shading area.

In parallel switching, each cell (or group of cells) is an independent current source. Shading one element turns off only its branch, while the other five cells continue to generate energy and supply it to the common bus at a stable (albeit slightly decreasing due to load) voltage. Even when 50 % of the area (3 cells) is shaded, the parallel station remains operational, producing 8.7 MW, which exceeds the serial circuit’s power output in full-light mode.

Analysis of the obtained graph shows that the parallel connection in this experiment was more effective than the sequential connection at all stages. Special attention should be paid to the fact that the parallel circuit at 66 % shading (N_{sh} .

$=4$) still outputs 2.13 MW, while the serial circuit becomes practically inoperable already at 17 % shading.

To illustrate the result and quantify the stability of each topology to dynamic shading conditions, we introduce the power conservation factor (η_{cons}), which is defined as the ratio of the current shading power to the reference power at full illumination ($N_{sh.cells}=0$)

$$\eta_{cons} = \frac{P_n}{P_0}, \quad (9)$$

where η_{cons} – power conservation factor;

P_n – electrical power when shading n cells;

P_0 – electrical power at full illumination of all cells ($N_{sh.cells}=0$).

Using formula 2.5, Table 3 was compiled with the calculated values of the power conservation coefficient.

Table 3 – Comparative analysis of the electric power drop of experimental models of photovoltaic plants

Serial connection		Parallel connection	
$N_{sh.cells}$	$\eta_{cons. \%}$	$N_{sh.cells}$	$\eta_{cons. \%}$
0	100	0	100
1	0.054	1	72.8
3	0.009	3	22.7
4	0.002	4	5.5

Thus, in a sequential circuit, even with only 17 % of the active area (1 cell) lost, the power conservation coefficient drops to almost zero (0.054 %). This confirms that in this topology, the shaded element acts as a dielectric, almost completely blocking the generation of the entire panel.

The parallel circuit, in turn, demonstrates significantly higher performance. With the loss of the same area (1 cell), the system retains 72.8 % of its efficiency. Even with critical shading of half the area (50 %), the parallel station retains almost a quarter of its energy potential (22.7 %), whereas the serial circuit loses all functionality.

These calculations justify the use of parallel or combined structures in regions with a high probability of dynamic shading. This minimizes the risk of a complete shutdown of generation without active tracking systems or expensive power electronics.

Prospects for the application of combined topology. Based on the experimental measurements, the results showed increased fault tolerance for parallel switching.

However, when choosing a specific connection type (parallel or serial), do not forget the operational features of each topology.

In general, the following advantages can be distinguished for a serial connection type:

- The high voltage of the entire circuit of this connection allows the transmission of electricity over long distances and minimizes energy loss.
- Due to the high voltage and low amperage, smaller cross-section wires can be used, which saves on the design and assembly of solar stations (especially large ones);
- Today, most inverters require a high input voltage to start efficiently (from 150 V and above).

In turn, serial switching has the following operational problems:

- As it was revealed in the experiment, this type of connection does not tolerate cell shading, and the station instantly loses its performance.
- The shaded cell starts working as a resistance, which can lead to overheating and malfunction.

The following advantages are valid for parallel cell topology:

- During the experiment, it was found that this type of switching is sufficiently fault-tolerant to dynamic shading of cells, and the power produced under these conditions can be predicted using the following formula

$$P_{pred.} \approx P_0 \times \left(\frac{N_{total} - N_{sh.cells}}{N_{total}} \right), \quad (10)$$

- where $P_{pred.}$ – predicted electrical power when shading n cells;
 P_0 – electrical power at full illumination of all cells ($N_{sh.cells}=0$);
 N_{total} – total number of cells;
 $N_{sh.cells}$ – number of shaded cells.

– Since this type of solar cell connection has a low voltage, it becomes safe for operation and maintenance.

- Like positive cell switching, parallel has its disadvantages.
- The summation of the current strength of all cells increases the total current strength of the system, which requires the presence of wires with a larger cross-section. This aspect increases the cost of the entire solar plant.
- Due to the low voltage, expensive DC-DC boost converters need to be integrated into the solar station circuit.

Thus, we face an engineering contradiction: a series circuit is economical in materials but extremely unstable, whereas a parallel circuit is reliable but expensive to implement due to the need for thick copper cores and converters.

The solution to this contradiction is combined switching. By combining cells into consecutive groups of 2 or 3 units, we increase the voltage to an acceptable level (which allows the use of standard wires), and the parallel connection of these groups ensures that when one segment is shaded, the rest of the station retains up to 50–70 % of its power.

The choice of the combined circuit configuration is an optimization task in which the variables are the expected shading pattern and the required threshold load voltage.

The experiment showed that splitting the system into more parallel branches increases the resistance to point shadows. However, reducing the number of consecutive elements in a row is constrained by the system's minimum operating voltage. For example, in our experimental 6-cell model, the «2x3» configuration is a balanced solution, since it provides sufficient voltage to charge the batteries while retaining 50 % of generation and covering half of the station area with a single large shadow patch.

Figure 6 shows a schematic electrical diagram of a combined topology, developed as a promising option for organizing connections for the solar power plants under study.

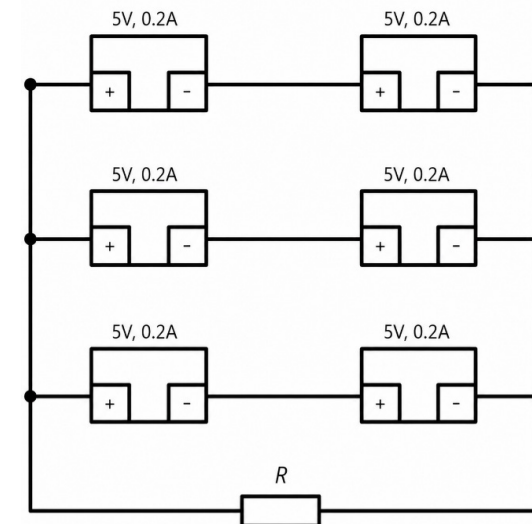


Figure 6 – Electrical schematic diagram of the combined connection of cells of a photovoltaic plant

Conclusion

During the study, comprehensive analyses and experimental tests were conducted to evaluate and confirm the effects of photovoltaic cell switching methods on the overall energy efficiency and fault tolerance of solar power plants under dynamic shading conditions.

Based on the results obtained, the following conclusions are formulated:

a) An analysis of the problems of the operation of photovoltaic power plants has been carried out. During the theoretical analysis, it was found that one of the main problems in the operation of solar power plants is the dynamic shading of cells. Theoretically, it has been shown that cell switching plays a key role in the system's reliability during local interference.

b) Experimental stands have been developed and implemented. For practical research, a model comprising 6 silicon solar cells and a solar radiation simulator powered by a 100-watt incandescent lamp was created. This enabled stable luminous flux and high measurement repeatability, which are critical for confirming engineering hypotheses.

c) The critical vulnerability of a serial circuit has been experimentally proven. During the measurements, it was found that with serial switching, shading of only 17 % of the area (1 cell) results in almost complete generation stoppage (a 99.9 % drop in power). This confirms the bottleneck effect, in which a single shaded element blocks current throughout the circuit.

d) The advantage of parallel switching in terms of fault tolerance is justified. In contrast to the serial circuit, parallel switching has demonstrated a linear power drop. When shading one cell, the system retained 72.8 % of its efficiency, demonstrating its suitability for operation under variable cloud conditions and spot pollution.

e) The implementation of a combined topology is proposed. Based on the synthesis of the advantages of both schemes, a combined (series-parallel) connection has been developed. It has been shown that the «2x3» configuration is optimal for small photovoltaic plants, as it meets the inverter's required voltage threshold while maintaining high system survivability.

The practical significance of this thesis lies in the possibility of applying the data obtained in the design and modernization of photovoltaic plants in regions with unstable solar illumination. When using formula 10, it is possible to develop solar stations tailored to specific conditions, based on the required power and operating conditions of the product being designed.

As noted in this paper, the main criterion for optimizing the topologies of solar cells in photovoltaic plants was the maintenance and repair of these power plants. The availability of high-tech nodes, such as programmable logic controllers and intelligent devices for controlling the distribution of the plant's electric energy,

requires highly qualified personnel. Given the remote locations of potential consumers (farms, industrial facilities), the master's thesis focused on optimizing while maintaining and increasing the productivity of photovoltaic plants.

The proposed recommendations for the transition to combined circuits make it possible to increase energy production and reduce operating costs without significantly increasing the cost of equipment, since the changes relate to changing the wiring diagram of solar cells without introducing programmable logic controllers or any other devices aimed at increasing the performance of photovoltaic plants to maintain the reliability and maintainability of solar panels.

The development of a special combined circuit for switching solar cells at the design stage for the specific operating conditions of a photovoltaic plant (mainly weather conditions and illumination of the place of operation) allows us to produce optimized stations that meet the stated parameters, as well as save consumer funds that would be necessary for servicing high-tech nodes.

REFERENCES

- 1 **Федоров, С. М., Черноиваненко, И. А., Ищенко, Е. А.** Обзор способов интеграции антенн и солнечных панелей // Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета». – Т. 17. – № 2. – 2021.
- 2 **Исса Х., Абдали Л., Якимович, Б. А. и др.** Сравнение эффективности различных методов управления энергетическими параметрами фотоэлектрических систем // Журнал «Труды МАИ». – № 128. – 2023.
- 3 **Бикбулатов, Р. И., Тазеев, Н. Ф.** Динамическое соединение фотоэлементов в солнечных панелях // Журнал «StudNet». – № 4. – 2022.
- 4 **Митрофанов, С. В., Перепелкин, К. А.** Математическое моделирование гибридной ветро-солнечной станции для электроснабжения собственных нужд // Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика». – Т. 22. – № 3. – С. 18–26. – 2022.
- 5 **Сорокин, В. Ю., Вендин, С. В.** Разработка схемы управления зарядкой аккумуляторов для ветро-солнечной электростанции // Журнал «Агротехника и энергообеспечение». – № 4(33). – 2021.
- 6 **Энгель, Е. А., Энгель, Н. Е.** Интеллектуальная модель максимизации генерируемой мощности реконфигурируемой солнечной электростанции // Журнал «Вестник кибернетики». – Т. 22. – № 1. – 2023.
- 7 **Антти, Эс.** Перспективы развития ПСЭ и материалов для преобразователей солнечной энергии в электрический ток // Журнал «Современная электроника». – № 2. – 2024. – С. 7–13.

8 **Dr. Deedar Ali Jamro, Abdul Qadir Rahimoon, Ghulam Qadir Samtio, Zubeda Bhatti, Ghulam Ali Jamro.** Designing of antennas for 5g network applications // Bulletin of Toraighyrov University Physics, Mathematics & Computer Science series. – 2025. – № 2. – P. 174–188. – <https://doi.org/10.48081/mzhq4441>.

9 **Q. A. Memon, A. Q. Rahimoon, K. Ali, M. F. Shaikh, and S. A. Shaikh.** «Determining optimum tilt angle for 1 MW photovoltaic system at Sukkur, Pakistan». International Journal of Photoenergy. – Vol. 2021. – Article ID 5552637.

10 **Zainul Abideen Abbati, Ibrahim Abdullahi, Sagir Lawan Waziri, Nazif Yusuf Sule, Hindatu Idris Umar.** Investigation into the potential of using sand for glass making // Bulletin of Toraighyrov University Physics, Mathematics & Computer Science series. – 2026. – № 1. – P. 81–97. – <https://doi.org/10.48081/bgqf1897>.

11 **Zubeda Bhatti, Dr. Deedar Ali Jamro.** Renewable and alternative energy sources offer sustainable solutions to address the growing demand for power while mitigating environmental impact // Bulletin of Toraighyrov University Physics, Mathematics & Computer Science series. – 2025. – № 4. – <https://doi.org/10.48081/oczt8757>

12 **Tanasheva, N. K., Afanasyev, D. A. et al.** Designing and Prototyping a Microcontroller Device for Measuring the Main Parameters of Solar Panels // «Bulletin of the Karaganda University», series «Physics». – 2026. – № 1(121). – 31. – <https://doi.org/10.31489/2026PH1/49-58>.

REFERENCES

1 **Fedorov, S. M., Chernoiivanenko, I. A., Ishhenko, E. A.** Obzor sposobov integracii antenn i solnechny`x panelej [An overview of ways to integrate antennas and solar panels] // Zhurnal «Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta». – T. 17. – № 2. – 2021.

2 **Issa, X., Abdali, L., Yakimovich, B. A. et al.** Sravnenie e`ffektivnosti razlichny`x metodov upravleniya e`nergeticheskimi parametrami fotoe`lektricheskix system [Comparison of the effectiveness of various methods for controlling the energy parameters of photovoltaic systems] // Zhurnal «Trudy` MAI». – № 128. – 2023.

3 **Bikbulatov, R. I., Tazeev, N. F.** Dinamicheskoe soedinenie fotoe`lementov v solnechny`x panelyax [Dynamic coupling of solar cells in solar panels] // Zhurnal «StudNet». – № 4. – 2022.

4 **Mitrofanov, S. V., Perepelkin, K. A.** Matematicheskoe modelirovanie gibridnoj vetro-solnechnoj stancii dlya e`lektrosnabzheniya sobstvenny`x nuzhd [Mathematical modeling of a hybrid wind-solar station for power supply for own

needs] // Zhurnal «Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: E`nergetika». – T. 22. – № 3. – P. 18–26. – 2022.

5 **Sorokin, V. Yu., Vendin, S. V.** Razrabotka sxemy upravleniya zaryadkoj akkumulyatorov dlya vetro-solnechnoj e`lektrostantsii [Development of a battery charging control scheme for a wind-solar power plant] // Zhurnal «Agrotexnika i e`nergoobespechenie». – № 4(33). – 2021.

6 **E`ngel` E. A., E`ngel`, N. E.** Intellekтуal`naya model` maksimizacii generiruemoj moshhnosti rekonfiguriruemoj solnechnoj e`lektrostantsii [An intelligent model for maximizing the generated capacity of a reconfigurable solar power plant] // Zhurnal «Vestnik kibernetiki». – T. 22. – № 1. – 2023.

7 **Antti, E.** Perspektivy razvitiya PSE i materialov dlya preobrazovatelej solnechnoj e`nergii v e`lektricheskij tok [Prospects for the development of PSE and materials for converters of solar energy into electric current] // Zhurnal «Sovremennaya e`lektronika». – № 2. – 2024. – P. 7–13.

8 **Dr. Deedar Ali Jamro, Abdul Qadir Rahimoon, Ghulam Qadir Samtio, Zubeda Bhatti, Ghulam Ali Jamro.** Designing of antennas for 5g network applications // Bulletin of Toraighyrov University Physics, Mathematics & Computer Science series. – 2025. – № 2. – P. 174–188. – <https://doi.org/10.48081/mzhq4441>.

9 **Q. A. Memon, A. Q. Rahimoon, K. Ali, M. F. Shaikh, and S. A. Shaikh.** «Determining optimum tilt angle for 1 MW photovoltaic system at Sukkur, Pakistan». International Journal of Photoenergy. – Vol. 2021. – Article ID 5552637.

10 **Zainul Abideen Abbati, Ibrahim Abdullahi, Sagir Lawan Waziri, Nazif Yusuf Sule, Hindatu Idris Umar.** Investigation into the potential of using sand for glass making // Bulletin of Toraighyrov University Physics, Mathematics & Computer Science series. – 2026. – № 1. – P. 81–97. – <https://doi.org/10.48081/bgqf1897>.

11 **Zubeda Bhatti, Dr. Deedar Ali Jamro.** Renewable and alternative energy sources offer sustainable solutions to address the growing demand for power while mitigating environmental impact // Bulletin of Toraighyrov University Physics, Mathematics & Computer Science series. – 2025. – № 4. – <https://doi.org/10.48081/oczt8757>

12 **Tanasheva, N. K., Afanasyev, D. A. et al.** Designing and Prototyping a Microcontroller Device for Measuring the Main Parameters of Solar Panels // «Bulletin of the Karaganda University», series «Physics». – 2026. – № 1(121). – 31. – <https://doi.org/10.31489/2026PH1/49-58>.

Received 15.04.26.

Received in revised form 17.04.25.

Accepted for publication 07.06.26.

А. А. Куликов¹, *А. Ж. Жумабеков², Н. А. Испулов³,

А. А. Киссабекова⁴, Абдул Кадир Рахмун⁵

^{1,2,3}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

⁴Марғұлан университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

⁵Шуккур ИВА университетінің Электротехника факультеті, Пәкістан, Синдх.

15.04.26 ж. баспаға түсті.

17.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

07.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ДИНАМИКАЛЫҚ КӨЛЕҢКЕЛЕНГЕН ОРТАДА КҮШЕЙТКІШ ТҮРЛЕНДІРГІШТІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ФОТОЭЛЕКТРЛІК ЖҮЙЕНІҢ ЖҰМЫСЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақала фотоэлектрлік Жүйені немесе күн панелін, сондай-ақ динамикалық көлеңкелудің қуат тұтыну процесіне әсерін зерттеуге бағытталған. Жұмыста компоненттерді қосу үшін электр схемасы жасалған. Фотоэлектрлік жүйенің сериялық және параллель байланысы көрсетілген және оның сипаттамалары зерттелген. Зерттеу барысында Жарық жағын тізбектей қосу және көлеңкелеу кезінде фотоэлектрлік көрсеткіштер экспоненциалды түрде төмендейтіні анықталды. Ал параллель жалғанған кезде график сызықтың сызықтық азаюын және сатылы сипатын көрсетеді. Тізбек учаскесінің көлеңкесіндегі фотоэлектрлік сипаттамалар параллель тізбектің 66 % көлеңкеде екенін көрсетеді қуат 2,13 мВт құрайды, ал тізбекті тізбек 17 % көлеңкеде іс жүзінде жұмыс істемейді. Нәтижелер ұяшықтарды 2 немесе 3 бірлік қатарынан топтарға біріктіру арқылы біз кернеуді қолайлы деңгейге дейін көтеретінімізді көрсетеді және бұл топтардың бір-бірімен параллель қосылуы бір сегмент көлеңкеленген кезде станцияның қалған бөлігі өз қуатының 50–70 % дейін сақтауын қамтамасыз етеді.

Кілтті сөздер: фотоэлектрлік жүйе, қуат, сериялық байланыс, параллель байланыс, аралас коммутация схемасы.

А. А. Куликов¹, *А. Ж. Жумабеков², Н. А. Испулов³,

А. А. Киссабекова⁴, Абдул Кадир Рахмун⁵

^{1,2,3}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

⁴Марғұлан университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

⁵Факультет электротехники Университета Суккур ИВА, Пакистан, Синдх.

Поступило в редакцию 15.04.26.

Поступило с исправлениями 17.04.26.

Принято в печать 07.06.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ЗАТЕНЕНИЯ

Данная статья направлена на исследование фотоэлектрической системы или солнечной панели, а также влияния динамического затенения в процесс получения потребляемой мощности. В работе разработана электрическая схема для соединения компонентов. Показано последовательное и параллельное соединение фотоэлектрической системы и изучены его характеристики. При исследовании обнаружено, что при последовательном соединении и затенении световой стороны фотоэлектрические показатели уменьшаются в экспоненциальном порядке. А при параллельном соединении график показывает линейное уменьшение и ступенчатый характер линии. Фотоэлектрические характеристики при затенении участка цепи показывают, что параллельная схема при 66% затенения мощность равна 2,13 мВт, в то время как последовательная схема становится практически неработоспособной уже при 17 % затенения. Полученные результаты показывают, что объединяя ячейки в последовательные группы по 2 или 3 единицы, мы повышаем напряжение до приемлемого уровня, а параллельное соединение этих групп между собой гарантирует, что при затенении одного сегмента остальная часть станции сохранит до 50–70 % своей мощности.

Ключевые слова: фотоэлектрической системы, мощность, последовательное соединение, параллельное соединение, комбинированная схема коммутации.

FTAMP 29.05.33

DOI

**Т. Б. Қоштыбаев¹, Ш. Алиев²,
*А. Т. Жавлиева³, М. Е. Алиева⁴**

^{1,3}Қазақ ұлттық педагогикалық қыздар университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

²И. Арабаев атындағы Қырғыз мемлекеттік университеті,
Қырғызстан Республикасы, Бішкек қ.;

⁴Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4704-2953>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4554-7604>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>

*e-mail: zhavlijeva.11@gmail.com

ӨРІСТЕР ТЕОРИЯСЫНЫҢ ЛАГРАНЖДЫҚ ФОРМАЛИЗМІНЕ КОВАРИАНТТЫ– ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ КӨЗҚАРАС

Электродинамикадағы өрістік процестерді арнайы салыстырмалылық теорияның постулаттарын, аналитикалық механиканың вариациялық принциптерін және релятивистік теорияның талаптарын ескеретін лагранж формализмі тұрғысында сипаттау мәселесі дифференциалдық геометрия мен алгебралық топология (қабатталған кеңістік) секілді заманауи математикалық аппарат арқылы көрсетілді. Өрістердің релятивистік теориясындағы лагранжианға қойылатын талаптар, үзіліссіз жүйенің энергия–импульс тензоры, электромагниттік өріске қойылатын коварианттық шарттар (көзқарастар), электромагниттік өрістің импульстік бейнесі және көп импульстік формализм қағидалары физика–техникалық маңыздағы арнайы модельдер шеңберінде қарастырылды. Лагранжианның Минковский мен фазалық кеңістіктердегі өрнектерінің коварианттық үлгілері лежандр морфизмі негізінде шығарылып көрсетілді. Осылармен берге, өрістер теориясының коварианттық өрнектері конфигурациялық кеңістіктегі Янг–Мильстің лагранжианы мен Эйлер–Лагранж теңдеулерін пайдалану арқылы алынды. Барлық есептеулер дифференциалдық геометрия мен алгебралық топология

талаптарына сай жүргізілді. Өрістік функцияларға арналған қозғалыс теңдеулері вариациялық принциптерді қолданатын үзіліссіз жүйелердің математикалық аппараты бойынша қарастырылды. Ли алгебрасының құрылымдық тұрақтысы мен топтар арасындағы базистік құрылымдар арқылы конфигурациялық кеңістігіндегі Янг–Мильстің еркін лагранжианының өрнегі ықшамды түрге келтірілді. Лежандрлық морфизммен қауымдасқан лагранжианның және лагранждық формализмдегі көп импульстік гамльтонианның өрнектері коварианттық үлгіде жазылды. Өрістік функцияларға арналған қозғалыс теңдеулері вариациялық принциптерді қолданатын үзіліссіз жүйелердің математикалық аппараты мен Эйлер–Лагранждық алгебралық теңдеуі негізінде қарастырылды.

Кілтті сөздер: лагранж формализмі, электромагниттік өріс, лагранжиан, қабатталған кеңістік, электродинамика, дифференциалдық геометрия, өрістік функция.

Кіріспе

Өрістің теориясында материялық нүктелердің үзіліссіз жүйесіне арналған классикалық механикадағы математикалық аппаратқа ұқсас аппарат қолданылады. Нақты айтқанда, Лагранждық формализмде арнайы салыстырмалылық теорияның постулаттарын ескеріп және осыларға аналитикалық механикадағы вариациялық принциптер мен релятивистік теория талаптарын қосып 4–өлшемді кеңістік–уақыттағы динамикалық айнымалылар анықталады. Осылайша электромагниттік өріске, скаляр және спинорлы бөлшектерге арналған қозғалыс теңдеулері пайда болады. Электромагниттік өріс пен зарядталған бөлшектердің әсерлесулеріне арналған теңдеулер калибрлеуші инварианттылық принциптеріне сәйкес шығарылып алынады. Бұл теңдеулердің шешімдерін Грин функциялары тәсілі бойынша анықтап, ауытқулар теориясы мен өрістік функциялардың қасиеттерін пайдаланып нақтылы электродинамикалық процестердің ықтималдылықтары мен амплитудаларын іздеуге жол ашылады [1].

Элементар бөлшектердің белгілі бір тобына сәйкес келетін классикалық өрістер кеңістікті–уақытты координаталарға қатысты трансформациялық қасиеттерге ие болатын үзіліссіз толқындық функциялар кейпінде беріледі. Өрістік функцияларға арналған қозғалыс теңдеулерін жасауға арналған ыңғайлы бір формализмдердің бірі, әрі бірегейі ретінде вариациялық принциптерге негізделген үзіліссіз жүйелердің математикалық аппарат қолданылады. Вариациялық принциптер жүйесінде ғана лагранж формализмі арқылы элементар бөлшектердің кванттымеханикалық және

трансформациялық релятивистік қасиеттерін ескеруге мүмкіндік бар. Лагранж формализмі көзқарасындағы өрістер теориясында физикалық жүйедегі жекелеген бөлшектердің координаталары кеңістік пен уақыт бойынша таралатын өріспен алмастырылады, осылайша кеңістік пен уақыт арасындағы симметрияның сақталуы ойластырылған. Ал, гамильтондық формализмде 4-өлшемді кеңістік–уақыт 3 өлшемді кеңістік пен уақытқа жіктеліп кетеді және каноникалық айнымалылардың рөлін әрбір уақыт мезетіндегі өрістік функциялар атқаратын болады. Осы қасиеттеріне қарай гамильтон формализмін өрістердің кванттық теориясына, дәлірек айтқанда калибрлеуші өрістерді кванттауда қолданған тиімдірек. Келтірілген осы жағдайлар гамильтон формализмінің лагранждық формализм секілді классикалық өрістерді сипаттап бере алмайтындығын айғақтайды [2].

Ұсынылып отырған мақаланың негізгі мақсаты– электродинамикадағы өрістік мәселелерді лагранж және гамильтондық формализмдердің өзгеше бір нұсқаларына негізделген физикалық және техникалық маңызы бар модельдер мен осындағы дифференциалдық геометрия мен алгебралық топология (қабатталған кеңістік) секілді заманауи математикалық аппарат көмегімен шешуге болатындығын көрсету.

Материалдар мен әдістері. Зерттеу материалдарына Лагранж функциясы, тығыздық лагранжианы, өріс пен оның бірінші ретті туындыларына, координаталарға тәуелді болатын скаляр функцияны, Лоренц түрлендіруін жатқызуға болады. Осылармен бірге, лагранжианнан кеңістік–уақыттың 4-өлшемді көлемі бойынша алынған интеграл түрінде анықталатын функционал, скаляр, спинорлы немесе векторлық өрістер және үзіліссіз түрлендіру топтары (трансляциялар, бұрылулар, калибрлеуші түрлендірулер) де формализмнің табиғаты мен қолданылу аясын ашатын материалдар қатарын толықтыра алады. Ал, вариациялық тәсіл, калибрлеуші формализм, Неттер теоремасы және ауытқулар теориясының тәсілдері математикалық құрылым немесе аппарат ретінде зерттеу әдістерінің жүйесін құрайды. Бұлардан басқа, есептеулер кезінде тензорлық және матрицалық есептеу амалдарының элементтері де қолданылатын болады.

Нәтижелер және талқылау

4 өлшемді кеңістік–уақыт нүктелеріндегі үзіліссіз жүйенің функцияларын $\eta(x)$ деп алайық. Осы өрістік функциялар мен олардың 4 өлшемді туындыларына тәуелді болатын үзіліссіз жүйенің лагранжианы релятивистік теорияның принциптері мен кванттық механикадан шығатын төменде келтірілетін талаптарды қанағаттандыруы қажет.

Біріншіден, лагранжиан релятивисті инвариантты шама болуы тиіс, сәйкес өрістік функциялар Лоренц түрлендірулеріне бағынышты.

Екіншіден, барлық физикалық өлшенетін шамалар лагранжиан арқылы өрнектелетін болғандықтан, лагранжиан нақты шама болуы қажет.

Үшіншіден, лагранжиан тек екінші реттен аспайтын туындыларға ғана тәуелді болуы тиіс.

Осы талаптарды ескере келе релятивистік көзқарастағы Лагранж–Эйлер теңдеулерін 4 өлшемді кеңістік–уақыттағы ең аз әсер принципінен шығарып алуға болады [3]:

$$\partial_\mu \left(\frac{\partial L}{\partial (\partial_\mu \eta_a(x))} \right) - \frac{\partial L}{\partial \eta_a(x)} = 0,$$

$$L = L(\eta_a(x), \partial_\mu \eta_a(x), x)$$

Координаталары (x^λ, y^i) түрдегі $\pi: Y \rightarrow X$ қабаттарға бөлінуге сәйкес келетін лагранждық тығыздық (бірінші ретті лагранжиан) $L = L(x^\lambda, y^i, y_\lambda^i) \omega$, мұндағы $\omega = dx^1 \wedge \dots \wedge dx^n$. Лагранжианның $J^1 Y$ конфигурациялық кеңістіктегі қабаттарға бөлінуі $L: J^1 Y \rightarrow \wedge^n T^* X$. Енді, L лагранжиан үшін екінші ретті дифференциалды операторды (Эйлер–Лагранж операторын) жазамыз [4]: $\varepsilon_L: J^2 Y \rightarrow \wedge^{n+1} T^* Y$, ал осындай бірінші ретті оператордың өрнегі

мынадай болады:

$$\varepsilon'_L = \left[\partial_i - (\partial_\lambda + y_\lambda^i \partial_i + y_{\mu\lambda}^i) \partial_i^\lambda \right] L^\lambda dy^i \wedge \omega \quad (1)$$

Осы келтірілген қабаттарға бөліну қағибалары бойынша лагранж формализміндегі негізгі деген үш теңдеуді ерекше атап көрсетіге болады:

– қайта қабатталуға арналған алгебралық Эйлер–Лагранж теңдеуі: $J^1 J^1 Y \rightarrow J^1 Y$;

$J^1 Y \rightarrow X$ – алғашқы қабатталуға арналған бірінші ретті Эйлер–Лагранж теңдеуі;

– қабаттар арасындағы өзгеріске арналған екінші ретті Эйлер–Лагранж теңдеуі: $Y \rightarrow X$.

$J^1 Y \rightarrow X$ қабатталуға $\Gamma_{\mu\lambda}^i = \Gamma_{\mu\lambda}^i(x^\nu, y^j, y_\nu^j)$ түрдегі байланыстылықты орындайық:

$$\Gamma = dx^\lambda (\partial_\lambda + y_\lambda^i \partial_i + \Gamma_{\mu\lambda}^i \partial_i^\mu) \quad (2)$$

Олай болса, (1) түрдегі бірінші ретті операторға байланыстылықтың әсері $\varepsilon'_L \Gamma = 0$ болады, ал Эйлер–Лагранждың алгебралық теңдеуі

$$\partial_i L^* - (\partial_\lambda + y_\lambda^i \partial_i + \Gamma_{\mu\lambda}^i \partial_i^\mu) \partial_i^\lambda L^* = 0$$

Барлық қабаттардың бөліктеріндегі s интегралдық қима болса, онда (2) түрдегі айланыстылықтың (1)–ші оператордағы ядросы қарапайым өрнекпен анықталатын болады: $\varepsilon'_i J^i s = 0$, бұдан Эйлер–Лагранждың бірінші ретті дифференциалдық теңдеулерін оңай шығарып алуға болады [5; 6]:

$$\partial_i L^* - (\partial_\lambda + s_\lambda^i \partial_j + \partial_\lambda s_\mu^j \partial_j^\mu) \partial_i^\lambda L^* = 0$$

Калибрлеуіш көзқарас физикалық өрістерді геометриялық теория тұрғысында сипаттау үшін қолданылады. Физикалық өрістер $Y \rightarrow X$ түрдегі қабатталу арқылы қарастырылады да, байланыстылықтар мен ковариантты туындылар (∇) енгізіледі де $L: J^1 Y \rightarrow \wedge T^* X$ лагранжианы құрылады. Қабатардағы ішкі құрылымдық топтардың G симметриясы үшін негізгі P қабатта: $\pi_p: P \rightarrow X$ орындалады. Калибрлеуіш потенциалдарды $C = \frac{J^1 P}{G} \rightarrow X$ байланыстылықтар арқылы ұсынамыз:

$$A_\mu^m = (k_\mu^m \circ A)(x) \quad (3)$$

C -ға $C = C(x^\mu, k_\mu^m)$ координаталары сәйкес қойылады. Ал, $J^1 C$ координаталары $(x^\mu, k_\mu^m, k_{\mu\lambda}^m)$ болатын калибрлеуіш потенциалдардың конфигурациялық кеңістігін құрайды. Оның жіктелуі (ыдырауы) $J^1 C = C_+ \oplus C_-$ мұндағы

$$C_- = C \times T^* X \otimes \frac{VP}{G}$$

$$C_+ = T^* X \otimes \frac{VP}{G}$$

аффиндік қабатталулар [7; 8]. Келтірілген жіктелулердің кординаталары мынадай:

$$k_{\mu\lambda}^m = \frac{1}{2} (k_{\mu\lambda}^m + k_{\lambda\mu}^m + c_{nl}^m k_\lambda^n k_\mu^l) + \frac{1}{2} (k_{\mu\lambda}^m - k_{\lambda\mu}^m - c_{nl}^m k_\lambda^n k_\mu^l)$$

мұндағы c_{mn}^k – Ли алгебрасының құрылымдық тұрақтысы, бұл жерде g_r тобы G тобына қатысты базис құрайтындығы ескерілді. $J^1 C$ конфигурациялық кеңістігіндегі Янг–Миллстің еркін лагранжианы

$$L_{YM} = \frac{1}{4e^2} G_{a_{mn}} g^{\lambda\mu} g^{\beta\nu} F_{\lambda\beta}^m F_{\mu\nu}^n \sqrt{|g|} \omega \quad (4)$$

Мұндағы

$$F_{\lambda\mu}^m = k_{\mu\lambda}^m - k_{\lambda\mu}^m - c_{nl}^m k_\lambda^n k_\mu^l \quad (5)$$

Енді, электромагниттік өрісті X^4 көп бейнелікте қарастырайық. Бұл кезде ішкі G топтық симметриясы ретінде $U(1)$ тобы негізгі қабатталу рөлін атқаратын болады, яғни $\pi_p: P \rightarrow X^4$ [9]. Түйіндес қабаттылық $V^G P = X^4 \times R$. Аффиндік изоморфтық байланыстар арқылы жазсақ: $C \cong T^* X^4$. (5) бойынша электромагниттік өрістің кернеулігін анықтай аламыз:

$$F_{\mu\lambda} = F_{\mu\lambda} J^1 A = \partial_\lambda A_\mu - \partial_\mu A_\lambda$$

Метрикасы $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(1; -1; -1; -1)$ болсатын Минковский кеңістігі үшін ($X^4 = M^4$) (4)–тен еркін электромагниттік өрістің лагранжианын шығарып алу қиын емес:

$$L = -\frac{1}{16\pi c} \eta^{\lambda\mu} \eta^{\beta\nu} F_{\lambda\beta} F_{\mu\nu} \omega \quad (6)$$

Фазалық кеңістікте Лезандрлық қабаттылық $(X^\lambda, k_\mu, p^{\mu\lambda})$ координаталары арқылы орындалады:

$$\Pi = \left(\wedge^4 T^* X \otimes TX \otimes TX \right) \times_X C \quad (7)$$

Лезандрлық морфизммен қауымдастырылған лагранжианның өрнегін (6) мен (7) арқылы анықтап аламыз:

$$p^{(\mu\lambda)} \circ \hat{L} = 0$$

$$p^{(\mu\lambda)} \circ \hat{L} = -\frac{1}{4\pi c} \eta^{\lambda\alpha} \eta^{\mu\beta} F_{\alpha\beta}$$

Әрине, лагранждық формализмдегі көп импульстік гамильтонианның да алатын орны ерекше екендігін жоғарыда атап өттік, оның $\partial_\lambda r_\mu + \partial_\mu r^\lambda = \partial_\lambda A_\mu + \partial_\mu A_\lambda$ Гамильтон теңдеуіне сәйкес келетін қабатталған кеңістіктік геометриясындағы өрнегін мына түрде жазуға болады: $H = p^{\mu\lambda} dk_\mu \wedge \omega_\lambda - p^{\mu\lambda} S_{\mu\lambda} \omega$.

Ендігі жерде, қарастырылып жатқан үзіліссіз (үздіксіз) жүйеміздің энергия–импульс тензорының қасиеттеріне тоқталып өтуді жөн санап отырмыз [10]. 4–өлшемді кеңістіктегі $f(x_\mu)$ скалярлы функция координаталардың

мардымсыз a_μ шамаға ығысуына қатысты инвариантты екендігін ескеріп оның $\bar{\delta}f = f'(x'_\mu) - f(x'_\mu)$ – пішіндік және

$\bar{\delta} = f'(x'_\mu) - f(x_\mu)$ – аргументтің ығысуына сәйкес келетін вариациялар бойынша түрленуін жазуға болады:

$$\delta f(x_\mu) = f'(x'_\mu) - f(x_\mu) = \bar{\delta}f + \bar{\delta} = 0 \quad (8)$$

Сонымен бірге, скалярлы функция үшін

$$\bar{\delta} = f'(x_\mu + a_\mu) - f(x_\mu) \approx (\delta_\mu f) \delta a_\mu \quad (9)$$

теңдігі орындалады. (8) бен (9)–дан:

$$\bar{\delta}f(x_\mu) = -(\delta_\mu f) a_\mu \quad (10)$$

Үздіксіз жүйе лагранжианының $x'_\mu = x_\mu + a_\mu$ түрлендіруіне қатысты инварианттылығын мынадай теңдік түрінде көрсете аламыз [11]:

$$L'(\eta'(x'), \partial'_\mu \eta'(x')) = L(\eta(x), \partial_\mu \eta(x))$$

(10)–да $f(x)$ функциясының орнына L –ді қойып, $\bar{\delta}L$ вариацияны есептейміз:

$$\bar{\delta}L = \frac{\partial L}{\partial \eta(x)} \bar{\delta}\eta(x) + \frac{\partial L}{\partial(\partial_\mu \eta)} \partial_\mu (\bar{\delta}\eta) \quad (11)$$

Алайда

$$\frac{\partial L}{\partial \eta} = \partial_\mu \left[\frac{\partial L}{\partial(\partial_\mu \eta(x))} \right]$$

болғандықтан, (11)–ден төмендегі

$$\bar{\delta}L = \partial_\mu \left[\frac{\partial L}{\partial(\partial_\mu \eta(x))} \bar{\delta}\eta(x) \right]$$

өрнегін, ал (10)–нан мынадай қатынасты аламыз:

$$-\partial_\mu \left[\frac{\partial L}{\partial(\partial_\mu \eta(x))} (\partial_\nu \eta(x)) \delta a_\nu \right] = -(\partial_\mu L) a_\mu \quad (12)$$

Бұл өрнектерде $\bar{\delta}\eta(x) = -(\partial_\nu \eta) a_\nu$ теңдігі ескерілді, яғни $\eta(x)$ –ті (a_ν) векторына ауыстырған кезде ол өзгеріссіз қалатындығын қолдандық [12]. Осыған байланысты, (12)–ден:

$$\partial_\mu \left[\frac{\partial L}{\partial(\partial_\mu \eta)} (\partial_\nu \eta) - \delta_{\mu\nu} L \right] a_\nu = 0 \quad (13)$$

Егер, (a_ν) –дің құраушылары өзара тәуелсіз болса, онда (13)–тен:

$$\partial_\mu T_{\mu\nu} = 0 \quad (14)$$

Бұл теңдеудегі энергия–импульс тензоры $(T_{\mu\nu})$ мынадай қатынаспен анықталады:

$$T_{\mu\nu} = \frac{\partial L}{\partial(\partial_\mu \eta)} (\partial_\nu \eta) - \delta_{\mu\nu} L \quad (15)$$

Ал, (14) теңдеу $T_{\mu\nu}$ тензорға арналған үзіліссіздік теңдеуі деп аталады. Аталған тензордың құраушылары арқылы үздіксіз жүйенің энергиясы мен импульсін анықтай аламыз. T_{44} құраушыны жазайық:

$$T_{44} = \frac{\partial L}{\partial(\partial_t \eta)} (\partial_t \eta) - L$$

Үздіксіз жүйе үшін $\eta(x)$ – жалпылама координаталар, ал $\pi(x) = \frac{\partial L}{\partial(\partial_t \eta)}$ жалпылама импульс тығыздығы болса, онда $E = \pi(x)(\partial_t \eta) - L$ шамасы жүйенің энергия тығыздығы болып табылады. Ал, егер $\eta(x)$ – көп құраушылы функция болса, онда (15)–тен мынау шығады:

$$T_{\mu\nu} = \sum_n \frac{\partial L}{\partial(\partial_\mu \eta_n)} (\partial_\nu \eta_n) - \delta_{\mu\nu} L \quad (16)$$

Төрт өлшемді $P_\mu = \frac{i}{c} \int T_{4\mu} d^3x$ вектор енгіздік, оның

$$P_4 = \frac{i}{c} E = \frac{i}{c} \int [\pi(x)(\partial_t \eta) - L(x)] d^3x$$

құраушылары жүйенің 4 өлшемді импульсі болып табылса, ал оның үш өлшемді бөлігі

$$\bar{P} = - \int [\pi(x) \bar{\partial} \eta(x)] d^3 x$$

(16)–ға сәйкес, электромагниттік өрістің энергия–импульс тензорының мына түрде жазуға болады [13]:

$$T_{\mu\nu} = \frac{\partial L}{\partial (\partial_\mu A_\nu)} (\partial_\nu A_\mu) - \delta_{\mu\nu} L$$

Бұл өрнекке $L = -\frac{1}{4} (F_{\mu\nu})^2$ лагранжианды қойсақ, онда

$$T_{\mu\nu} = F_{\rho\mu} (\partial_\nu A_\rho) - \delta_{\mu\nu} L \quad (17)$$

Бұл тензор симметриялық емес, себебі өрістер теориясына сәйкес, векторлық өріс микробөлшектің күйін анықтап беруі тиіс. Ал, векторлық өрістің спиндік қасиеттерін қарастырған кезде симметриялық энергия–импульс тензоры қолданылады. Осы айтылған тұжырымдамалар мен жоғарыда келтірілген (14) шартқа сәйкес мынадай тензор енгізуге тура келеді: $T'_{\mu\nu} = T_{\mu\nu} + \partial_\sigma f_{[\mu\sigma]\nu}$, мұндағы $[\mu\sigma]$ – μ және σ индекстеріне қатысты антисимметриялы дегенді білдіретін белгі. Ол да (14)–ке сәйкес келеді: $\partial_\mu T'_{\mu\nu} = \partial_\mu T_{\mu\nu} + \partial_\mu \partial_\sigma f_{[\mu\sigma]\nu}$. Олай болса: $\partial_\mu T'_{\mu\nu} = \partial_\mu T_{\mu\nu} = 0$. $f_{[\mu\sigma]\nu}$ тензоры мынадай болсын: $f_{[\mu\sigma]\nu} = F_{\mu\sigma} A_\nu$. Бұл жағдайда

$$T'_{\mu\nu} = T_{\mu\nu}^{metr} = F_{\rho\mu} F_{\nu\rho} + \frac{1}{4} \delta_{\mu\nu} (F_{\rho\sigma})^2 \quad (18)$$

Бұл тензор метрикалық (metr) деп аталса, (17)–ші тензор каноникалық болып табылады. (18)–ден электромагниттік өрістің энергиясының тығыздығы $\omega = T_{\mu\nu}^{metr} = \frac{1}{2} (\vec{E}^2 + \vec{H}^2)$ және ол оң шама ($\omega \neq 0$), ал өрістің энергиясы мен импульсінің өрнектері сәйкесінше

$$W = \int \omega d^3 x = \frac{1}{2} \int (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) d^3 x$$

$$\bar{P} = \int [\vec{E} \vec{H}] d^3 x$$

Қорытынды

Калибрлеуіш көзқарас тұрғысындағы физикалық өрістерді геометриялық теория арқылы сипаттау физикалық өрістердің қабатталуы бойынша жүргізілді. Өрістердің релятивистік теориясындағы лагранжианның

қасиеттеріне және электромагниттік өріске қойылатын коварианттық шарттарға сүйене отырып үзіліссіз жүйенің энергия–импульс тензорының, электромагниттік өрістің импульстік бейнесін, көп импульстік формализм қағидаларын физика–техникалық маңызы бар модельдер шеңберінде қарастырып өттік. Лагранжианның Минковский мен фазалық кеңістіктердегі өрнектерінің коварианттық үлгілері лежандр морфизмі негізінде шығарылып алынды. Осылармен берге, өрістер теориясының коварианттық өрнектері конфигурациялық кеңістіктегі Янг–Мильстің лагранжианы мен Эйлер–Лагранж теңдеулерін пайдалану арқылы алынды. Барлық есептеулер дифференциалдық геометрия мен алгебралық топология талаптарына сай жүргізілді. Өрістік функцияларға арналған қозғалыс теңдеулері вариациялық принциптерді қолданатын үзіліссіз жүйелердің математикалық аппараты бойынша қарастырылды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Копьев, В. Ф., Чернышев, С. А.** Развитие методов лагранжевой и гамильтоновой механики применительно к задачам аэроакустики // Акустический журнал. – 2018. – № 6. – Т. 64. – С. 677–688.
- 2 **Барбаш, Б. М.** Гамильтонов формализм для лагранжевых систем с заданными связями // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2003. – № 1. – Т. 34. – С. 5–41.
- 3 **Gudimenko, A. I.** Covariant hydrodynamics of Hamiltonian systems // Far Easter Mathematical Journal. – 2021. – № 2. – V. 21. – P. 166–179.
- 4 **Павлов, В. П.** Дифференциально-геометрические аспекты неголономной механики Дирака // Теоретическая и математическая физика. – 2014. – № 3. – Т. 178. – С. 403–415. – <https://doi.org/10.4213/tmf8548>
- 5 **Лунев, Ф. А.** Трехмерные уравнения Янга–Миллса–Хиггса в калибровочно-инвариантных переменных // Теоретическая и математическая физика. – 1993. – № 1. – Т. 94. – С. 66–75. – <https://doi.org/10.1007/BF01016994>
- 6 **Гиббон, Д.** Кватернионный репер, эволюционные уравнения Лагранжа и трехмерные уравнения Эйлера // УМН. – 2007. – № 3(375). – Т. 62. – С. 47–72.
- 7 **Қоштыбаев, Т. Б., Алиева, М. Е., Жантлеуов, К. К., Тугелбаева, Г. Т.** Өрістердің тензорлық негіздемесі // Торайғыров университетінің хабаршысы, Физика, математика и компьютерлік ғылымдар сериясы, «Теориялық және эксперименттік физика» секциясы. – 2025. – № 3. – Б. 161–172. – <https://doi.org/10.48081/IFUY7040>

8 **Городенцев, А. Л., Тюрин, А. Н.** Абелева лагранжева алгебраическая геометрия // Известия РАН. Серия Математика. – 2001. – № 3. – Т. 65. – С. 15–50. – <https://doi.org/10.4213/im334>

9 **Некрасов, Н. А., Рослый, А. А., Шаташвили, С. Л.** Координаты Дарбу, функционал Янга–Янга и калибровочная теория // Теоретическая и математическая физика. – 2014. – № 1. – Т. 181. – С. 86–120. – <https://doi.org/10.4213/tmf8648>

10 **Тиморин, В. А.** Геометрия гамильтоновых систем и уравнений с частными производными. – М.: ВШЭ, 2017. – 350 с.

11 **Соколов, С. Н., Третьяк, В. И.** Фронтальная форма релятивистской лагранжевой динамики в двумерном пространстве–времени и ее связь с гамильтоновым описанием // Теоретическая и математическая физика. – 1986. – № 1. – Т. 67. – С. 102–114. – <https://doi.org/10.1007/BF01028892>

12 **Рочев, В. Е.** О многочастичных релятивистских уравнениях для фермионов // Теоретическая и математическая физика. – 1982. – № 1. – Т. 51. – С. 22–33. – <https://doi.org/10.1007/BF01029258>

13 **Коштыбаев, Т. Б., Татенов, А. М., Алиева, М. Е., Тугелбаева, Г. Т., Жаналиева, Г. Ж.** Электромагниттік өрісті термодинамикалық бастамалар тұрғысында зерттеу // Academic Journal of Physical and Chemical. – 2026. – № 1(357). – Б. 89–104. – <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.407>

REFERENCES

1 **Kopev, V. F., Chernyshev, S. A.** Razvitie metodov lagranzhevoi i gamiltonovoi mekhaniki primenitelno k zadacham aeroakustiki [Development of Lagrangian and Hamiltonian mechanics methods applied to aeroacoustics problems] // Akusticheskij zhurnal – Acoustic journal. – 2018. – 64(6). – P. 677–688.

2 **Barbash, B. M.** Gamiltonov system dlia lagranzhevykh system s zadannymi sviaziami [Hamiltonian formalism for Lagrangian systems with given constraints] // Fizika e'lementarny'x chasticz i atomnogo yadra – Physics of elementary particles and atomic nucleus. – 2003. – 34(1). – P. 5–41.

3 **Gudimenko, A. I.** Covariant hydrodynamics of Hamiltonian systems // Far Easter Mathematical Journal. – 2021. – № 2. – V. 21. – P. 166–179.

4 **Pavlov, V. P.** Differentsialno-geometricheskie aspekty negolonomnoi mekhaniki Diraka [Differential-Geometric Aspects of Dirac's Nonholonomic Mechanics] // Teoreticheskaja i matematicheskaja fizika – Theoretical and Mathematical Physics. – 2014. – 178(3). – P. 403–415. – <https://doi.org/10.4213/tmf8548>

5 **Lunev, F. A.** Trekhmernye uravneniia Ianga–Millsa–Khiggса v kalibrovочно-invariantnykh peremennykh [Three-dimensional Yang–Mills–Higgs equations in gauge-invariant variables] // Teoreticheskaja i matematicheskaja fizika – Theoretical and Mathematical Physics. – 1993. – 94(1). – P. 66–75. – <https://doi.org/10.1007/BF01016994>

6 **Gibbon, D.** Kvaternionnyi reper, evoliutsionnye uravneniia Lagranzha i trekhmernye uravneniia Eйлера [Quaternion frame, Lagrange evolutionary equations, and three-dimensional Euler equations] // Uspehi matematicheskix nauk – Achievements in mathematical sciences. – 2007. – 62(3). – P. 47–72.

7 **Koshtybaev, T. B., Alieva, M. E., Zhantleuov, K. K., Tugelbaeva, G. T.** Oristerdin tenzorlyk negizdemesi [Tensor Foundations of Fields] // Bulletin of the University of Toraighyrov Series: Physics, Mathematics & Computer Science. – 2025. – 3. – P. 161–172. – <https://doi.org/10.48081/IFUY7040>

8 **Gorodentsev, A. L., Tiurin, A. N.** Abeleva lagranzheva algebraicheskaja geometriia [Abelian Lagrangian algebraic geometry] // Izvestiya RAN. Seriya Matematika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mathematics Series. – 2001. – 65(3). – P. 15–50. – <https://doi.org/10.4213/im334>

9 **Nekrasov, N. A., Roslyi, A. A., Shatashvili, S. L.** Koordinaty Darbu, funktsional Ianga–Ianga i kalibrovочно-naia teoriia [Darbo coordinates, Yang–Yang functional, and calibration theory] // Teoreticheskaja i matematicheskaja fizika – Theoretical and Mathematical Physics. – 2014. – 181(1). – P. 86–120. – <https://doi.org/10.4213/tmf8648>

10 **Timorin, V. A.** Geometriia gamiltonovykh sistem i uravnenii s chastnymi proizvodnymi [Geometry of Hamiltonian Systems and Partial Differential Equations]. – М.: VShE, 2017. – 350 p.

11 **Sokolov, S. N., Tretiak, V. I.** Frontovaja forma relativistskoi lagranzhevoi dinamiki v dvumernom prostranstve–времени i ee sviaz s gamiltonovym opisaniem [Front form of relativistic Lagrangian dynamics in two-dimensional spacetime and its connection with the Hamiltonian description] // Teoreticheskaja i matematicheskaja fizika – Theoretical and Mathematical Physics. – 1986. – 67(1). – P. 102–114. – <https://doi.org/10.1007/BF01028892>

12 **Rochev, V. E.** O mnogochastichnykh relativistskikh uravneniakh dlia fermionov [On multiparticle relativistic equations for fermions] // Teoreticheskaja i matematicheskaja fizika – Theoretical and Mathematical Physics. – 1982. – 51(1). – P. 22–33. – <https://doi.org/10.1007/BF01029258>

13 **Koshtybaev, T. B., Tatenov, A. M., Alieva, M. E., Tugelbaeva, G. T., Zhanaliev, G. Zh.** Elektromagnittik oristi termodinamikalyk bastamalar turgysynda zertteu [Study of the electromagnetic field from the standpoint of thermodynamic initiatives] // Academic Journal of Physical and Chemical. – 2026. – 1(357). – P. 89–104. – <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.407>

19.04.26 ж. баспаға түсті.
04.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Т. Б. Коштыбаев¹, Ш. Алиев², *А. Т. Жавлиева³, М. Е. Алиева⁴*
^{1,3}Казахский национальный женский педагогический университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
²Кыргызский государственный университет имени И. Арабаева, Республика Кыргызстан, г. Бишкек;
⁴Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Республика Казахстан, г. Алматы.
Поступило в редакцию 19.04.26.
Поступило с исправлениями 04.05.26.
Принято в печать 03.06.26.

КОВАРИАНТНО–ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЛАГРАНЖЕВОМУ ФОРМАЛИЗМУ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Проблема описания полевых процессов в электродинамике в формализме Лагранжа, который учитывает постулаты специальной теории относительности, вариационные принципы аналитической механики и требования релятивистской теории, была продемонстрирована с помощью современного математического аппарата, таких как дифференциальная геометрия и алгебраическая топология (расслоенное пространство). Требования к лагранжиану в релятивистской теории полей, тензор энергии–импульса непрерывной системы, ковариантные условия (подходы) к электромагнитному полю, импульсное представление электромагнитного поля и принципы многоимпульсного формализма рассматривались в рамках специальных моделей физико–технического характера. Ковариантные формы выражений лагранжиана в пространстве Минковского и в фазовом пространстве были выведены на основе морфизма Лежандра.

Наряду с этим, ковариантные выражения теории полей были получены с использованием лагранжиана Янга–Миллса и уравнений Эйлера–Лагранжа в конфигурационном пространстве. Все расчеты проводились в соответствии с требованиями дифференциальной геометрии и алгебраической топологии. Уравнения движения для полевых функций рассматривались по математическому аппарату непрерывных систем, использующих вариационные принципы. Выражение свободного лагранжиана Янга–Миллса в его конфигурационном пространстве через структурную константу алгебры Ли и базисные структуры между группами было приведено к компактному виду. Выражения лагранжиана, ассоциированного с морфизмом Лежандра и многоимпульсного гамильтониана в лагранжевом формализме были записаны в ковариантном виде. Уравнения движения для полевых функций рассматривались на основе математического аппарата непрерывных систем с использованием вариационных принципов и алгебраического уравнения Эйлера–Лагранжа.

Ключевые слова: формализм Лагранжа, электромагнитное поле, лагранжиан, расслоенное пространство, электродинамика, дифференциальная геометрия, полевая функция.

*Т. В. Koshtybayev¹, Sh. Aliev², *A. T. Zhavliyeva³, M. E. Aliyeva⁴*
^{1,3}Kazakh National Women's Pedagogical University, Republic of Kazakhstan, Almaty;
²Kyrgyz State University named after I. Arabaev, Republic of Kyrgyzstan, Bishkek;
⁴Abai Kazakh National Pedagogical University, Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 19.04.26.
Received in revised form 04.05.26.
Accepted for publication 03.06.26.

COVARIANT – GEOMETRIC APPROACH TO THE LAGRANGIAN FORMALISM OF FIELD THEORY

The problem of describing field processes in electrodynamics within the Lagrangian formalism, which takes into account the postulates of special relativity, the variational principles of analytical mechanics, and the requirements of relativistic theory, was demonstrated using modern mathematical apparatus such as differential geometry and algebraic

topology (fiber bundle space). The requirements for the Lagrangian in relativistic field theory, the energy–momentum tensor of a continuous system, covariant conditions (approaches) to the electromagnetic field, the momentum representation of the electromagnetic field, and the principles of the multiphase (polymomentum) formalism were considered within the framework of specific physical and technical models. Covariant forms of the Lagrangian expressions in Minkowski space and in phase space were derived based on the Legendre morphism. Along with this, covariant expressions of field theory were obtained using the Yang–Mills Lagrangian and the Euler–Lagrange equations in configuration space. All calculations were carried out in accordance with the requirements of differential geometry and algebraic topology. The equations of motion for field functions were considered using the mathematical apparatus of continuous systems employing variational principles. The expression of the free Yang–Mills Lagrangian in its configuration space through the Lie algebra structure constant and the basis structures between the groups was reduced to a compact form. The expressions of the Lagrangian associated with the Legendre morphism and the multi-momentum Hamiltonian in the Lagrangian formalism were written in a covariant form. The equations of motion for the field functions were considered using the mathematical apparatus of continuous systems and the variational principles and the algebraic Euler–Lagrange equation.

Keywords: Lagrangian formalism, electromagnetic field, Lagrangian, fiber bundle space, electrodynamics, differential geometry, field function.

FTAMP 29.19.17

DOI

***С. Опахай¹, К. Ж. Бекмырза², С. Сырлыбекқызы³,
А. И. Койшина⁴, Е. Пангалиев⁵**

^{1,2}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

^{3,4,5}Ш. Есенов атындағы Каспий технология және инжиниринг университеті,
Қазақстан Республикасы, Ақтау қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6789-4844>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8902-8736>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0260-0611>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5537-9474>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2392-4180>

*e-mail: serikzhan.opakhai07@gmail.com

ПЛАТИНА КАТАЛИЗАТОРЛАРЫ НЕГІЗІНДЕ МЕМБРАНАЛЫҚ-ЭЛЕКТРОДТЫҚ БЛОКТЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл жұмыста «Сутекті отын процессоры» зертханалық қондырғысы негізіндегі эксперименттік стендте сутекті отын элементінің мембраналық-электродтық блогының электрохимиялық сипаттамаларын эксперименттік зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеу нысаны ретінде протонөткізгіш Nafion мембранасы және газодиффузиялық қабаты бар Raхitech (Франция) фирмасының бес қабатты S5-5Lsg мембраналық-электродтық блогы қолданылды. Жұмыста көміртекті тасымалдағышта орналасқан Pt-Ru/C, Pt-Mo/C, Pt-Ni/C және Pt-Sn/C биметалдық платина катализаторларының жүйелері зерттелді. Поляризациялық және қуат сипаттамалары өшініп, электрохимиялық импеданстық спектроскопия әдістерімен талдау жүргізілді. Нәтижелер зерттелген мембраналық-электродтық блок үшін бос жүріс кернеуі 0.97 В, ал максималды қуат тығыздығы 1.0 А·см² ток тығыздығында 0.78 Вт·см² болатынын көрсетті. Ең жоғары электрохимиялық көрсеткіштер Pt-Ni/C катализаторы үшін байқалды. Температураны 60–80°С дейін көтеру максималды қуат тығыздығының шамамен 12–15 % осуіне әкелетіні анықталды. Алынған нәтижелер PEM типті сутекті отын элементтерінің тиімділігін арттыруда биметалдық платина

катализаторларын қолданудың тиімді екенін көрсетеді. Сонымен қатар, импеданстық спектрлерді талдау нәтижесінде жүйедегі омдық және поляризациялық кедергілердің температураға тәуелділігі анықталды, бұл электрохимиялық процестердің кинетикасын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Биметалдық катализаторлардың синергетикалық әсері оттегіні қалтына келтіру реакциясының жылдамдығын арттырып, жалпы жүйенің энергетикалық тиімділігін жоғарылататыны көрсетілді. Зерттеу нәтижелері отын элементтерінің жұмыс тұрақтылығын арттыру, катализатор құрамын оңтайландыру және төмен температуралы режимде жоғары тиімділікке қол жеткізу бағытында маңызды ғылыми және практикалық негіз қалыптастырады. Ұсынылған тәсілдер портативті және стационарлық энергетикалық құрылғылар үшін тиімді болып табылады, сондай-ақ сутекті энергетиканың дамуына елеулі үлес қосады.

Кілтті сөздер: сутекті отын элементі, мембраналық-электродтық блок, Nafion, поляризациялық қисық, импеданстық спектроскопия, қуат тығыздығы.

Кіріспе

Қазіргі уақытта сутегі энергетикасын дамыту энергияны түрлендірудің экологиялық қауіпсіз және энергиялық тиімді жүйелерді құрудың ең тиімді бағыттарының бірі ретінде қарастырылады [1]. Өртүрлі электрохимиялық энергия түрлендіргіштерінің ішінде протоналмасу мембраналы отын элементтері (РЕМ) ерекше қызығушылық тудырады. Олар сутегінің химиялық энергиясын тікелей электр энергиясына жоғары пайдалы әсер коэффициентімен, төмен шығарындылар деңгейімен және салыстырмалы түрде тиімді пайдалану шарттарымен түрлендіруге мүмкіндік береді [2; 3].

РЕМ типті отын элементінің негізгі құрамдас бөлігі мембраналық-электродтық блок (МЭБ) болып табылады. Ол бүкіл жүйенің негізгі электрохимиялық, тасымалдаушылық және энергетикалық сипаттамаларын анықтайды. МЭБ тиімділігі мембрананың табиғатына, газодиффузиялық қабаттардың қалыңдығы мен кеуекті құрылымына, қабаттар арасындағы электрлік және механикалық байланыс сапасына, сондай-ақ анод пен катод материалдарының каталитикалық белсенділігіне тәуелді. Әсіресе анодтағы сутегінің тотығу реакциясы мен катодтағы оттегінің тотықсыздану реакциясының тиімді жүруін қамтамасыз ететін жоғары белсенді әрі тұрақты катализаторды таңдау маңызды мәселе болып табылады [4; 5; 6; 7].

Қазіргі РЕМ жүйелерінде платина негізгі каталитикалық компонент ретінде қолданылады [8]. Дегенмен каталитикалық белсенділікті арттыру,

тұрақтылықты жақсарту және қымбат металдың шығынын азайту мақсатында биметалдық катализаторлар кеңінен қолданылады [9]. Мұндай жүйелерде екінші металл Pt-ның электрондық құрылымын өзгертіп, аралық бөлшектердің адсорбция энергиясына әсер етеді және соның нәтижесінде электрохимиялық процестердің кинетикасын жақсартады. Осы тұрғыдан алғанда Pt-Ru/C, Pt-Mo/C, Pt-Ni/C және Pt-Sn/C катализаторлары іргелі және қолданбалы зерттеулер үшін ерекше қызығушылық тудырады [10].

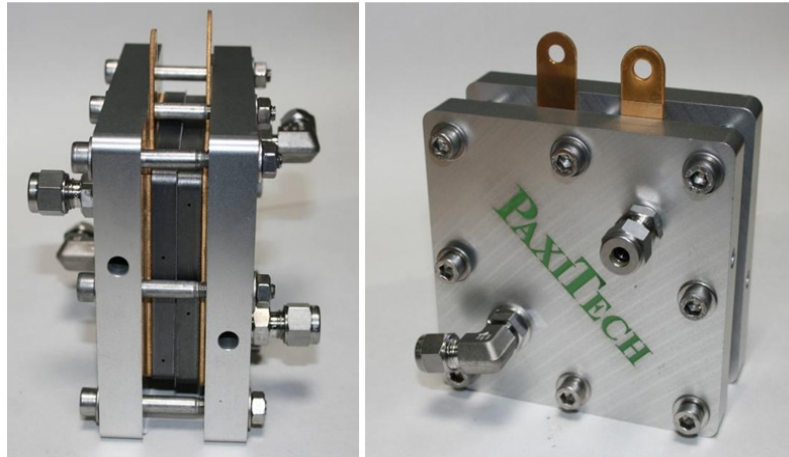
Осы жұмыстың мақсаты – «Сутекті отын процессоры» зертханалық қондырғысы негізіндегі эксперименттік стендте сутекті отын элементінің МЭБ эксперименттік зерттеу және әртүрлі биметалдық катализаторлардың жүйенің поляризациялық, қуаттық және импеданстық сипаттамаларына әсерін бағалау болып табылады.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу нысаны

Зерттеу нысаны ретінде Paxitech (Франция) фирмасының S5-5Lsg МЭБ пайдаланылды (1-сурет). Зерттелген МЭБ протонөткізгіш мембранасы және нығыздалған газодиффузиялық қабаты бар бес қабатты құрылымнан тұрады. Мұндай құрылым функционалдық элементтер арасындағы тұрақты байланыс қалыптастырып, байланысу кедергісінің төмендеуіне ықпал етеді. МЭБ құрамына анодтың газодиффузиялық қабаты, анодтық каталитикалық қабат, протоналмасу мембранасы, катодтық каталитикалық қабат және катодтың газодиффузиялық қабаты кіреді. Мембрана ретінде отын элементі жұмыс жағдайларында жоғары протонөткізгіштігімен және химиялық тұрақтылығымен ерекшеленетін Nafion материалы қолданылды. Мембрананың қалыңдығы 50 мкм, мембрананың жалпы ауданы — 25 см², ал белсенді қабаттың ауданы — 5 см² құрады. Мембрананың екі жағындағы платинаның жүктемесі 0.5 мг/см² болды.

Каталитикалық жүйелер ретінде көміртекті тасымалдағыштағы келесі материалдар зерттелді: Pt-Ru/C, Pt-Mo/C, Pt-Ni/C және Pt-Sn/C. Тасымалдағыш ретінде қолданылған күйе жоғары меншікті бет ауданына, жақсы электрөткізгіштікке ие және сутегі мен оттегінің тасымалдануына, сондай-ақ судың шығарылуына қолайлы кеуекті құрылым қалыптастырады.

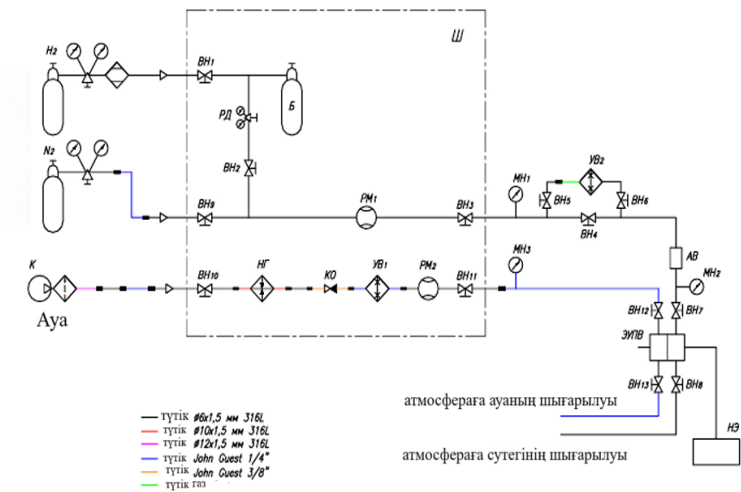


1-сурет – Paxitech ұяшығының сыртқы көрінісі

Сутекті отын процессорының зертханалық қондырғысының стенді

Сынақтар сутекті отын процессорының зертханалық қондырғысында жүргізілді. Қондырғы стенді сутегін беру баллонынан, қысым редукторынан, газ шығынын реттеу жүйесінен, сутегі мен ауаны ылғалдандыру құрылғыларынан, МЭБ бар электрохимиялық ұяшықтан, салқындату және температураны бақылау жүйесінен, электрондық жүктемеден және электрлік параметрлерді тіркеу жүйесінен тұрады.

Сутегі анодтық бөлікке шығын реттегіш және ылғалдандыру жүйесі арқылы берілді. Ауа немесе оттегі бар газ қоспасы катодтық бөлікке жеткізілді. Ұяшық температурасы термостатталатын қыздыру жүйесі арқылы берілген диапазонда ұсталып, термопаралар көмегімен бақыланды. Отын элементінде түзілген электр энергиясы электрондық жүктемеге берілді, бұл әртүрлі жұмыс режимдерінде вольт-амперлік және қуат сипаттамаларын алуға мүмкіндік берді. Сутекті отын процессорының зертханалық қондырғысы стендінің сызбасы 2-суретте көрсетілген.



2-сурет – Сутекті отын процессорының зертханалық қондырғысы стендінің сызбасы

1-кесте – Сутекті отын процессорының зертханалық қондырғысы стендінің сипаттамалары

Белгілеулері	Атауы	Саны	Ескерту
AB	МАРК-501 сутегі анализаторы	1	
Б	Металлопластикалық цилиндр ВК-4-21.6-02	1	
ВН1, ВН2, ВН4...ВН6	Шар клапаны BV-H-6M-S316	7	Hy-Lok Corporation
ВН3, ВН7, ВН10, ВН11	Ине клапаны NV2-H-6M-S316	4	Hy-Lok Corporation
ВН12, ВН13	1/4 дюймдік түтікке арналған жабылатын шар клапаны	2	John Guest
К	Компрессорлық тандем АВТ 500/1700	1	
КО	3/8 дюймдік түтікке арналған клапан	1	John Guest
МН1...МН3	Манометр	3	
НГ	Жарылысқа төзімді газ және ауа жылытқышы KIP VNU-100B1(RT).KI	1	

НЭ	Электронды бағдарламаланатын жүктеме «Aktakom» AEL-8036	1	
РД	Қысым реттегіші RP1DPF-10-F4N-F4N-H2	1	
PM1	Ротаметр PH-A-0.035 ГУЗ	1	
PM2	Ротаметр PH-A-0.25 ГУЗ	1	
УВ1	Көпіршікті ылғалдандырғыш	1	
УВ2	«ХУ-98ВII Armed» газ ылғалдандырғышы	1	
Ш	19 дюймдік телекоммуникациялық шкаф	1	
ЭУПВ	Сутегін электрохимиялық өндеу құрылғысы	1	

Электрохимиялық сынақ әдістемесі

Өлшеулер басталғанға дейін МЭБ реагенттердің тұрақты берілуі мен берілген температура жағдайында жұмыс режиміне келтірілді. Одан кейін жүктеме біртіндеп өзгертіліп, кернеу мен ток күші тіркелді және қуат тығыздығы есептелді. Поляризациялық қисықтар кернеудің ток тығыздығына тәуелділігі ретінде, ал қуат қисықтары меншікті қуаттың ток тығыздығына тәуелділігі ретінде тұрғызылды. Электрохимиялық импеданстық спектроскопия 10^{-2} – 10^5 Гц жиілік диапазонында жүргізілді.

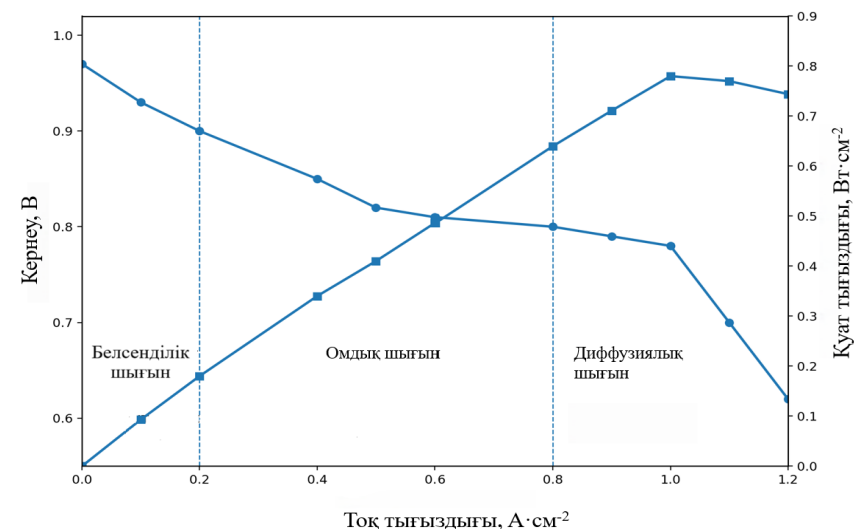
Нәтижелер және талқылау

МЭБ поляризациялық және қуаттық сипаттамалары

Алынған эксперименттік нәтижелер сутекті отын элементіне тән поляризациялық қисықтың классикалық түрін көрсетеді. Зерттелген МЭБ бос жүріс кернеуі 0.97 В құрады, бұл мембрананың жоғары сапасын, газдардың ету деңгейін және зерттеліп отырған ұяшықтың тығыздығының жоғары екенін көрсетеді. Ток тығыздығының төмен аймағында, шамамен $0.2 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ дейін, кернеудің айтарлықтай төмендеуі байқалады. Бұл аймақ негізінен электрохимиялық реакциялардың кинетикалық шектеулерімен байланысты белсенділік шығындармен, әсіресе катодтағы оттегіні тотықсыздандыру реакциясымен түсіндіріледі. Сутегінің тотығу реакциясы платиналы катализаторда салыстырмалы түрде жылдам жүретініне қарамастан, бастапқы аймақтағы артық кернеудің негізгі үлесін дәл осы катодтық процесс анықтайды.

Ток тығыздығы 0.2 – $0.8 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ аралығына дейін артқан кезде кернеудің төмендеуі дерлік сызықтық сипатқа ие болады. Бұл аймақ негізінен омдық шығындармен анықталады, олар Nafion протоналмасу мембранасының кедергісімен, қабаттар арасындағы байланысты өтулермен, сондай-ақ

электр тізбегінің өткізгіш элементтеріне тәуелді болады. Зерттелген МЭБ үшін $0.5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ток тығыздығында жұмыс кернеуі шамамен 0.82 В болды, бұл белсенді ауданы 5 cm^2 болатын зертханалық PEM ұяшық үшін жақсы электрохимиялық тиімділік деңгейін көрсетеді. Жоғары ток тығыздықтары аймағында ($0.9 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ жоғары) кернеудің күрт төмендеуі байқалады, бұл диффузиялық шектеулермен байланысты. Мұндай жүктемелер кезінде катодтық каталитикалық қабатта оттегінің тұтынылуы артады, нәтижесінде реагенттердің белсенді орталықтарға жеткізілу тиімділігі жалпы электрохимиялық процестің жылдамдығын шектей бастайды. Сонымен қатар, катодта түзілетін суды шығару мәселесінің маңызы артады, өйткені оның кеуекті құрылымда жиналуы оттегінің тасымалын қосымша қиындатуы мүмкін. Максималды қуат тығыздығы шамамен $1.0 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ток тығыздығында қол жеткізіліп, $0.78 \text{ Вт} \cdot \text{cm}^{-2}$ құрады. Бұл мән ұқсас белсенді ауданы бар заманауи зертханалық PEM отын элементтерінің көрсеткіштерімен сәйкес келеді және МЭБ жоғары сапасын, сондай-ақ таңдалған сынақ шарттарының дұрыстығын растайды (3-сурет).

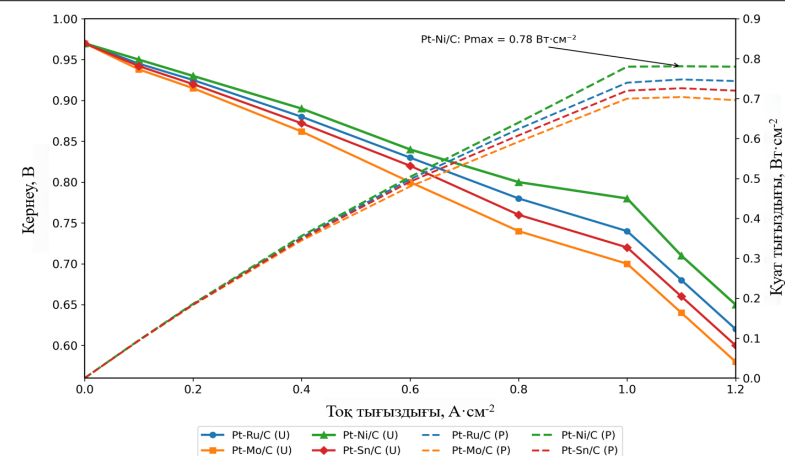


3-сурет – Сутекті отын элементінің МЭБ поляризациялық және қуат сипаттамалары

Катализатор құрамының электрохимиялық сипаттамаларға әсері
Өртүрлі биметалдық катализаторлар негізінде дайындалған МЭБ салыстырмалы талдау каталитикалық қабаттың құрамы, поляризациялық

қисықтың пішініне және максималды қуат тығыздығының мәніне айқын әсер ететінін көрсетті. Зерттелген материалдардың ішінде ең жоғары көрсеткіштерді Pt-Ni/C жүйесі көрсетті. Бұл катализатор үшін кернеу мәндері ток тығыздығының кең диапазонында жоғары деңгейде сақталды, ал максималды қуат тығыздығы $0.78 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ мәніне жетті. Pt-Ni/C жүйесінің жоғары тиімділігі никельді енгізу нәтижесінде платинаның электрондық құрылымының өзгеруімен байланысты болады. Мұндай қоспалау кристалдық тор параметрлерінің өзгеруіне, Pt атомдары маңындағы электрондық тығыздықтың қайта бөлінуіне және оттекті қалпына келтіру реакциясына қатысатын аралық бөлшектердің байланысу энергиясының оңтайлануына әкеледі. Нәтижесінде белсенді тосқауылдар төмендеп, катодтық процестің кинетикасы жеделдейді.

Pt-Ru/C катализаторы да жоғары нәтижелер көрсетіп, қуат бойынша екінші орынды иеленді. Рутенийдің болуы платинаның беткі қасиеттерін модификациялауға ықпал етеді және каталитикалық қабаттың тұрақтылығын арттырады. Алайда берілген зерттеу жағдайында Pt-Ru/C жүйесі Pt-Ni/C қарағанда төмен нәтиже көрсетті, бұл осы МЭБ конфигурациясында оның тиімділігі аздау екенін көрсетеді. Pt-Sn/C жүйесі аралық мәндерді көрсетті. Sn қосу катализатордың кейбір құрылымдық және тұрақтылық сипаттамаларын жақсартуы мүмкін, алайда жедел қуат деңгейі бойынша бұл материал Pt-Ni/C және Pt-Ru/C жүйелерінен төмен. Зерттелген жүйелерде ең төмен меншікті қуат мәндері Pt-Mo/C катализаторы үшін тіркелді. Бұл молибденнің осы электрохимиялық жүйеде оң әсерінің әлсіздігін немесе массалық тасымал шектеулеріне жоғары сезімталдығын көрсетуі мүмкін. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер Pt негізіндегі катализаторды биметалдық модификациялау PEM отын элементтердің сипаттамаларын оңтайландырудың тиімді тәсілі екенін көрсетеді. Зерттелген жүйелер ішінде ең тиімдісі болып Pt-Ni/C анықталды (4-сурет).



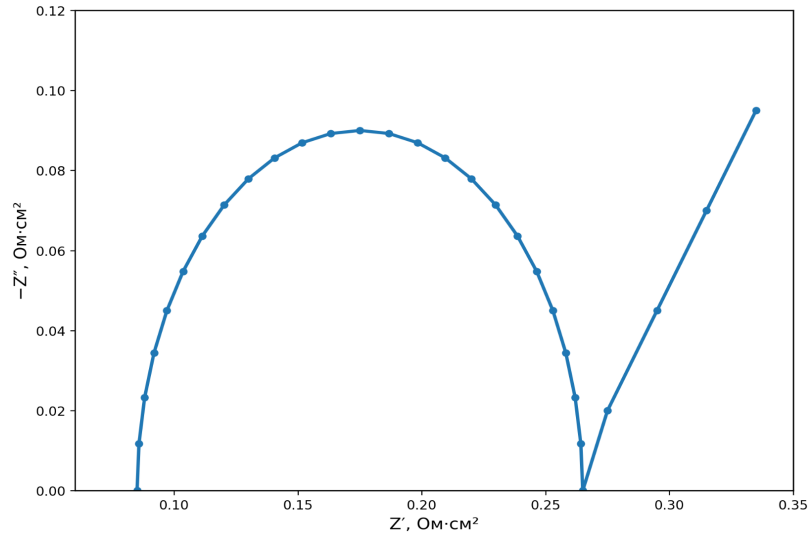
4-сурет – Pt-Ru/C, Pt-Mo/C, Pt-Ni/C және Pt-Sn/C биметалдық катализаторлары бар МЭБ салыстырмалы поляризациялық қисықтары мен қуат тығыздығының тәуелділіктері

Импеданстық талдау

Отын элементінің ішкі кедергілерін талдау мақсатында 10^{-2} – 10^5 Гц жиілік диапазонында электрохимиялық импеданстық спектроскопия жүргізілді. Алынған импеданс спектрі Найквист диаграммасында жарты шеңбер түрінде көрінеді және төмен жиілік аймағында импеданстың артуымен сипатталады. Импеданстың нақты бөлігінің осімен жоғары жиіліктегі қиылысуы жүйенің омдық кедергісіне сәйкес келеді, оның мәні $0.085 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ болды. Бұл кедергі мембрананың, ток жинағыш элементтердің, байланысты өтулердің және ұяшықтың басқа да өткізгіш бөліктерінің жиынтық үлесін сипаттайды. Алынған мән қабаттар арасындағы электрлік байланыстың жоғары деңгейде екенін және зерттелген жағдайларда Nafion мембранасының протондық өткізгіштігінің жеткілікті екенін көрсетеді. Орташа жиіліктер аймағындағы жарты шеңбер негізінен электродтардағы заряд тасымалдау процестерімен байланысты. Бұл аймақтағы негізгі үлесті катодтағы оттегіні қалпына келтіру реакциясы қосады, себебі оның кинетикасы анодтағы сутектің тотығу реакциясымен салыстырғанда баяу жүреді. Сондықтан жарты шеңбердің өлшемі катализатор тиімділігінің және «газ–электролит–электрод» үшфазалық шекарасының қалыптасу сапасының көрсеткіші ретінде қарастырылады.

Төмен жиілік аймағында импеданстың өсуі диффузиялық процестермен байланысты. Бұл ұзақ босансу уақыттарында реагенттердің тасымалдануы мен реакция өнімдерінің шығарылуы қосымша шектеуші факторларға

айналатынын көрсетеді. PEM жүйелері үшін мұндай сипаттамалар әсіресе жоғары ток тығыздықтарында айқын байқалады, өйткені катодтық реакция қарқындылығы артады, ал кеуекті құрылымда судың жиналуы оттегінің диффузиясына кедергі келтіруі мүмкін. Жалпы алғанда, алынған кедергі мәндері қазіргі заманғы зертханалық PEM отын элементтер деңгейіне сәйкес келеді және зерттелген жүйенің кинетикалық және массалық тасымал сипаттамаларының қанағаттанарлық екенін дәлелдейді (5-сурет).

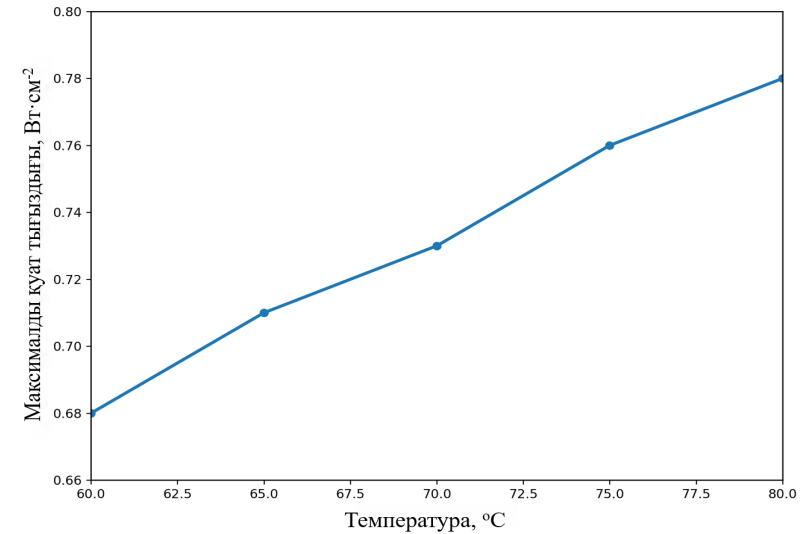


5-сурет – Электрохимиялық импеданстық спектроскопия әдісімен алынған сутекті отын элементінің МЭБ Найквист диаграммасы

Температураның шығу қуатына әсері

Эксперименттік зерттеулер көрсеткендей, отын элементінің температурасының жоғарылауы жүйенің шығу қуатының артуымен қатар жүреді. Температураны 60-тан 80 °C-қа дейін арттырғанда максималды қуат тығыздығы шамамен 12–15 %-ға өседі. Бұл әсер бірнеше өзара байланысты факторлармен түсіндіріледі. Біріншіден, температураның жоғарылауымен Nafion мембранасының протондық өткізгіштігі артады, бұл омдық кедергінің төмендеуіне және поляризациялық қисықтың орта аймағында кернеудің төмендеуін азайтуға әкеледі. Екіншіден, электрохимиялық реакциялардың кинетикасы жеделдейді, әсіресе оттегіні қалпына келтіру реакциясы, нәтижесінде белсенді шығындар азаяды. Үшіншіден, электродтардың кеуекті құрылымында реагенттердің диффузиясы жақсарайды, сондай-ақ судың

тасымалдануы тиімдірек жүреді, бұл катод жұмысына оң әсер етуі мүмкін. Сонымен қатар, температураны одан әрі арттыру мембрананың ұзақ мерзімді тұрақтылығының төмендеуіне, оның механикалық беріктігінің әлсіреуіне және ылғалдандыру режимінің бұзылуына әкелуі мүмкін. Сондықтан 80°C-қа дейінгі диапазон зерттелген жүйе үшін практикалық тұрғыдан тиімді деп есептеледі, өйткені ол қуаттың айтарлықтай артуын қамтамасыз етеді және айқын термиялық деградация қаупін туындатпайды (6-сурет).



6-сурет – Сутекті отын элементінің МЭБ максималды қуат тығыздығына температураның әсері

Қаржыландыру туралы ақпарат

Мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары білім министрлігі, Ғылым комитетінің жобаларды бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру шеңберінде жазылды (грант № BR24992964).

Қорытынды

Сутекті отын элементінің S5-5Lsg типті МЭБ сутекті отын процессорының зертханалық қондырғысында эксперименттік тұрғыда зерттелді. Зерттелген жүйе белсенділік, омдық және диффузиялық шығындар аймақтары айқын көрінетін поляризациялық қисықтың типтік сипаттамасын көрсететіні анықталды. Бос жүріс кернеуі 0.97 В болды, ал максималды қуат тығыздығы ток тығыздығы шамамен 1.0 A·см⁻² кезінде 0.78Вт·см⁻² мәніне жетті. Биметалдық катализаторларды салыстырмалы

талдау нәтижесінде ең жоғары электрохимиялық сипаттамаларды Pt-Ni/C жүйесі қамтамасыз ететіні анықталды. Бұл жүйе кернеу мен меншікті қуат деңгейі бойынша Pt-Ru/C, Pt-Sn/C және Pt-Mo/C катализаторларынан жоғары нәтиже көрсетті. Импеданстық спектроскопия нәтижелері жүйенің омдық кедергісі $0.085 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ екенін растады, ал негізгі шектеуші факторлар ретінде электродтардағы заряд тасымалдау процестері және төмен жиіліктер аймағындағы диффузиялық шектеулер анықталды. Температураны 60-тан 80°C -қа дейін арттыру максималды қуат тығыздығының шамамен 12–15% өсуіне әкеледі. Бұл мембрананың протондық өткізгіштігінің артуымен, электрохимиялық реакциялар кинетикасының жеделдеуімен және реагенттердің тасымалдануының жақсаруымен байланысты. Алынған нәтижелер PEM отын элементтерде биметалдық платина катализаторларын қолданудың тиімді екенін дәлелдейді және каталитикалық қабаттардың құрамын, МЭБ құрылымдық параметрлері мен сутекті энергетикалық жүйелердің жұмыс режимдерін әрі қарай оңтайландыруда қолданылады.

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Le, P. A., Trung, V. D., Nguyen, P. L., Phung, T. V. B., Natsuki, J., Natsuki, T. The current status of hydrogen energy: an overview // RSC Advances. – 2023. – Vol. 13. – № 40. – P. 28262–28287. – <https://doi.org/10.1039/D3RA05158G>
- 2 Le, T. T., Sharma, P., Bora, B. J., Tran, V. D., Truong, T. H., Le, H. C., Nguyen, P. Q. P. Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 54. – P. 791–816. – <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.044>
- 3 Sadeq, A. M., Homod, R. Z., Hussein, A. K., Togun, H., Mahmoodi, A., Isleem, H. F., Moghaddam, A. H. Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects // Science of The Total Environment. – 2024. – Vol. 939. – P. 173622. – <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173622>
- 4 Mo, S., Du, L., Huang, Z., Chen, J., Zhou, Y., Wu, P., Ye, S. Recent advances on PEM fuel cells: from key materials to membrane electrode assembly // Electrochemical Energy Reviews. – 2023. – Vol. 6. – № 1. – P. 28. – <https://doi.org/10.1007/s41918-023-00190-w>
- 5 Tawalbeh, M., Alarab, S., Al-Othman, A., Javed, R. M. N. The operating parameters, structural composition, and fuel sustainability aspects of PEM fuel cells: a mini review // Fuels. – 2022. – Vol. 3. – № 3. – P. 449–474. – <https://doi.org/10.3390/fuels3030028>

- 6 Tang, X., Yang, M., Shi, L., Hou, Z., Xu, S., Sun, C. Adaptive state-of-health temperature sensitivity characteristics for durability improvement of PEM fuel cells // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 491. – P. 151951. – <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2024.151951>
- 7 Athanasaki, G., Jayakumar, A., Kannan, A. M. Gas diffusion layers for PEM fuel cells: Materials, properties and manufacturing—A review // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, No. 6. – P. 2294–2313. – <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.058>
- 8 Xu, W., Zhang, D., Wang, T., Lai, J., Wang, L. Non-platinum-based electrocatalysts for high performance acidic hydrogen evolution reactions in proton exchange membrane water electrolysis // Applied Catalysis B: Environment and Energy. – 2025. – Vol. 361. – P. 124626. – <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.124626>
- 9 Ortiz-Herrera, J. C., Cruz-Martínez, H., Solorza-Feria, O., Medina, D. I. Recent progress in carbon nanotubes support materials for Pt-based cathode catalysts in PEM fuel cells // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Vol. 47. – № 70. – P. 30213–30224. – <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.218>
- 10 Yuan, C., Zhang, S., Zhang, J. Oxygen reduction electrocatalysis: From conventional to single-atomic platinum-based catalysts for proton exchange membrane fuel cells // Frontiers in Energy. – 2024. – Vol. 18. – № 2. – P. 206–222. – <https://doi.org/10.1007/s11708-023-0907-3>

02.04.26 ж. баспаға түсті.

21.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*С. Опахай¹, К. Ж. Бекмырза², С. Сырлыбекқызы³,
А. И. Койшина⁴, Е. Пангалиев⁵

^{1,2}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Республика Казахстан, г. Астана;

^{3,4,5}Каспийский университет технологии и инжиниринга имени Ш. Есенова,
Республика Казахстан, Республика Казахстан, г. Актау.

Поступило в редакцию 02.04.26.

Поступило с исправлениями 21.04.26.

Принято в печать 03.06.26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНОГО БЛОКА НА ОСНОВЕ ПЛАТИНОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований электрохимических характеристик мембранно-электродного блока водородного топливного элемента на экспериментальном стенде, созданном на базе лабораторной установки «Переработчик водородного топлива». В качестве объекта исследования использовался пятислойный мембранно-электродный блок S5-5Lsg производства Paxitech (Франция) с протонпроводящей мембраной Nafion и газодиффузионным слоем. В работе изучались системы биметаллических платиновых катализаторов Pt-Ru/C, Pt-Mo/C, Pt-Ni/C и Pt-Sn/C, расположенных на углеродной подложке. Поляризационные и энергетические характеристики измерялись и анализировались методами электрохимической импедансной спектроскопии. Результаты показали, что напряжение холостого хода для исследуемого мембранно-электродного блока составило 0,97 В, а максимальная плотность мощности — 0,78 Вт·см⁻² при плотности тока 1,0 А·см⁻². Наиболее высокие электрохимические показатели наблюдались для катализатора Pt-Ni/C. Было установлено, что повышение температуры до 60–80 °С приводит к увеличению максимальной плотности мощности примерно на 12–15 %. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования биметаллических платиновых катализаторов для повышения эффективности водородных топливных элементов PEM-типа. Кроме того, анализ импедансных спектров выявил температурную зависимость омического и поляризационного сопротивлений в системе, что позволяет глубже понять кинетику электрохимических процессов. Было показано, что синергетический эффект биметаллических катализаторов увеличивает скорость реакции восстановления кислорода и повышает энергетическую эффективность всей системы. Результаты исследования формируют важную научно-практическую основу для повышения эксплуатационной стабильности топливных элементов, оптимизации состава катализатора и достижения высокой эффективности в низкотемпературных условиях. Предложенные подходы эффективны для портативных и стационарных энергетических устройств, а также вносят существенный вклад в развитие водородной энергетики.

Ключевые слова: водородный топливный элемент, мембранно-электродный блок, Nafion, поляризационная кривая, импедансная спектроскопия, плотность мощности.

*S. Opakhai¹, K. Zh. Bekmyrza², S. Syrlybekkyzy³,

A. I. Koishina⁴, E. Pangaliev⁵

^{1,2}L. N. Gumilyov Eurasian National University,

Republic of Kazakhstan, Astana;

^{3,4,5}Caspian University of Technology and Engineering named after. Sh. Yesenova, Republic of Kazakhstan, Republic of Kazakhstan, Aktau.

Received 02.04.26.

Received in revised form 21.04.26.

Accepted for publication 03.06.26.

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF A MEMBRANE-ELECTRODE ASSEMBLY BASED ON PLATINUM CATALYSTS

This paper presents the results of experimental studies of the electrochemical characteristics of a hydrogen fuel cell membrane-electrode assembly (MEA) using a test rig built on the laboratory-scale Hydrogen Fuel Processor. The study utilized a five-layer S5-5Lsg MEA (Paxitech, France) with a Nafion proton-conducting membrane and a gas diffusion layer. The bimetallic platinum catalyst systems (Pt-Ru/C, Pt-Mo/C, Pt-Ni/C, and Pt-Sn/C) supported on a carbon substrate were studied. Polarization and energy characteristics were measured and analyzed using electrochemical impedance spectroscopy. The results showed that the open-circuit voltage for the studied membrane-electrode assembly was 0.97 V, and the maximum power density was 0.78 W cm⁻² at a current density of 1.0 A cm⁻². The highest electrochemical parameters were observed for the Pt-Ni/C catalyst. It was found that increasing the temperature to 60–80 °C leads to an increase in the maximum power density by approximately 12–15%. The obtained results demonstrate the effectiveness of using bimetallic platinum catalysts for increasing the efficiency of PEM-type hydrogen fuel cells. Furthermore, analysis of the impedance spectra revealed the temperature dependence of the ohmic and polarization resistances in the system, which allows for a deeper understanding of the kinetics of electrochemical processes. It was shown that the synergistic effect of bimetallic catalysts increases the rate of the oxygen reduction reaction and improves the energy efficiency of the entire system. The study's results provide an important scientific and practical

basis for improving the operational stability of fuel cells, optimizing catalyst composition, and achieving high efficiency at low temperatures. The proposed approaches are effective for portable and stationary energy devices and make a significant contribution to the development of hydrogen energy.

Keywords: hydrogen fuel cell, membrane–electrode assembly, Nafion, polarization curve, electrochemical impedance spectroscopy, power density.

MPHTI 29.19.25

DOI

**Ж. Д. Оспанова¹, А. Т. Ақилбеков², Ж. Т. Қарипбаев³,
*Г. М. Аралбаева⁴, А. Б. Какимов⁵**

¹Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

^{2,3,4,5}Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва, Республика Казахстан, г. Астана.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7274-3925>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6366-6705>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4066-1826>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6827-5567>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7511-7443>

*e-mail: aralbayevagulnara@gmail.com

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ TiO₂ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ KR ИОНАМИ

В работе исследованы радиационно-индуцированные структурные изменения в монокристаллах рутила TiO₂ после облучения ионами 147 МэВ Kr до флюенсов 10¹¹ и 10¹³ ион/см². Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что во всем исследованном диапазоне флюенсов сохраняется тетрагональная структура рутила без признаков фазового перехода. Показано, что при флюенсе 10¹¹ ион/см² изменения положения и формы дифракционных максимумов минимальны, что свидетельствует о высокой радиационной стойкости кристаллической решетки TiO₂. При увеличении флюенса до 10¹³ ион/см² наблюдается смещение рефлексов (110) и (220) в область меньших углов, указывающее на радиационно-индуцированное увеличение межплоскостных расстояний и расширение решетки рутила. Анализ параметров элементарной ячейки показал увеличение эффективного объема до ~3.6 % для основной компоненты и до ~8.3 % для поврежденного приповерхностного слоя. Рассчитанные значения микродеформации и эффективного напряженного состояния свидетельствуют о формировании неоднородного дефектного слоя с высокими локальными растягивающими напряжениями. Установлено, что основным эффектом воздействия быстрых тяжелых ионов является накопление радиационных дефектов, развитие напряженно-

деформированного состояния и формирование поврежденного приповерхностного слоя без разрушения исходной структуры рутила TiO_2 . Полученные результаты представляют интерес для применения TiO_2 в радиационно-стойких функциональных материалах и элементах ядерной и космической техники.

Ключевые слова: TiO_2 , рутил, тяжелые ионы, радиационные дефекты, латентные треки, рентгеноструктурный анализ, микродеформация, радиационная стойкость.

Введение

Рутиловый диоксид титана (TiO_2) является одним из наиболее востребованных функциональных оксидных материалов благодаря сочетанию высокой химической стабильности, радиационной стойкости и развитых диэлектрических свойств. Материалы на основе диоксида титана находят широкое применение в солнечных элементах [1; 2], фотокатализаторах и трековых темплэйтах для фотокатализа, однофазных керамических формах для иммобилизации радиоактивных отходов [3; 4], а также в МОП-транзисторах [5].

В последние годы значительный интерес вызывает модификация свойств TiO_2 с помощью ионного облучения. Воздействие быстрых тяжелых ионов (БТИ) позволяет целенаправленно изменять структурные, электронные и фотокаталитические характеристики материалов [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12]. В частности, показано, что ионная имплантация способствует смещению спектра поглощения TiO_2 в область видимого света [6; 7; 8; 9; 10], что особенно важно для фотокаталитических и фотоэнергетических применений. Это обусловлено тем, что широкая запрещенная зона исходного TiO_2 ограничивает использование солнечного излучения лишь несколькими процентами полного спектра.

Одновременно радиационное воздействие может приводить к деградации функциональных характеристик материалов. Так, повреждение матриц для иммобилизации радиоактивных отходов под действием осколков деления [3; 4], а также разрушение диэлектрических слоев МОП-транзисторов под влиянием космического излучения [13] существенно ограничивают срок службы соответствующих устройств. В связи с этим установление взаимосвязи между структурными свойствами TiO_2 и его откликом на воздействие высокоэнергетических тяжелых ионов представляет собой одну из актуальных задач физики конденсированного состояния и радиационного материаловедения.

Облучение рутила TiO_2 БТИ активно исследуется с использованием современных экспериментальных методов, включая просвечивающую

электронную микроскопию (ПЭМ) [14; 15; 16], атомно-силовую микроскопию (АСМ) [17; 18], резерфордовское обратное рассеяние (РОР/К) [17] и малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР) [18]. Методами АСМ и сканирующей электронной микроскопии было установлено, что после облучения БТИ на поверхности рутила формируются наноразмерные бугорки (хиллоки) [17; 18]. ПЭМ-исследования показали образование конических латентных треков в приповерхностной области кристалла, представляющих собой агломераты структурных неоднородностей размером порядка 1–2 нм [14; 16]. Предполагается, что пониженное внутреннее давление вблизи поверхности играет важную роль в формировании конической морфологии треков [14].

Реакция различных полиморфных модификаций TiO_2 на воздействие тяжелых ионов также исследовалась методами молекулярной динамики [19]. Полученные результаты свидетельствуют о высокой способности рутила к рекристаллизации после радиационного воздействия [19]. Однако особенности структурных изменений, индуцируемых тяжелыми ионами высоких энергий (>1 МэВ/нуклон) остаются недостаточно изученными.

В связи с этим целью настоящей работы является исследование радиационно-индуцированных структурных изменений в монокристаллах рутила TiO_2 после облучения высокоэнергетическими тяжелыми ионами Кг.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовались коммерческие монокристаллы диоксида титана (TiO_2) рутильной модификации, приобретенные у компании MPT Corporation (MPT XTL, USA). Согласно спецификации производителя, образцы представляли собой ориентированные монокристаллы рутила с кристаллографической ориентацией поверхности (110) и направлением ребра $\langle 001 \rangle$. Размеры подложек составляли $10 \times 5 \times 0.5$ мм³, при этом одна из поверхностей была механически и химически отполирована до оптического качества. Выбор монокристаллов рутила TiO_2 (110) обусловлен высокой термодинамической и радиационной стабильностью данной кристаллографической поверхности, а также ее широким использованием в исследованиях радиационно-индуцированных дефектов, латентных треков и процессов структурного разупорядочения в оксидных материалах. Кроме того, ориентация (110) является одной из наиболее стабильных поверхностей рутила и часто используется как модельная система при исследовании взаимодействия быстрых тяжелых ионов с оксидными кристаллами.

Облучение образцов проводилось ионами криптона Кг с энергией 147 МэВ на циклотроне ДЦ-60 (Астана, Казахстан). Образцы облучались при комнатной температуре до флюенсов 10^{11} и 10^{13} ион/см². Выбор энергии

ионов был обусловлен необходимостью моделирования воздействия высокоэнергетических осколков деления и формирования латентных треков в приповерхностной области кристалла. При данных условиях основным механизмом потери энергии ионов является электронное торможение, приводящее к локальному возбуждению электронной подсистемы и образованию радиационных дефектов. В случае быстрых тяжелых ионов с энергиями порядка сотен МэВ основным механизмом радиационного воздействия является электронное торможение, приводящее к интенсивному локальному энерговыделению вдоль траектории иона. В результате формируется так называемая область термического пика, сопровождающаяся кратковременным локальным плавлением, образованием латентных треков и накоплением структурных дефектов [16; 19]. Для оксидных материалов типа TiO_2 подобные процессы могут приводить как к локальному разупорядочению структуры, так и к радиационно-индуцированному расширению кристаллической решетки.

Рентгеноструктурный анализ исходных и облученных монокристаллов TiO_2 выполнялся на дифрактометре Bruker D8 ESO с использованием монохроматизированного $Cu\ K\alpha$ -излучения ($\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$). Измерения выполнялись в θ - 2θ -геометрии при комнатной температуре. Регистрация дифрактограмм осуществлялась в диапазоне углов 2θ , включающем основные рефлексы рутильной структуры. Анализ рентгеновских данных включал определение положения дифракционных максимумов, оценку изменения межплоскостных расстояний, параметров элементарной ячейки и степени радиационно-индуцированной деформации. Для оценки напряженно-деформированного состояния использовалось смещение межплоскостных расстояний относительно исходного монокристалла TiO_2 , принятого в качестве внутреннего эталона. Расчет микродеформации проводился по изменению параметров решетки после облучения, а эффективное напряжение оценивалось с использованием характерного модуля упругости для рутила TiO_2 .

Результаты и обсуждение

Анализ дифрактограмм проводился с целью исследования влияния облучения быстрыми тяжелыми ионами Кг с энергией 147 МэВ на кристаллическую структуру, параметры решетки, микродеформацию и напряженно-деформированное состояние рутильных монокристаллов TiO_2 .

Для фазовой идентификации и анализа кристаллографических параметров использовалась эталонная PDF-карта фазы рутила TiO_2 (PDF 01-084-1283), соответствующая тетрагональной структуре с пространственной группой $P4_2/mnm$.

Рентгеновские дифрактограммы исходного и облученных ионами Кг монокристаллов TiO_2 были проанализированы с учетом тетрагональной структуры рутила. Согласно корректной PDF-карте рутила, TiO_2 кристаллизуется в тетрагональной сингонии с пространственной группой $P4_2/mnm$, параметрами решетки ($a=b=4.593 \text{ \AA}$, $c=2.959 \text{ \AA}$) и объемом элементарной ячейки $V=62.42 \text{ \AA}^3$. Основной эталонный рефлекс рутила расположен в области и соответствует плоскости (110), что хорошо согласуется с маркировкой исследуемого образца как монокристалла TiO_2 с ориентацией (110) и направлением ребра $\langle 001 \rangle$.

Экспериментальные рентгеновские дифрактограммы были получены для трех образцов: исходного монокристалла TiO_2 и образцов, облученных ионами Кг с энергией 147 МэВ до флюенсов 10^{11} и 10^{13} ион/см² (рисунок 1). Для исходного образца характерен интенсивный дифракционный максимум в области $2\theta \approx 27.75^\circ$, соответствующий отражению (110) тетрагональной структуры рутила TiO_2 . Для образца, облученного при 10^{11} ион/см², положение этого пика практически не изменяется, что указывает на сохранение кристаллической структуры рутила без заметной радиационно-индуцированной деформации.

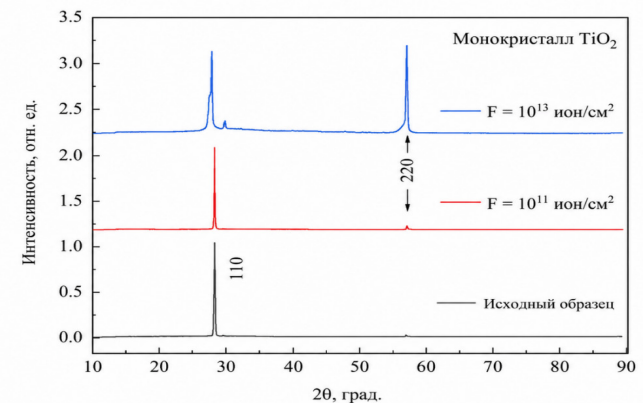


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы исходного и облученных ионами Кг (147 МэВ) монокристаллов TiO_2 при флюенсах 10^{11} и 10^{13} ион/см².

Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы для кристаллов TiO_2 исходного и облученного ионами 147 МэВ Кг до флюенсов 10^{11} и 10^{13} ион/см²

В то же время при увеличении флюенса до 10^{13} ион/см² основной рефлекс (110) смещается в область меньших углов, а форма пика становится

асимметричной, что свидетельствует об увеличении межплоскостного расстояния d_{110} , накоплении дефектов и формировании неоднородного напряженно-деформированного слоя.

Подобное радиационно-индуцированное расширение решетки ранее наблюдалось в TiO_2 после воздействия быстрых тяжелых ионов и связывалось с формированием латентных треков и локально разупорядоченных областей [16; 17]. Асимметрия дифракционного максимума и появление широкой низкоугловой компоненты указывают на наличие градиента деформации и неоднородного распределения дефектов в приповерхностной области монокристалла.

Параметры решетки были также оценены с учетом тетрагональной структуры рутила. Для отражения (110) использовалось соотношение $d_{110} = a/\sqrt{2}$, а для (220) – $d_{220} = a/(2\sqrt{2})$. Поскольку исследуемые образцы представляют собой ориентированные монокристаллы $\text{TiO}_2(110)$, стандартная θ – 2θ – геометрия рентгенодифракционного эксперимента не позволяет выполнить независимое и надежное определение параметра решетки (с).

На дифрактограммах доминируют главным образом отражения семейства (110) и (220), тогда как рефлексы, чувствительные к направлению [001], практически отсутствуют для корректного структурного уточнения. В связи с этим параметр (с) был оценен косвенным способом, исходя из предположения о приблизительном сохранении тетрагонального отношения (с/а), характерного для рутильной структуры TiO_2 .

Для эталонной фазы рутила используются параметры: $a_0 = b_0 = 4.593 \text{ \AA}$, $c_0 = 2.959 \text{ \AA}$, что соответствует отношению: $\frac{c_0}{a_0} \approx 0.6442$. Предполагая, что радиационно-индуцированное расширение решетки не приводит к сильному изменению тетрагонального искажения, эффективное значение параметра (с) оценивалось по выражению: $c_{eff} = a_{eff} \times \frac{c_0}{a_0}$. Полученные значения следует рассматривать как эффективные оценочные параметры, а не как результаты прямого кристаллографического уточнения (Таблица 1).

Таблица 1 – Эффективные оценочные параметры рутила $\text{TiO}_2(110)$

Образец	$a_{eff}, \text{ \AA}$	$c_{eff}, \text{ \AA}$	$V_{eff} = a^2c, \text{ \AA}^3$	$\Delta V/V, \%$
Эталон	4.5940	2.9590	62.45	
Исходный TiO_2	4.5931	2.9590	62.42	0
10^{11} ион/см ² ион/см ²	4.5945	2.9600	62.49	+0.11
10^{13} ион/см ² , (110)	4.6471	2.9940	64.67	+3.61
10^{13} ион/см ² , (220)	4.7151	3.0370	67.57	+8.25

Тем не менее такой подход позволяет оценить тенденцию изменения объема элементарной ячейки при увеличении флюенса облучения и сопоставить степень радиационно-индуцированного расширения решетки. Следует отметить, что даже при максимальном исследованном флюенсе не наблюдается появления дополнительных дифракционных максимумов или признаков аморфизации, что свидетельствует о высокой структурной устойчивости рутильной модификации TiO_2 к воздействию высокоэнергетических тяжелых ионов. Высокая устойчивость рутильной структуры TiO_2 к аморфизации ранее объяснялась эффективной рекристаллизацией области термического пика, формирующейся при прохождении быстрого тяжелого иона через кристалл [19]. Из приведенных результатов видно, что при флюенсе 10^{11} ион/см² параметры решетки и объем элементарной ячейки изменяются крайне слабо. Увеличение объема составляет всего около (0.1 %), что указывает на сохранение практически неизменной структуры рутила TiO_2 . Это согласуется с минимальным смещением основного рефлекса (110) и свидетельствует о том, что при данном флюенсе концентрация радиационных дефектов еще недостаточна для формирования выраженного напряженно-деформированного состояния.

При увеличении флюенса до 10^{13} ион/см² наблюдается заметное увеличение как параметра (а), так и оцененного параметра (с). Для основной компоненты дифракционного пика объем элементарной ячейки возрастает до 64.67 \AA^3 , что соответствует увеличению примерно на 3.6 % относительно исходного состояния. Дополнительно в области меньших углов появляется широкая компонента, связанная с более сильно поврежденным приповерхностным слоем. Для этой области эффективный объем достигает 67.57 \AA^3 , а относительное расширение составляет около 8.3 %. Формирование сильно деформированного приповерхностного слоя может быть связано с перекрытием латентных треков при высоком флюенсе облучения. Аналогичное накопление дефектов и рост локальной деформации ранее обсуждались для TiO_2 и других оксидных материалов, облученных быстрыми тяжелыми ионами [17; 19].

Поскольку исследуемый образец является ориентированным монокристаллом, прямое использование порошкового подхода, включая классический метод Вильямсона-Холла, ограничено. Для таких образцов ширина пика определяется не только микродеформацией, но также мозаичностью, разориентацией блоков, кривизной поверхности, вкладом поврежденного слоя, геометрией съемки и инструментальным уширением. Поэтому в настоящем исследовании микродеформация была рассчитана более корректным способом – по смещению межплоскостного расстояния относительно исходного TiO_2 . Исходный образец был принят в качестве

внутреннего эталона, а не сравнивался напрямую с PDF-картой 01-084-1283. Такой подход позволяет исключить вклад нулевого сдвига прибора, высоты образца и других геометрических факторов.

Радиационно-индуцированная деформация рассчитывалась по выражению: $\varepsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl}^{irr} - d_{hkl}^0}{d_{hkl}^0}$, где d_{hkl}^0 – межплоскостное расстояние

исходного кристалла, а d_{hkl}^{irr} – межплоскостное расстояние после облучения. Для основного ориентированного рефлекса (110) значение d_0 исходного TiO_2 было принято за нулевое состояние, поэтому $\varepsilon_0 = 0$ и $\sigma_0 = 0$. Эффективное напряжение был оценен по соотношению $\sigma = M\varepsilon$, где $M=230$ ГПа принят как эффективный модуль для сравнительной оценки напряженного состояния. Для оценки эффективного напряженно-деформированного состояния использовался эффективный модуль упругости $M_{eff} \approx 230$ ГПа, соответствующий характерным значениям упругих модулей рутильного TiO_2 , приведенным в литературе. Результаты расчетов представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Радиационно-индуцированные деформации и эффективное напряжение рутила TiO_2 (110). Расчетные значения для рефлекса (110)

Образец	$2\theta_{110}, ^\circ$	$d_{110}, \text{Å}$	ε_{110}	Эффективное напряжение, ГПа
Исходный	27.747	3.2124	0	0
10^{11} ион/см ²	27.750	3.2121	-9.1×10^{-5}	-0.02
10^{13} ион/см ² , основная компонента	27.300	3.2640	1.61×10^{-2}	3.70
10^{13} ион/см ² , широкая поврежденная компонента	27.024	3.2967	2.63×10^{-2}	6.04

Поскольку исследуемые образцы являются ориентированными монокристаллами с выраженной упругой анизотропией, полученные значения следует рассматривать как эффективные или кажущиеся напряжения, а не как полный тензор остаточных напряжений.

Из приведенных данных видно, что после облучения до флюенса 10^{11} ион/см² изменение положения пика (110) практически отсутствует. Рассчитанная деформация составляет всего около -9.1×10^{-5} , что находится в пределах экспериментальной неопределенности. Поэтому для данного флюенса корректнее говорить не о реальном сжимающем напряжении, а об отсутствии заметного радиационно-индуцированного напряженно-деформированного состояния. Это означает, что при низком флюенсе

дефекты еще не формируют существенно поврежденную область и не приводят к заметному изменению межплоскостных расстояний.

При флюенсе 10^{13} ион/см² наблюдается принципиально иная картина. Основная компонента рефлекса (110) смещается в сторону меньших углов, что соответствует увеличению d_{110} до 3.2640 Å и радиационно-индуцированной деформации около 1.61 %, соответствующий эффективный растягивающее напряжение оценивается на уровне около 3.7 ГПа. Дополнительно в низкоугловой области проявляется широкая компонента, связанная с более сильно поврежденным слоем. Для нее d_{110} увеличивается до 3.2967 Å, что соответствует локальной деформации около 2.63 % и эффективному стрессу около 6.0 ГПа. Следует отметить, что данное значение не соответствует однородному напряженному состоянию всего монокристалла, а отражает локальное напряженно-деформированное состояние поврежденной приповерхностной области, сформированной при облучении БТИ. Полученные результаты хорошо согласуются с моделью термического пика, согласно которой интенсивное электронное торможение быстрых тяжелых ионов вызывает локальное возбуждение электронной подсистемы и последующую передачу энергии решетке. Это приводит к формированию областей локального разупорядочения, накоплению вакансий и межузельных дефектов, а также к возникновению локальных растягивающих напряжений вблизи латентных треков [12; 16; 19], что хорошо согласуется с моделью неупругого электронного торможения в оксидных материалах.

При увеличении флюенса возрастает вероятность перекрытия треков, что сопровождается усилением радиационно-индуцированной деформации и ростом неоднородности напряженного состояния. Для дополнительной проверки был рассмотрен рефлекс (220) (Таблица 3).

Таблица 3 – Радиационно-индуцированные деформации и эффективное напряжение рутила TiO_2 (110). Расчетные значения для рефлекса (220)

Образец	Рефлекс	Деформация относительно исходного образца	Эффективное напряжение, ГПа
10^{11} ион/см ²	(220)	7.39×10^{-4}	0.17
10^{13} ион/см ²	(220)	7.24×10^{-3}	1.67

Несмотря на то, что для ориентированного монокристалла наиболее надежным является анализ основного рефлекса (110), смещение (220) также подтверждает тенденцию к расширению решетки рутила при высоком флюенсе.

Расхождение между значениями, полученными по (110) и (220), является ожидаемым для облученного монокристалла. Оно связано с тем, что дифракционный сигнал формируется одновременно от относительно сохраненной рутильной матрицы и от поврежденного приповерхностного слоя, имеющего градиент деформации по глубине. Кроме того, слабость отдельных рефлексов, асимметрия пиков и возможный вклад мозаичности делают точное определение деформации по каждому отражению менее надежным. Тем не менее оба рефлекса показывают один и тот же качественный результат: при низком флюенсе структура остается практически неизменной, а при 10^{13} ион/см² возникает выраженное расширение решетки.

Информация о финансировании

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP23488607).

Выводы

По результатам рентгеноструктурного анализа установлено, что исходный и облученные образцы TiO₂ сохраняют тетрагональную структуру рутила во всем исследованном диапазоне флюенсов. Для образца, облученного при 10^{11} ион/см², изменения положения и формы дифракционных максимумов минимальны, что указывает на сохранение практически неизменной кристаллической решетки и отсутствие выраженного напряженно-деформированного состояния.

При увеличении флюенса до 10^{13} ион/см² наблюдается смещение рефлексов (110) и (220) в область меньших углов, что свидетельствует о радиационно-индуцированном увеличении межплоскостных расстояний и расширении решетки рутила TiO₂. Эффективный объем элементарной ячейки возрастает до ~3.6 % для основной компоненты и до ~8.3% для поврежденного приповерхностного слоя.

Расчет микродеформации относительно исходного монокристалла показал, что при низком флюенсе деформация практически отсутствует, тогда как при 10^{13} ион/см² формируется выраженное растягивающее напряженно-деформированное состояние с эффективным стрессом порядка нескольких ГПа. Появление широкой малоугловой компоненты указывает на образование сильно дефектного приповерхностного слоя, связанного с накоплением радиационных дефектов, локальным разупорядочением структуры и перекрытием латентных трещин тяжелых ионов K₂.

Полученные результаты показывают, что основным эффектом облучения является не фазовый переход, а радиационно-индуцированное расширение решетки рутила TiO₂, сопровождающееся ростом микродеформации, накоплением дефектов и формированием неоднородного напряженного состояния в приповерхностной области кристалла.

Таким образом, рутильные монокристаллы TiO₂ демонстрируют высокую устойчивость к фазовым превращениям при воздействии быстрых тяжелых ионов, однако накопление радиационных дефектов приводит к существенному изменению напряженно-деформированного состояния приповерхностной области. Полученные результаты представляют интерес для разработки радиационно-стойких оксидных материалов, используемых в ядерной энергетике, космической электронике и функциональных покрытиях.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки радиационной стойкости оксидных материалов, предназначенных для эксплуатации в экстремальных радиационных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 O'Regan, B., Grätzel, M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films [Text]. In Nature. – 1991. – Vol. 353. – P. 737–740.
- 2 Park, N.-G., van de Lagemaat, J., Frank, A. J. Comparison of dye-sensitized rutile- and anatase-based TiO₂ solar cells [Text]. In J. Phys. Chem. B. – 2000. – Vol. 104. – P. 8989–8994.
- 3 Weber, W. J., Ewing, R. C., Catlow, C. R. A., Diaz de la Rubia, T., Hobbs, L. W., Kinoshita, C., Matzke, H., Motta, A. T., Nastasi, M., Salje, E. K. H., Vance, E. R., Zinkle, S. J. Radiation effects in crystalline ceramics for the immobilization of high-level nuclear waste and plutonium [Text]. In J. Mater. Res. – 1998. – Vol. 13. – P. 1434–1484.
- 4 Lumpkin, G. R., Smith, K. L., Blackford, M. G., Thomas, B. S., Whittle, K. R., Marks, N. A., Zaluzec, N. J. Experimental and atomistic modeling study of ion irradiation damage in thin crystals of the TiO₂ polymorphs [Text]. In Phys. Rev. B. – 2008. – Vol. 77. – P. 214201.
- 5 Wilk, G. D., Wallace, R. M., Anthony, J. M. High-κ gate dielectrics: Current status and materials properties considerations [Text]. In J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 89. – P. 5243–5275.
- 6 Anpo, M. Photocatalysis on titanium oxide catalysts: Approaches in achieving highly efficient reactions and realizing the use of visible light [Text]. In Catal. Surv. Asia. – 1997. – Vol. 1. – P. 169–179.
- 7 Wang, Q., Domen, K. Particulate photocatalysts for light-driven water splitting: Mechanisms, challenges, and design strategies [Text]. In Chemical Reviews. – 2020. – Vol. 120(2). – P. 919–985.

8 **Shen, H., Mi, L., Xu, P., Shen, W., Wang, P. N.** Visible-light photocatalysis of nitrogen-doped TiO₂ nanoparticulate films prepared by low-energy ion implantation [Text]. In Appl. Surf. Sci. – 2007. – Vol. 253. – P. 7024–7028.

9 **Yamashita, H., Harada, M., Misaka, J., Takeuchi, M., Ikeue, K., Anpo, M.** Degradation of propanol diluted in water under visible light irradiation using metal ion-implanted titanium dioxide photocatalysts [Text]. In J. Photochem. Photobiol. A. – 2002. – Vol. 148. – P. 257–261.

10 **Pelaez, M., Nolan, N. T., Pillai, S. C., Seery, M. K., Falaras, P., Kontos, A. G., Dunlop, P. S. M., Hamilton, J. W. J., Byrne, J. A., O’Shea, K., Entezari, M. H., Dionysios, D. D.** A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications [Text]. In Appl. Catal. B: Environ. – 2012. – Vol. 125. – P. 331–349.

11 **Meldrum, A., Haglund, R. F. Jr., Boatner, L. A., White, C. W.** Nanocomposite materials formed by ion implantation [Text]. In Adv. Mater. – 2001. – Vol. 13. – P. 1431–1444.

12 **Jain, I. P., Agarwal, G.** Ion beam induced surface and interface engineering [Text]. In Surf. Sci. Rep. – 2011. – Vol. 66. – P. 77–172.

13 **Massengill, L. W., Choi, B. K., Fleetwood, D. M., Schrimpf, R. D., Galloway, K. F., Shaneyfelt, M. R., Meisenheimer, T. L., Dodd, P. E., Schwank, J. R., Lee, Y. M., Johnson, R. S., Lucovsky, G.** Heavy-ion-induced breakdown in ultra-thin gate oxides and high-k dielectrics [Text]. In IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2001. – Vol. 48. – P. 1904–1908.

14 **O’Connell, J., Skuratov, V., van Vuuren, A. J., Saifulin, M., Akilbekov, A.** Near surface latent track morphology of SHI irradiated TiO₂ [Text]. In Phys. Status Solidi B. – 2016. – Vol. 253. – P. 2144–2148.

15 **O’Connell, J. H., Skuratov, V. A., Akilbekov, A., Zhumazhanova, A., van Vuuren, A. J.** EM study of latent track morphology in TiO₂ single crystals [Text]. In Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. – 2016. – Vol. 379. – P. 200–204.

16 **Awazu, K., Wang, X., Fujimaki, M., Komatsubara, T., Ikeda, T., Ohki, Y.** Structure of latent tracks in rutile single crystal of titanium dioxide induced by swift heavy ions [Text]. In J. Appl. Phys. – 2006. – Vol. 100. – P. 044308.

17 **Karlušić, M., Jakšić, M., Lebius, H., Band’Etat, B., Wilhelm, R. A., Heller, R., Schleberger, M.** Swift heavy ion track formation in SrTiO₃ and TiO₂ under random, channeling and near-channeling conditions [Text]. In J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. – Vol. 50. – P. 205302.

18 **Karlušić, M., Bernstorff, S., Siketić, Z., Šantić, B., Bogdanović-Radović, I., Jakšić, M., Schleberger, M., Buljan, M.** Formation of swift heavy ion tracks on a rutile TiO₂ (001) surface [Text]. In J. Appl. Cryst. – 2016. – Vol. 49. – P. 1704–1710.

19 **Marks, N. A., Thomas, B. S., Smith, K. L., Lumpkin, G. R.** Thermal spike recrystallisation: Molecular dynamics simulation of radiation damage in polymorphs of titania [Text]. In Nucl. Instr. Methods Phys. Res. Sect. B. – 2008. – Vol. 266. – P. 2665–2670.

Поступило в редакцию 15.05.26.

Поступило с исправлениями 25.05.26.

Принято в печать 07.06.26.

Ж. Д. Оспанова¹, А. Т. Акилбеков², Ж. Т. Карипбаев³,

**Г. М. Аралбаева⁴, А. Б. Какимов⁵*

¹Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

^{2,3,4,5}Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

15.05.26 ж. баспаға түсті.

25.05.26 ж. түзетулерімен түсті.

07.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

KR ИОНДАРЫМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН TiO₂ МОНОКРИСТАЛДАРЫН РЕНТГЕНҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада 147 МэВ энергиялы Kr иондарымен 10¹¹ және 10¹³ ион/см² флюенстерге дейін сәулелендірілген рутил TiO₂ монокристалдарындағы радиациялық-индуцирленген құрылымдық өзгерістер зерттелді. Рентгенқұрылымдық талдау нәтижелері зерттелген барлық флюенс диапазонында рутилдің тетрагональды құрылымы фазалық ауысусыз сақталатынын көрсетті. 10¹¹ ион/см² флюенс кезінде дифракциялық максимумдардың орны мен пішініндегі өзгерістердің өте аз болуы TiO₂ кристалдық торының жоғары радиациялық тұрақтылығын көрсетеді. Флюенс 10¹³ ион/см² мәніне дейін артқанда (110) және (220) рефлекстерінің кіші бұрыштар аймағына ығысуы байқалады, бұл жазықтықаралық қашықтықтардың ұлғаюын және рутил торының радиациялық-индуцирленген кеңеюін көрсетеді. Элементар ұяшық параметрлерін талдау негізгі компонент үшін тиімді көлемнің шамамен ~3.6 %-ға, ал зақымдалған бетке жақын қабат үшін ~8.3 %-ға

дейін артатынын көрсетті. Есептелген микродеформация және тиімді кернеулік күй мәндері жоғары локалдық созылу кернеулері бар біртекті ақаулық қабаттың қалыптасуын дәлелдейді. Жылдам ауыр иондар әсерінің негізгі салдары радиациялық ақаулардың жиналуы, кернеулі-деформацияланған күйдің дамуы және бастапқы рутил TiO_2 құрылымын бұзбай зақымдалған бетке жақын қабаттың түзілуі екені анықталды. Алынған нәтижелер TiO_2 материалын радиацияға төзімді функционалды материалдарда және ядролық әрі ғарыштық техника элементтерінде қолдану үшін маңызды болып табылады.

Кілтті сөздер: TiO_2 , рутил, ауыр иондар, радиациялық ақаулар, латентті тректер, рентгенқұрылымдық талдау, микродеформация, радиациялық тұрақтылық.

Zh. D. Ospanova¹, A. T. Akilbekov², Zh. T. Karipbayev³,

*G. M. Aralbayeva⁴, A. B. Kakimov⁵

¹Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

^{2,3,4,5}L. N. Gumilyov Eurasian National University,

Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 15.05.26.

Received in revised form 25.05.26.

Accepted for publication 07.06.26.

X-RAY STUDY OF TiO_2 SINGLE CRYSTALS IRRADIATED WITH KR IONS

Radiation-induced structural changes in rutile TiO_2 single crystals irradiated with 147 MeV Kr ions to fluences of 10^{11} and 10^{13} ions/cm² were investigated. X-ray diffraction analysis revealed that the tetragonal rutile structure is preserved throughout the studied fluence range without any signs of phase transformation. It was shown that at a fluence of 10^{11} ions/cm² the changes in the position and shape of diffraction peaks are minimal, indicating a high radiation resistance of the TiO_2 crystal lattice. With increasing fluence up to 10^{13} ions/cm², the (110) and (220) reflections shift toward lower diffraction angles, indicating a radiation-induced increase in interplanar spacing and expansion of the rutile lattice. Analysis of the unit cell parameters demonstrated an increase in the effective unit cell volume up to ~3.6 % for the main component and up to ~8.3 % for the damaged near-surface layer. The calculated microstrain and effective stress values indicate the formation of a non-uniform defect layer with high local tensile stresses. It was established that the primary effect of swift heavy ion irradiation is the accumulation of radiation

defects, the development of a stress-strain state, and the formation of a damaged near-surface region without destruction of the original rutile TiO_2 structure. The obtained results are of interest for the application of TiO_2 in radiation-resistant functional materials and components for nuclear and space technologies.

Keywords: TiO_2 , rutile, heavy ions, radiation defects, latent tracks, X-ray analysis, microstrain, radiation resistance.

МРНТИ 55.20.19, 55.21.19

DOI

**Б. К. Рахадиллов¹, А. К. Сейтханова²,
Д. Н. Кәкімжанов³, *А. Мұрал⁴**

^{1,3,4}ТОО «PlasmaScience», Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск;

²Павлодарский педагогический университет имени Ө. Марғұлана,
Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8610-5492>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9453-0456>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>

*e-mail: aibolm02@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ Cr_2O_3

В работе проведено комплексное исследование влияния технологических условий детонационного напыления на формирование морфологии, фазового состава и эксплуатационных свойств керамических покрытий на основе оксида хрома (Cr_2O_3). Покрытия формировались на подложках из нержавеющей стали AISI 316L с применением детонационного комплекса CCDS2000 при различных степенях заполнения ствола детонационной установки. С использованием методов рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, измерения микротвёрдости и шероховатости, а также трибологических и адгезионных испытаний исследовано влияние режимов напыления на структуру и свойства покрытий. Установлено, что во всех образцах доминирующей фазой является кристаллический α - Cr_2O_3 . Показано, что изменение степени заполнения ствола существенно отражается на плотности, пористости и однородности микроструктуры покрытий. Оптимальные режимы детонационного напыления обеспечивают снижение пористости и шероховатости поверхности, повышение твёрдости, улучшение износостойкости и адгезионной прочности. Полученные результаты подтверждают возможность целенаправленного управления эксплуатационными характеристиками покрытий Cr_2O_3 путём оптимизации технологических параметров детонационного напыления. Это

расширяет перспективы практического применения покрытий Cr_2O_3 в условиях повышенных механических и трибологических нагрузок в энергетике, машиностроении и других ответственных отраслях промышленности.

Ключевые слова: детонационное напыление, покрытия Cr_2O_3 , микроструктура, трибологические свойства, адгезионная прочность, морфология поверхности.

Введение

Керамические покрытия из оксида хрома (Cr_2O_3) широко используются в качестве износостойкого, фрикционного и коррозионностойкого материала на различных технических компонентах, применяемых в аэрокосмической, морской, химической, бумажной и целлюлозной промышленности [1]. Высокий интерес к данным покрытиям обусловлен уникальным сочетанием их физико-механических и химических свойств, включая высокую твёрдость, низкий коэффициент трения, термическую стабильность и устойчивость к воздействию агрессивных сред [2; 3]. Благодаря этим характеристикам покрытия Cr_2O_3 эффективно защищают поверхности деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного и адгезионного износа, а также при повышенных температурах и в коррозионно-активных средах.

Наиболее распространёнными технологиями нанесения покрытий Cr_2O_3 являются методы термического напыления, такие как атмосферное плазменное напыление (APS) и высокоскоростное газопламенное напыление (HVOF). Несмотря на их широкое промышленное применение, данные методы нередко приводят к формированию покрытий с повышенной пористостью и значительными остаточными термическими напряжениями, что может снижать эксплуатационные характеристики покрытий, особенно в условиях циклических механических и термических нагрузок [4; 5].

В последние годы значительное внимание уделяется детонационному напылению как перспективному методу формирования керамических покрытий с улучшенными структурными и механическими характеристиками. Детонационное напыление основано на ускорении порошковых частиц до сверхзвуковых скоростей с использованием детонационной волны, что обеспечивает высокую кинетическую энергию частиц при кратковременном тепловом воздействии на материал [6]. Такие условия способствуют формированию плотных, малопористых покрытий с высокой адгезионной прочностью и мелкодисперсной ламеллярной структурой. Современные исследования показывают, что технологические параметры детонационного напыления, включая состав газовой смеси, степень заполнения ствола (бочки), частоту детонаций, дистанцию напыления и расход порошка, оказывают

существенное влияние на морфологию, фазовый состав и эксплуатационные свойства покрытий Cr_2O_3 [7]. Варьирование режимов напыления приводит к изменению степени уплотнения покрытия, распределения пор, размеров структурных элементов и фазовой стабильности оксида хрома, что напрямую отражается на износостойкости, твёрдости, адгезионной прочности и трибологических характеристиках покрытий [8].

Таким образом, комплексное исследование влияния технологических условий детонационного напыления на структуру, фазовый состав и эксплуатационные свойства покрытий Cr_2O_3 является актуальной научной и прикладной задачей материаловедения. Кроме того, недостаточная изученность взаимосвязей между отдельными параметрами процесса, в частности степенью заполнения бочки детонационной установки, и формированием микроструктуры покрытий ограничивает возможность целенаправленного управления их эксплуатационными характеристиками. В этом контексте систематический анализ морфологии, фазового состава и функциональных свойств покрытий позволяет сформировать научно обоснованные рекомендации по оптимизации технологии детонационного напыления для конкретных условий эксплуатации [9]. В связи с вышеизложенным целью данной работы является исследование влияния технологических параметров детонационного напыления, в частности степени заполнения бочки детонационной установки, на свойства покрытий на основе оксида хрома (Cr_2O_3), включая их микроструктуру, твёрдость, адгезионную прочность и трибологические характеристики, с целью определения оптимальных условий формирования износостойких покрытий.

Материалы и методы

В качестве распыляемого материала использовался порошок оксида хрома Cr_2O_3 с размером частиц 15–45 мкм (рис. 1) и оскольчатой морфологией. Покрытия наносились на подложки из нержавеющей стали AISI 316L методом детонационного напыления с использованием комплекса CCDS2000 с компьютерным управлением [10].

Формирование покрытий осуществлялось с применением детонационного пистолета, в ствол которого дозированно подавалась взрывоопасная газовая смесь и порошок, а детонация инициировалась электрической искрой. Продукты детонации нагревают и ускоряют частицы до высоких скоростей, обеспечивая их пластическую деформацию и микросварку с подложкой. Очистка ствола после каждого цикла выполнялась азотом, а требуемая толщина покрытия достигалась сериями выстрелов с перемещением образца манипулятором [11;12]. Различные режимы напыления задавались изменением степени заполнения ствола горючей газовой смесью (табл. 1).

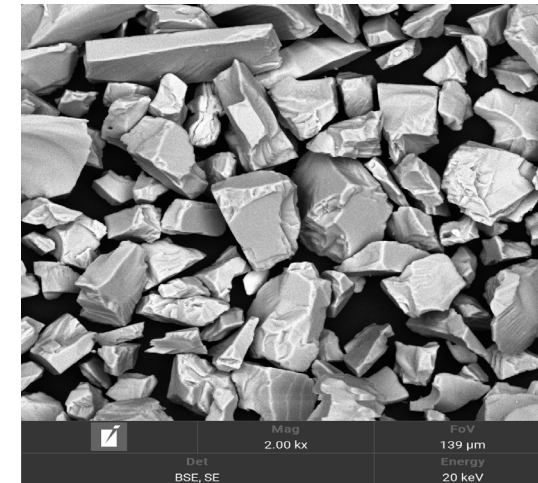


Рисунок 1 – РЭМ-изображение морфологии порошка Cr_2O_3

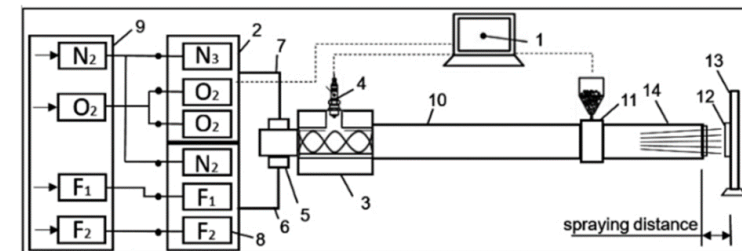


Рисунок 2 – Схематическая диаграмма установленной на компьютере настройки детонационной установки CCDS2000: 1 – управляющий компьютер, 2 – газораспределитель, 3 – смесительно-запальная камера, 4 – свеча зажигания, 5 – клапан ствола, 6 – топливопровод, 7 – кислородопровод, 8 – газовые клапаны, 9 – узел газоснабжения, 10 – указанная часть ствола, 11 – пороховой дозатор, 12 – холостой патрон; 13 – манипулятор, 14 – дульная часть ствола.

Таблица 1. Технологические режимы напыления покрытий из оксида алюминия

Образец	Объем заполнения ствола, %	Расстояние распыления, мм	Количество выстрелов
A1	63	250	20
A2	58	250	20

A3	53	250	20
----	----	-----	----

Образцы изготавливались в виде прямоугольных пластин размером $30 \times 30 \times 15$ мм. Перед нанесением покрытий поверхность образцов подвергалась тщательной предварительной подготовке. С этой целью выполнялось механическое шлифование с использованием наждачной бумаги различной зернистости с последовательным переходом от P120 до P2500, что обеспечивало получение требуемой степени гладкости поверхности и эффективное удаление оксидных плёнок и поверхностных загрязнений. Химический состав подложки из нержавеющей стали AISI 316L представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав 316L.

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo
≤0.03	≤0.75	≤2.0	10-14	≤0.03	≤0.045	16-18	2.00-3.00

После формирования покрытий был проведён рентгеноструктурный анализ с использованием дифрактометра X'Pert Pro (Philips Corporation, Амстердам, Нидерланды). Регистрация дифракционных спектров осуществлялась при Cu-K α -излучении ($\lambda = 2,2897$ Å) при ускоряющем напряжении 40 кВ и токе трубки 30 мА. Измерения выполнялись в диапазоне углов 2θ от 20° до 100° . Шаг сканирования составлял $0,05^\circ$, время экспозиции – 1 с на каждый шаг. Расшифровка и анализ полученных дифракционных паттернов проводились с использованием программного обеспечения HighScore.

Микротвёрдость поперечных сечений образцов определялась методом Викерса в соответствии с требованиями стандарта DIN EN ISO 14577-1 с применением микротвердомера Fischerscope HM2000. Испытания проводились при нагрузке на индентор 300 мН и времени выдержки 15 с. Микроструктура поверхности покрытий исследовалась методом оптической микроскопии с использованием микроскопа Olympus.

Трибологические испытания проводились в режиме сухого трения скольжения на трибометре TRB3 по стандартной схеме «шарик–диск» в соответствии с международными стандартами ASTM G133-95 и ASTM G99. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2а. В качестве контртела использовался стальной шарик диаметром 6,0 мм с покрытием из стали 100Cr6. Испытания выполнялись при нормальной нагрузке 10 Н и линейной скорости скольжения 3 см/с. Радиус дорожки износа составлял 2 мм, а суммарный путь трения – 100 м.

Результаты и обсуждение

На рисунке представлены рентгеновские дифракционные спектры покрытий Cr₂O₃, полученных методом детонационного напыления при различных степенях заполнения ствола детонационной установки (53 %, 58 % и 63 %). Во всех образцах основной фазой является кристаллический α -Cr₂O₃, что подтверждается наличием характерных интенсивных дифракционных пиков. На дифракционных картинах также фиксируются слабые рефлексы металлического Cr, что может быть связано с неполным окислением частиц в процессе напыления. С увеличением степени заполнения ствола наблюдается рост интенсивности и уменьшение ширины дифракционных пиков Cr₂O₃, что свидетельствует о повышении кристалличности и уплотнении структуры покрытия.

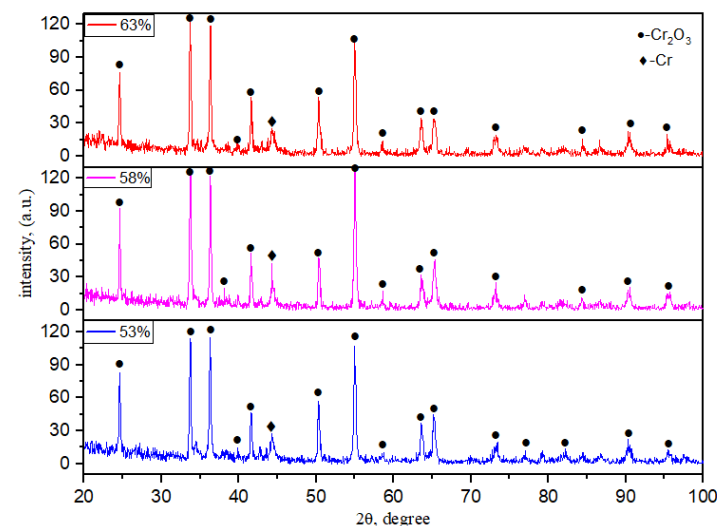


Рисунок 3 – Результаты рентгенофазового анализа

На рисунке 4 представлены микроструктуры поперечные сечения покрытий Cr₂O₃, полученных методом детонационного напыления при различных степенях заполнения ствола установки. Во всех образцах формируется типичная для детонационного напыления ламеллярная структура покрытия, характеризующаяся плотным прилеганием к подложке и чётко выраженной границей раздела «покрытие–подложка».

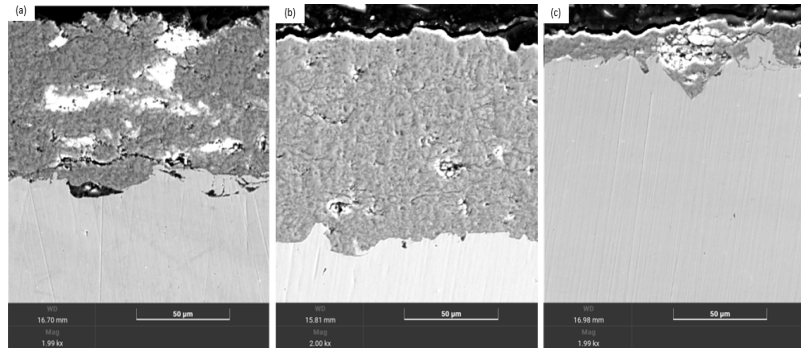


Рисунок 4 – РЭМ-изображения морфологии поперечного сечения покрытий Cr₂O₃, полученных с при разных значениях объема заполнения ствола. (а) 63% (образец 1); (b) 58% (образец 2); и (с) 53%(образец 3)

При более детальном анализе представленных микрофотографий (рис. 5) можно заметить различия в толщине и уровне пористости покрытий. Хотя расстояние напыления во всех случаях составляло 250 мм, различия в толщине и структуре покрытий могут быть связаны с технологическим параметром напыления.

Покрытие, представленное на рис. 5а, характеризуется наличием пор и микротрещин вблизи границы «покрытие–подложка», что может быть связано с нестабильностью подачи порошка и газовой смеси. Образец на рис. 5b отличается наиболее плотной и однородной структурой с минимальным количеством дефектов, что свидетельствует об эффективном уплотнении частиц и оптимальных условиях напыления. В покрытии, показанном на рис. 5с, отмечается повышение пористости и неоднородность структуры, вероятно обусловленные снижением кинетической энергии частиц при изменении режимов напыления.

Таким образом, увеличение степени заполнения ствола детонационной установки способствует улучшению микроструктуры покрытий Cr₂O₃, что проявляется в снижении пористости, повышении однородности и улучшении качества сцепления покрытия с подложкой.

Результаты измерения пористости покрытий приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения пористости покрытий Cr₂O₃

Объем заполнения бочки, %	Пористость, %
63	0,02
58	0,01
53	0,07

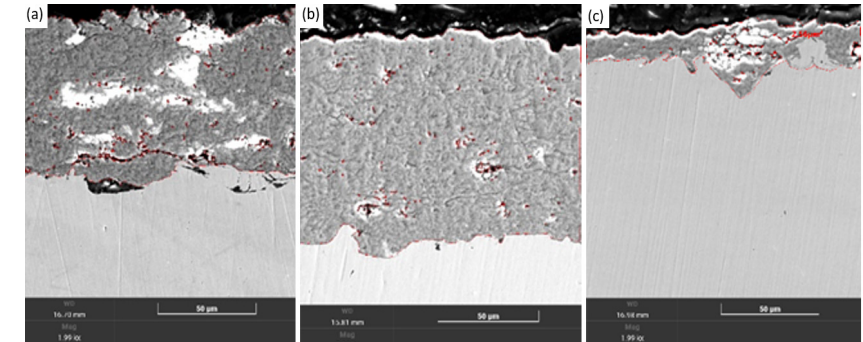


Рисунок 5 – РЭМ-изображения поперечного сечения Cr₂O₃ с обнаружением пористости. Образец 1-(а), образец 2-(b) и образец 3-(с)

На рисунке 6 представлена зависимость глубины проникновения индентора от нагрузки, полученная методом Мартенса. Все покрытия характеризуются сопоставимыми значениями модуля упругости E, что указывает на близкие упругие свойства материала. При этом образец A2 демонстрирует более высокую твёрдость по сравнению с A1 и A3, что проявляется в меньшей глубине проникновения при одинаковой нагрузке. Данное различие связано с особенностями технологических параметров детонационного напыления, влияющих на уплотнение, микроструктуру и термомеханическое состояние покрытия.

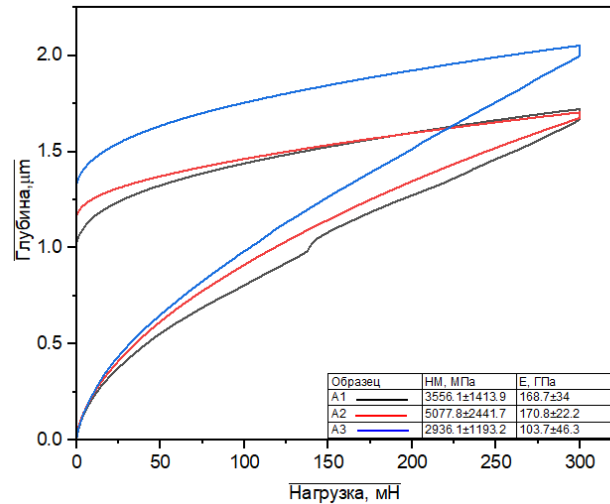


Рисунок 6 – Зависимость глубины проникновения индентора в образцы А1 и А2, А3 приложенной нагрузки

На рисунке 7 показаны значения коэффициента трения (CoF) покрытий Cr_2O_3 для образцов А1–А3, полученных при различных режимах детонационного напыления. Минимальное значение CoF наблюдается для образца А2 ($\approx 0,62$), тогда как для образцов А1 и А3 коэффициент трения составляет около 0,68 и 0,71 соответственно. Представленные погрешности указывают на хорошую воспроизводимость результатов. Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии технологических параметров напыления на трибологические свойства покрытий, при этом снижение коэффициента трения для образца А2 связано с более плотной микроструктурой и меньшей шероховатостью поверхности.

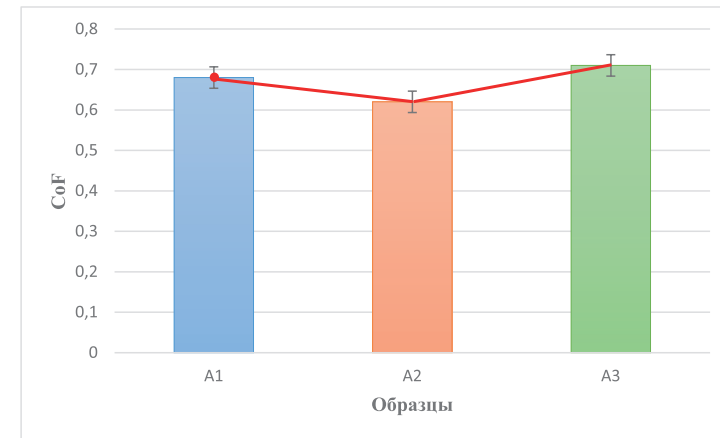


Рисунок 7 – Значения коэффициента трения (CoF) покрытий Cr_2O_3 для образцов А1–А3, полученных при различных режимах детонационного напыления. Показаны средние значения коэффициента трения с соответствующими погрешностями измерений

Информация о финансировании

Исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23490102).

Выводы

В результате проведённых исследований установлено, что детонационное напыление позволяет формировать керамические покрытия Cr_2O_3 с плотной ламеллярной структурой и надёжным сцеплением с подложкой из нержавеющей стали AISI 316L. Рентгенофазовый анализ показал, что во всех образцах доминирующей фазой является кристаллический $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$, при этом степень заполнения ствола детонационной установки оказывает заметное влияние на кристалличность и структурную упорядоченность покрытий. Микроструктурные исследования выявили, что оптимальные режимы напыления способствуют снижению пористости и формированию более однородной структуры покрытия, что сопровождается уменьшением шероховатости поверхности. Результаты инструментированного индентирования и трибологических испытаний показали, что покрытия, полученные при оптимальных технологических условиях, характеризуются повышенной твёрдостью и пониженным коэффициентом трения. Адгезионные испытания подтвердили существенное влияние степени заполнения ствола на прочность сцепления покрытия с подложкой. В целом продемонстрировано, что оптимизация технологических

параметров детонационного напыления позволяет эффективно управлять морфологией и эксплуатационными свойствами покрытий Cr_2O_3 , повышая их износостойкость и эксплуатационную надёжность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Cellard, A., Garnier, V., Fantozzi, G., Baret, G., & Fort, P. Wear resistance of chromium oxide nanostructured coatings. *Ceramics International*. – 2009. – 35(2). – P. 913–916. – <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2008.02.022>
- 2 Matthews, S., & James, B. Review of thermal spray coating applications in the steel industry: part 1—hardware in steel making to the continuous annealing process. *Journal of thermal spray technology*. – 2010. – 19(6). – P. 1267–1276. – <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9518-8>
- 3 Heimann R. B. *Plasma Spray Coating: Principles and Applications*. Wiley-VCH, 2008.
- 4 Yinglong, W. Friction and Wear Performances of Detonation-Gun- and Plasma-Sprayed Ceramic and Cermet Hard Coatings under Dry Friction. *Wear*. – 1993. – 161. – P. 69–78. – [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90454-T](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90454-T)
- 5 Zamani, P., Valefi, Z. Microstructure, Phase Composition and Mechanical Properties of Plasma Sprayed Al_2O_3 , Cr_2O_3 and Cr_2O_3 - Al_2O_3 Composite Coatings. *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – 316. P. 138–145. – <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.022>
- 6 Espallargas, N. «Introduction to thermal spray coatings». *Future development of thermal spray coatings*. Woodhead Publishing. – 2015. – P. 1–13. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-769-9.00001-4>
- 7 Nagpal, Yatan, Pardeep Sharma, and Rohit Sharma. «To Improve Wear Resistance of Cast Iron Deposited by Detonation Sprayed NI-CR Coating». *Modern Manufacturing Systems*. Apple Academic Press. – 2022. – P. 61–70.
- 8 Rakhadilov, B. K., Buytkenov, D. B., Kakimzhanov, D., Kozhanova, R. S., & Bektasova, G. S. The effect of detonation spraying on the phase composition and hardness of Al_2O_3 coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 4(2). 2020. – P. 160–166. – <https://doi.org/10.29317/ejpfm.2020040207>
- 9 Wang, Y., Jin, Y., Wen, S. The Analysis of the Friction and Wear Mechanisms of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings at 450 °C. *Wear* 1988. – 128. – P. 265–276. – [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90063-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90063-4)
- 10 Rakhadilov, B. K., Buitkenov, D. B., Rakhadilov, M. K. Tribological Properties of Al_2O_3 Coatings Obtained by Detonation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2021. – 1079. – 052035. – [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90063-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90063-4)

11 Kantay, N., Rakhadilov, B., Kurbanbekov, S., Yeskermessov, D., Yerbolatova, G., Apsezhanova, A. Influence of Detonation-Spraying Parameters on the Phase Composition and Tribological Properties of Al_2O_3 Coatings. *Coatings*. – 2021. – 11. – 793. – <https://doi.org/10.3390/coatings11070793>

12 Ulianitsky, V., Shtertser, A., Zlobin, S., Smurov, I. Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications. *J Therm Spray Tech.* – 2011. – 20. – P. 791–801. – <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9649-6>

Поступило в редакцию 08.01.26.

Поступило с исправлениями 24.02.26.

Принято в печать 03.06.26.

Б. К. Рахадиллов¹, А. К. Сейтханова², Д. Н. Кәкімжанов³, *А. Мұрал⁴

^{1,3,4}ТОО «PlasmaScience», Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.;

²Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

08.01.26 ж. баспаға түсті.

24.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ДЕТОНАЦИЯЛЫҚ БҮРКУ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ Cr_2O_3 ОКСИДТІ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ МОРФОЛОГИЯСЫ МЕН ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫНА ӘСЕРІ

Бұл мақалада хром оксиді (Cr_2O_3) негізіндегі керамикалық жабындардың морфологиясының, фазалық құрамының және пайдалану қасиеттерінің қалыптасуына детонациялық бүрку процесінің жағдайларының әсерін кеіненді зерттеу ұсынылған. Жабындар детонациялық блоктың бошкесін толтырудың әртүрлі дәрежелерінде CCDS2000 детонация жүйесін қолдана отырып, AISI 316L тот баспайтын болаттан жасалған негіздерінде жасалды. Рентгендік фазалық талдау, сканерлеуші электрондық микроскопия, микроқаттылық пен кедір-бұдырлық өлшемдері, сондай-ақ трибологиялық және адгезия сынақтары арқылы бүрку режимдерінің жабындардың құрылымы мен қасиеттеріне әсері зерттелді. Барлық үлгілерде кристалды α - Cr_2O_3 басым фаза болып табылатыны анықталды. Бошкелерді толтыру дәрежесінің өзгеруі жабын микроқұрылымының тығыздығына, кеуектілігіне және біртектілігіне айтарлықтай әсер ететіні көрсетілді.

Оңтайлы детонациялық бүрку жағдайлары беткі кедір-бұдырлықты азайтады, қаттылықты арттырады және тозуға төзімділік пен адгезия беріктігін жақсартады. Нәтижелер детонациялық бүрку процесінің параметрлерін оңтайландыру арқылы Cr_2O_3 жабындарының пайдалану сипаттамаларын мақсатты түрде басқару мүмкіндігін растайды. Бұл энергетика, машина жасау және басқа да маңызды салаларда механикалық және трибологиялық жүктемелердің жоғарылауы жағдайында Cr_2O_3 жабындарын практикалық қолдану мүмкіндігін кеңейтеді.

Кілтті сөздер: детонациялық бүрку, Cr_2O_3 жабындары, микроқұрылым, трибологиялық қасиеттер, адгезия беріктігі, беткі морфология.

B. K. Rakhadilov¹, A. K. Seitkhanova²,

D. N. Kakimzhanov³, *A. Mural⁴

^{1,3,4}PlasmaScience LLP, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk;

²Pavlodar Pedagogical University named after A. Margulan,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 08.01.26.

Received in revised form 24.02.26.

Accepted for publication 03.06.26.

INFLUENCE OF DETONATION SPRAYING PARAMETERS ON THE MORPHOLOGY AND PHASE COMPOSITION OF Cr_2O_3 OXIDE COATINGS

The work presents a comprehensive study of the influence of detonation spraying conditions on the formation of the morphology, phase composition, and operational properties of ceramic coatings based on chromium oxide (Cr_2O_3). The coatings were formed on AISI 316L stainless steel substrates using the CCDS2000 detonation complex at various degrees of filling of the detonation chamber. The influence of sputtering modes on the structure and properties of coatings was investigated using X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, microhardness and roughness measurements, as well as tribological and adhesion tests. It was found that the dominant phase in all samples is crystalline α - Cr_2O_3 . It was shown that changes in the degree of filling of the barrel significantly affect the density, porosity, and uniformity of the microstructure of the coatings. Optimal detonation spraying modes reduce porosity and surface roughness, increase hardness, and improve

wear resistance and adhesive strength. The results confirm the possibility of targeted control of the performance characteristics of Cr_2O_3 coatings by optimizing the technological parameters of detonation spraying. This expands the prospects for the practical application of Cr_2O_3 coatings under conditions of increased mechanical and tribological loads in energy, mechanical engineering, and other critical industries.

Keywords: detonation spraying, Cr_2O_3 coatings, microstructure, tribological properties, adhesive strength, surface morphology.

SRSTI 29.17.15

DOI

***A. A. Akzholova¹, V. N. Kossov², M. S. Moldabekova³,
Z. Rimantas⁴, B. R. Sakibayeva⁵**

^{1,2}Abai Kazakh National Pedagogical University, Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴Vilnius University, Republic of Lithuania, Vilnius;

⁵Zhetysu university named after I. Zhansugurov,
Republic of Kazakhstan, Taldykorgan.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2568-503X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8001-1644>

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

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2757-5651>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6420-1552>

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

DEVELOPING RESEARCH COMPETENCIES OF FUTURE PHYSICS TEACHERS

This article aims to design the content of students' training by involving them in research activities and mastering their methodology. The main tool for developing competencies is practical classes on solving physical problems of a research and creative nature.

The article systematizes the stages of theoretical educational research in classes: preparatory (fact control), main (analysis of the problem structure and search for solutions), and final (reflection and comparison with theory). The article substantiates the role of creative problems that do not contain direct references to the laws used, which stimulates productive thinking and the students' methodological culture.

The article also defines the preparatory, main, and final stages of theoretical educational research in practical classes and describes the content of the teacher's and student's activities. In addition, it emphasizes the importance of solving creative problems and provides specific examples from the fields of molecular physics and thermodynamics.

In particular, it demonstrates the effectiveness of using heuristic and algorithmic approaches in studying heat transfer processes.

By solving physical problems in practical classes, students deepen, expand, and complement the theoretical material they have learned in lectures, acquiring the skills and abilities to apply their knowledge in practice. In other words, they demonstrate their knowledge and understanding of the basic principles and relationships of the theoretical material they have learned in lectures in order to solve problems analytically.

Keywords: development of research competencies, future physics teacher, physical problems, practical classes, thermal balance, and statistical patterns.

Introduction

Physical education plays a crucial role in the formation of modern scientific worldview, mastering the methodology of interdisciplinary researches, development of analytical skills and the ability to predict various processes. Effective functioning of high-tech industries such as nanoindustry, energetics, quantum electronics, cosmonautics, defense technologies, chemical industry, etc. are impossible without highly qualified specialists possessing deep knowledge obtained on the basis of fundamental physical education. Therefore, the value of preparation of future physics teachers increases, who are assigned with the task of forming not only subject knowledge, but scientific thinking too in learners. The modern pedagogue must be prepared for professional activities in condition of dynamically changing educational environment, capable for independent analysis, continuous development and improvement. In these conditions the problem of the formation and succession of professional competencies of bachelor of physical education is becoming especially relevant. This requires implementation of new approaches in designing content and organization of fundamental preparation of the students of pedagogical universities [1; 2; 3; 4; 5].

Materials and methods Development of research competencies of learners is possible within a holistic pedagogical process, which includes systematically organized educational activity and creation of sustainable connections between scientific researches and professional competencies. Main tasks are: involvement of learners in research activities, acquisition of its methodology, development and improvement of research skills [6; 7].

Practical classes, particularly solution of physics problems, occupies central place in comprehension and consolidation of educational material, and also in the development of research competencies. Physical tasks of research character include cognitive-research problems, theoretical and experimental problems, solved by

heuristic methods. Majority of physical problems reflect theoretical position of the physics section under study, which were put as the basis of calculation determination of various physical values.

Development of problem solving skills, conducting experiments and analyzing their results is an important element of the preparation of future physics teachers. These skills form on the basis of learned concepts and knowledge, and also closely related with theoretical material that must be familiar to the student.

Self-control of the absorption quality of the theoretical material performed by a student when searching for the answers to control questions on a theoretical issue, which allows to organize approach to problem solving and its methods for solving them. As a result of this student gets holistic view about methods for solving problems, with formulas and laws that will be used. While solving problems student needs to have a clear idea of initial data being necessary and sufficient. This contributes to a clear understanding of solving ways leading from initial to the desire data. This way of solving physical problems related to a development of an action plan, which allows to implement a solution and think through its subsequent stages, then execute planned decisions and evaluate the results by comparing with theory, promotes development of research abilities and skills.

Table 1 presents the stages of theoretical educational research in practical classes based on the above analysis.

Table 1 – Stages of theoretical educational research in practical classes

Stages	Content of the activity	
	Teacher	Student
Preparatory stage	Organization of repetition and control of actual material of the lectures (models, concepts, theories, phenomena, laws, objects, etc.)	Study and demonstration of the comprehension of actual material of lecture. Repetition and clarification of the content and essence of the listed concepts of actual material of the lecture.
Main stage	Organization of solution and solution analysis of proposed problems. In the process of solving problems its structure is analyzed, solution algorithms are refined, the necessary heuristic prescriptions are considered, the stages of problem solving are highlighted.	Identifying problematic questions and finding ways to solve them. Completing tasks to self-study (research, analysis of concrete research question). Using basic equations describing process, proposed in the task conditions; obtaining analytical dependencies, which can be used for numerical calculations.

Final stage	Implementation of consultative assistance in class and during independent work, defining the amount of work master's degree students in compiling physics problems.	Comparing the results of calculation, if there is data, with experimental or tabular values. Performing reflection on its own activities.
-------------	---	---

We refer physics problems that differ in specificity inherent in applied calculations and scientific researches, requiring reliable data and independent non-standard thinking from students when solving problems as creative problems.

Creative problems according to V. G. Razumovsky, are «problems in which certain requirements are formulated that can be executed based on knowledge of physical laws, however they lack any direct or indirect references to those physical phenomena whose laws should be used to solve these problems» [8].

Let's consider an example of determining the location of N molecules in a part of the volume V, which we denote as V', that is $V' = \frac{1}{m}V$. Find the probability

that N particles will end up in V', and if the gas occupies the entire volume V, then how to determine the probability of this state and what it is equal to.

Or, if there is only one molecule in a vessel with volume V, colliding with the glass of the vessel, it may be in the different parts, for example, in V'. How to determine the probability of finding the molecule in this volume? It is possible to solve this problem using the observation time of the molecule for T minutes, from which, assuming the molecule spends that part of this time t in the volume V'. The ratio $\frac{t}{T}$ is called the relative residence time of the molecule in V'.

$$\text{The limit of this ratio is } P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{t}{T}$$

the probability of finding the molecule in the volume V'.

A further discussion of this result, considered sequentially by two methods, is students' understanding of the statistical pattern particle transport, which, as experience shows, is expressed in the fact that there is a limit.

Solving a creative problem encourages students to reproduce familiar information from memory, leads to productive action and stimulates creative thinking, which ultimately leads to the development of the methodological culture in solving creative problems.

Results and discussion. Methods of solving problems in studying heat transfer are considered by us in the profile discipline «Solving problematic problems in physics». The levels of the problems in terms of content correspond to physics problems of secondary school [9]. Research problems in physics, their use in carrying out educational research in physics, contribute to the formation and development of research competencies of future teacher.

As an example let's look at the following problem.

An aluminum block with a volume of 1200 cm^3 at 0°C , is immersed into a vessel containing water with a mass of 18 kg at a temperature of 85°C . By how many degrees will the water cool by the time thermal equilibrium is reached in the vessel.

While solving the problem, student must note that heat exchange between the bodies (water and the block) changes physical situation. This happens because of a shift in the positions of the bodies caused by heat exchange. In order to understand the process of heat exchange between the water and the block, the student should create schematic diagram, i.e. draw a temperature scale that allows to formulate a heat balance equation. Then, the student must determine for how many degrees the water will cool down by the time thermal equilibrium is reached in the vessel.

The physical process of changing the state of the bodies is determined by the formula $Q = c \cdot m (t_b - t_w)$. Applying the law of conservation of energy, the student obtains the heat balance equation $Q_1 = Q_2$ and, from this, finds the required physical quantity.

The solution of this problem, in which students must investigate the process of heat transfer, incorporates algorithmic and heuristic techniques. When solving this kind of problems, students apply theoretical knowledge of thermal phenomena, explain their physical situations, identify problem-solving methods, construct systems of equations, verify the resulting equation, calculate and validate the results. It should be noted that the visual representation of the processes presented in the problem reveals its physical essence, which helps students develop creative thinking.

Based on the above statements and on the results of our research obtained with the used complexed scientific methods given a characteristic of research competence. Its structural components consist of ability, skills and readiness [10].

Figure 1 shows the characteristics of research competence that contribute to the development of professional competence of a future physics teacher.

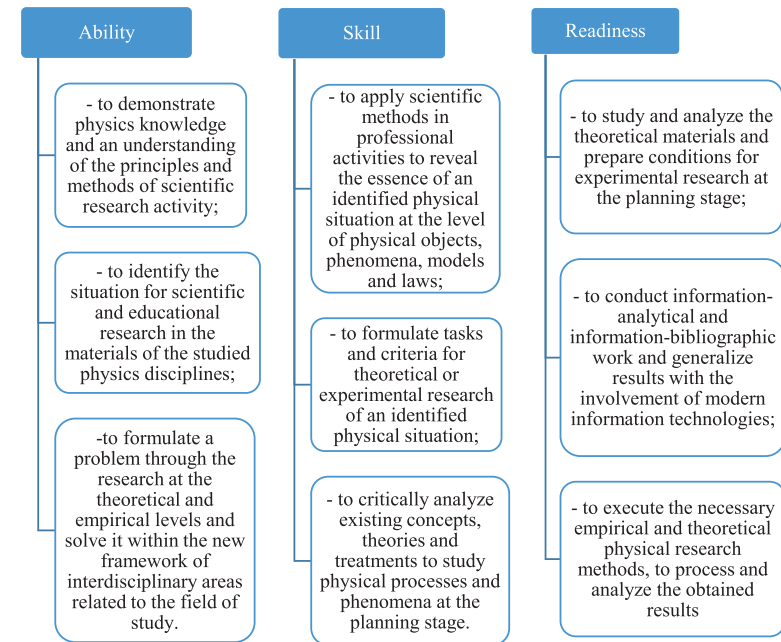


Figure 1 – Characteristics of research competence

As shown from the Figure 1 in order to form research competencies, it is necessary to develop abilities, skills and readiness to implement research competence in practice.

Conclusions. This work shows that the development of research competence requires the development of the abilities, skills and willingness to implement one's research competence in practice. In other words, students are able to self-actualize, i.e. overcome interdisciplinary barriers and attempt to look at the problems being studied in a new way, which results in the self-discovery of their essential powers and personal development and a qualitative change in the creative potential of the individual is observed.

REFERENCES

1 Молдабекова, М. С., Асембаева, М. К., Акжолова, А. А. Методология решения проблем в формировании исследовательских компетенций магистрантов. // Материалы тринадцатой международной конференции «Физика в системе современного образования». Российский

государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия. Т.1. – СПб: Изд-во ООО «Фора-принт», 2015. – С. 144-147.

2 **Балыкбаев, Т. О., Жампеисова, К. К., Хан, Н. Н., Колумбаева, Ш. Ж.** Конкурентоустойчивость высшего педагогического образования. //Вестник. Серия «Педагогические науки», №3 (59). – Алматы: КазНПУ имени Абая, – 2015. – С. 3–12.

3 **Косов, В. Н., Асембаева, М. К., Молдабекова, М. С., Федоренко, О. В., Акжолова, А. А.** Некоторые аспекты подготовки магистров по специальности «Физика» в педагогическом вузе. // Физическое образование в вузах. – Т. 22. – № 4. – Москва. – 2016. – С. 115–121.

4 **Želvys, R., Akholova A.** Problems of introducing a competence-based learning within the context of Bologna process. //Pedagogika. – Vilnius: Lithuanian University of Educational Sciences. – Vol. 121. – № 1. – 2016. – P. 187–197.

5 **Муллер, О. Ю.** Сущность и структура понятия «навыки научно-исследовательской деятельности студентов педагогического образования // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2021. – № 3. –С. 55–59. [Электронный ресурс]. – <https://science-pedagogy.ru/ru/article/view?id=2380>

6 **Handina, H., Khotimah, S. N.** Implementation of Research-based Learning for Prospective Physics Teachers: A Case Study. Journal of Science Learning. –2023. – № 6(4). –P. 457–464.

7 **Кузнецова, Е. В.** Исследовательские компетенции обучающихся при изучении естественных наук // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 8–2. – С. 330–333. – [Электронный ресурс]. – <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36155>

8 **Разумовский, В. Г.** Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике. – М. : Просвещение, 1975. – 203 с.

9 **Кронгарт, Б. А. и другие.** Физика. Учебник для 10 кл. естеств.-матем. направления обще-образоват.шк. Часть 1 / Б. А. Кронгарт, Д. М. Казахбаева, О. Имамбеков, Т. З. Кыстаубаев. – Алматы : Мектеп, 2019. – 280 с.

10 **Акжолова, А. А.** Характеристика исследовательской компетентности будущих учителей физики в педагогическом вузе. //Вестник. Серия «Физико-математические науки», № 1 (61). – Алматы: КазНПУ имени Абая. – 2017. – С. 124–129.

REFERENCES

1 **Moldabekova, M. S., Asembaeva, M. K., Akholova, A. A.** Metodologia rešenía problem v formirovanii issledovatel'skih kompetensi magistrantov [Methodology for Solving Problems in the Formation of Research Competencies of Master's Students]. // Materialy trinadsatoi mejdunarodnoi konferensii «Fizika

v sisteme sovremennoogo obrazovaniia». Rosiski gosudarstvennyi pedagogicheski universitet im. A.Ī. Gersena, Sankt-Peterburg, Rosia. – Vol. 1. – SPb : Īzd-vo ООО «Fora-print». – 2015. – P. 144–147.

2 **Balykbaev, T. O., Jampeisova, K. K., Han, N. N., Kolumbaeva, Š. J.** Konkurentoustoichivost' vysshego pedagogicheskogo obrazovaniia [Competitiveness of higher pedagogical education]. //Vestnik. Seria «Pedagogicheskie nauki», №3 (59). – Almaty: KazNPU imeni Abaia. – 2015. – P. 3–12.

3 **Kosov, V. N., Asembaeva, M. K., Moldabekova, M. S., Fedorenko, O. V., Akholova, A. A.** Nekotorye aspekty podgotovki magistrrov po spesiálnosti «Fizika» v pedagogicheskom vuze [Some aspects of training masters in physics at a pedagogical university]. // Fizicheskoe obrazovanie v vuzah. T.22, №4. – Moskva, – 2016. – pp.115-121.

4 **Želvys, R., Akholova A.** Problems of introducing a competence-based learning within the context of Bologna process. //Pedagogika. – Vilnius: Lithuanian University of Educational Sciences. – Vol. 121. – № 1. – 2016. – P. 187–197

5 **Muller, O. Īu.** Sušnöst i struktura ponátia «navyki nauchno-issledovatel'skoi deiatelnosti studentov pedagogicheskogo obrazovaniia [The essence and structure of the concept “research skills of students in pedagogical education”] // Nauchnoe obozrenie. Pedagogicheskie nauki. –2021. – № 3. –P. 55–59. URL: <https://science-pedagogy.ru/ru/article/view?id=2380>

6 **Handina, H., Khotimah, S. N.** Implementation of Research-based Learning for Prospective Physics Teachers: A Case Study. Journal of Science Learning. –2023. – № 6(4). – P. 457–464.

7 **Kuznesova, E. V.** Īssledovatel'skie kompetensii obuchaiušihsä pri izuchenii estestvennyh nauk [Research competencies of students in the study of natural sciences] // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2016. – № 8–2. – P. 330–333. [Electronic resource]. – <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36155>

8 **Razumovski, V. G.** Razvitie tvorcheskih sposobnostei uchašihsä v prosese obucheniia fizike [Developing students' creative abilities in the process of teaching physics]. – М.: Prosvešenie, 1975. – 203 p.

9 **Krongart, B. A. i drugie.** Fizika. Uchebnik dlä 10 kl. estestv.-matem. napravleniia obše-образоват.šk. Chäst 1 [Physics. Textbook for 10th grade. Natural Sciences. Mathematics. General Education. Part 1] / B. A. Krongart, D. M. Kazahbaeva, O. Īmambekov, T. Z. Kystaubae. – Almaty : Mektep, 2019. – 280 p.

10 **Akjolova, A. A.** Charakteristika issledovatel'skoi kompetentnosti buduşih uchitelei fiziki v pedagogicheskom vuze [Characteristics of the research competence of future physics teachers at a pedagogical university]. //Vestnik. Seria «Fiziko-matematicheskie nauki». № 1 (61). – Almaty: KazNPU imeni Abaia. – 2017. – P. 124–129.

Received 29.04.26.
Received in revised form 04.05.25.
Accepted for publication 04.06.26.

*Ә. Ә. Ақжолова¹, В. Н. Косов², М. С. Молдабекова³,
Р. Желвис⁴, Б. Р. Сакибаева⁵

^{1,2}Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

³әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

⁴Вильнюс университеті, Литва Республикасы, Вильнюс қ.;

⁵Ільяс Жансүгіров атындағы Жетісу университеті,

Қазақстан Республикасы, Талдықорған қ.

29.04.26 ж. баспаға түсті.

04.05.26 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БОЛАШАҚ ФИЗИКА МҰҒАЛІМДЕРІНІҢ ЗЕРТТЕУШІЛІК ҚҰЗЫРЛАРЫН ДАМУ

Бұл мақала студенттерді зерттеу қызметіне тарту және оның әдіснамасын игеру арқылы оқыту мазмұнын жобалауға бағытталған. Құзырларды дамытудың негізгі құралы – зерттеушілік және шығармашылық сипаттағы физикалық есептерді шешуге арналған практикалық сабақтар.

Мақалада сабақтардағы теориялық оқу зерттеулерінің кезеңдері жүйеленген: дайындық (фактілерді бақылау), негізгі (тапсырма құрылымын талдау және шешу жолдарын іздеу) және қорытынды (рефлексия және теориямен салыстыру). Студенттердің нәтижелі ойлауы мен әдіснамалық мәдениетін ынталандыратын шығармашылық есептердің ролі негізделген.

Сондай-ақ, мақалада практикалық сабақтардағы теориялық оқу зерттеулерінің дайындық, негізгі және қорытынды кезеңдері айқындалып, оқытушы мен студенттің іс-әрекет мазмұнын

сипаттайды. Сонымен қатар, шығармашылық есептерді шешудің маңыздылығына тоқталып, молекулалық физика және термодинамика бөлімдерінен нақты мысалдар келтірілген. Атап айтқанда, жылу алмасу процестерін зерттеу барысында эвристикалық және алгоритмдік тәсілдерді қолданудың тиімділігі көрсетілген.

Физикалық мәселелерді шеше отырып, практикалық сабақтарда студенттер дәріс сабақтарында алған теориялық материалдарын тереңдетеді, кеңейтеді және толықтырады, білімдерін практикалық қолдану дағдылары мен дағдыларына ие болады. Яғни, есепті аналитикалық шешу үшін олар дәріс сабақтарынан белгілі теориялық материалдың негізгі заңдылықтары мен арақатынасын білу мен түсінуді көрсетеді.

Кілтті сөздер: зерттеушілік құзырларды дамыту, болашақ физика мұғалімі, физикалық есептер, практикалық сабақтар, жылу балансы, статистикалық заңдылықтар.

*Ә. Ә. Ақжолова¹, В. Н. Косов², М. С. Молдабекова³,
Р. Желвис⁴, Б. Р. Сакибаева⁵

^{1,2} Казахский национальный педагогический университет имени Абая,
Республика Казахстан, г. Алматы;

³Казахский национальный университет им. Аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы;

⁴Вильнюсский университет, Республика Литва, г. Вильнюс;

⁵Жетісу университеті и.м. И. Жансүгірова,
Республика Казахстан, г. Талдықорған.

Поступило в редакцию 29.04.26.

Поступило с исправлениями 04.05.26.

Принято в печать 04.05.26.

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ КОМПЕТЕНЦИЙ БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ ФИЗИКИ

Данная статья направлена на проектирование содержания подготовки студентов через вовлечение их в исследовательскую деятельность и овладение её методологией. Основным инструментом развития компетенций выступают практические занятия по решению физических задач исследовательского и творческого характера.

В статье систематизированы этапы теоретического учебного исследования на занятиях: подготовительный (контроль фактов), основной (анализ структуры задачи и поиск путей решения) и заключительный (рефлексия и сравнение с теорией). Обоснована роль творческих задач, которые не содержат прямых указаний на используемые законы, что стимулирует продуктивное мышление и методологическую культуру обучающихся.

Также в статье определены подготовительный, основной и заключительный этапы теоретических учебных исследований на практических занятиях и описывается содержание деятельности преподавателя и студента. Кроме того, подчеркивается важность решения творческих задач и приводятся конкретные примеры из разделов молекулярной физики и термодинамики. В частности, показана эффективность применения эвристических и алгоритмических подходов при изучении процессов теплообмена.

Решая физические задачи, на практических занятиях обучающиеся углубляют, расширяют и дополняют усвоенный ими теоретический материал, полученный на лекционных занятиях, приобретают умения и навыки практического применения своих знаний. То есть, для аналитического решения задачи они демонстрируют знание и понимание основных закономерностей и соотношения теоретического материала, которые известны из лекционных занятий.

Ключевые слова: развитие исследовательских компетенций, будущий учитель физики, физические задачи, практические занятия, тепловой баланс, статистические закономерности.

FTAMP 27.35.25, 14.25.09

DOI

***Ж. К. Даниярова¹, Н. Д. Сарбасова², М. С. Бокаева³**

^{1,2}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

³Марғұлан университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2455-1305>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7280-7434>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0893-3043>

*e-mail: daniyarova1957@mail.ru

11-СЫНЫПҚА ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫҚ ТЕҢДЕУЛЕРДЕН БАҒАЛАУ ЕСЕПТЕРІН ҚҰРАСТЫРУ

Бұл мақалада «Дифференциалдық теңдеулер» тақырыбы бойынша жиынтық бағалау үшін есептер құрастыру әдістемесі қарастырылады. 11-сынып оқушыларына арналған «Дифференциалдық теңдеулер» тақырыбы бойынша жиынтық бағалау (ТЖБ, БЖБ) тапсырмаларын құрастыру кезінде оқу бағдарламасының талаптары мен оқушылардың танымдық деңгейлерін ескеру қажет. Мақала «Дифференциалдық теңдеулер» тақырыбы бойынша мектеп-лицейдің 11-сынып оқушыларына арналған жиынтық бағалау үшін есептер құрастыру әдістемесін ұсынады. Онда дифференциалдық теңдеулердің негізгі түрлері, олардың шешу әдістері, сондай-ақ бағалау критерийлері мен оқушылардың білім деңгейін анықтау үшін формативті және суммативті бағалау тәсілдері қарастырылады. Есептерді таңдауда оқушылардың логикалық ойлау қабілетін, шығармашылық дағдыларын және математикалық сауаттылығын арттыруға бағытталған тапсырмалар ұсынылады. Мұнда практикалық мысалдар мен тапсырмалар үлгілері арқылы оқытушыларға арналған нұсқаулық береді. Бөлім үшін жиынтық бағалау бойынша орындалған жұмыстың нәтижелері білім алушыға түсінікті болуы және оны одан әрі оқуға ынталандыруы тиіс. Кері байланыс білім алушылардың оқу жетістіктерінің қол жеткізілген деңгейі туралы ақпаратты қамтуы тиіс. Білім алушылар мен ата-аналарды хабардар ету нысанын мұғалім өз бетінше айқындайды. Жұмыста осы тақырыпқа арналған тапсырмаларды құрастыру әдістемесі мен үлгілері берілген.

Кілтті сөздер: критериялды бағалау, БЖБ, ТЖБ, дескрипторлар, табыс критерийлері, тексерілетін дағдылар.

Кіріспе

Жиынтық бағалау белгілі бір оқу кезеңінде оқу бағдарламасының мазмұнын меңгеру деңгейін белгілеу, анықтау және бағалау үшін жүргізіледі. Тіркеу процесінде оқу бағдарламасының мазмұнына сәйкес білім алушылардың білімі мен дағдыларын көрсететін дәлелдемелерді жинау жүзеге асырылады. Жиынтық бағалау тоқсан ішінде, тоқсанның соңында және білім деңгейі аяқталғаннан кейін жүргізіледі [1; 2].

Жиынтық бағалау нәтижелері бойынша бағалар туралы шешімді мұғалім бағалау критерийлері мен дескрипторларға немесе балл қою схемаларына сәйкес қабылдайды. Білім алушылардың нәтижелерін оқу процесін түзету және жетілдіру үшін пайдалану қажет. Пән бойынша әдістемелік бірлестікке жиынтық бағалауды өткізу кезеңдері мен нысандарын көрсете отырып, оқу жылына жиынтық бағалау жоспарын жасау ұсынылады [3; 4; 5].

Жиынтық бағалауды өткізу ережелері.

Жиынтық бағалау кез – келген көрнекі материалдар: диаграммалар, схемалар, постерлер, плакаттар немесе кеңестер болуы мүмкін карталар жоқ жабық оқу сыныбында жүргізіледі.

Жиынтық бағалауды бастамас бұрын нұсқаулық оқылып, оқушыларға жұмысты аяқтауға қанша уақыт бөлінетіні туралы хабарланады. Білім алушыларға жұмысты орындау кезінде бір-бірімен сөйлесуге болмайды. Білім алушылар жұмысты орындауға кіріспес бұрын нұсқама бойынша сұрақтар қоюға құқылы [6; 7; 8].

Білім алушылар өз бетінше жұмыс істеуі керек және бір-біріне көмектесуге құқығы жоқ. Жиынтық бағалау жүргізу кезінде білім алушылар оларға көмектесетін қосымша ресурстарға, мысалы, сөздіктерге немесе анықтамалық әдебиеттерге қол жеткізе алмауы тиіс (ерекшелік бойынша бұл ресурсқа рұқсат етілген жағдайлардан басқа).

Шешім жазбалары мұқият орындалуы керек. Оқушыларға өшіргішпен жуудың орнына қате жауаптарды қарындашпен сызып тастау ұсынылады.

Жиынтық бағалауға бөлінген уақыт аяқталғаннан кейін білім алушылар жұмысты уақытында тоқтатып, өз қаламдарын, партаға қояды [9].

Материалдар мен әдістер

Оқушының қорытынды бағасы бөлім үшін жиынтық бағалау қорытындылары бойынша жасалады және әрбір өлшем шарт бөлінісінде оқу жетістіктерінің деңгейін көрсетеді.

Тапсырмаларды құрастыру қағидалары

Бағалау тапсырмаларын құрастырғанда Блум таксономиясын басшылыққа алған жөн:

– Білу және түсіну (1–2 деңгей): Дифференциалдық теңдеудің анықтамасын білу, ретін анықтау, берілген функцияның шешім екенін тексеру;

– Қолдану (3-деңгей): Айнымалылары бөлінетін дифференциалдық теңдеулерді шешу, Коши есебін шығару;

– Талдау және синтез (4–5 деңгей): Физикалық немесе геометриялық есептерді дифференциалдық теңдеулер арқылы модельдеу.

1-кесте – Білім алушылардың оқу жетістіктері деңгейлерінің критерийлері

Деңгей	Сипаттамасы	Балл
Төмен	Теңдеу түрін ажыратады, қарапайым есептеулерді орындайды.	1–3
Орташа	Айнымалыларды бөледі, интегралдарды дұрыс есептейді.	4–6
Жоғары	Коши есебін толық шешеді, қолданбалы есепті модельдейді.	7–10

Егер тапсырмаларды 10 баллдан артық бағаласак, пропорция арқылы сәйкестік сақтаған жөн.

2-кесте – Білім алушылардың оқу жетістіктері деңгейлерінің сипаттамасы

Деңгейлер	Тапсырманы орындау пайызы	Сипаттамасы
Төменгі деңгей	0 %–39 %	Пәндік терминдер мен ұғымдарды қарапайым білу мен түсінуді көрсетеді қарапайым тапсырмаларды орындайды және тікелей нұсқауларға сәйкес орындау процедураларына сәйкес келеді әр түрлі формаларға негізделген қарапайым тұжырымдарды тұжырымдайды үлгілерді қарапайым тапсырмаларда таниды

Орташа деңгей	40%-84%	<p>Пәндік терминдер мен ұғымдарды жеткілікті білу мен түсінуді көрсетеді типтік тапсырмаларды орындайды, таныс және кейбір бейтаныс жағдайларда өз білімін сәтті қолдана алады ақпаратты жинақтайды және жартылай негіздемемен тұжырым жасайды, алынған нәтижелерге дәлелдер келтіре алады</p> <p>типтік тапсырмалардағы үлгілерді таниды, ұсынады және стандартты шешімдерді қолданады бекітілген есептер жиынтығын шешу үшін оқу бағдарламасының басқа салаларынан білімді, қосымша дағдыларды біріктіреді</p>
Жоғары деңгей	85%-100%	<p>Пәндік терминдер мен ұғымдарды терең білу мен түсінуді көрсетеді; күрделі тапсырмаларды орындайды және білімді табысты қолданады; әр түрлі көздерден алынған ақпаратты жинақтайды, алынған нәтижелерге нақты, логикалық дәйекті дәлелдер келтіреді</p> <p>күрделі тапсырмалардағы шаблондарды таниды, балама және стандартты емес шешімдерді ұсынады және қолданады міндеттердің кең спектрін шешу үшін оқу бағдарламасының басқа салаларындағы білімді, түрлі стратегияларды қолданады, алынған нәтижелердің маңыздылығы мен негізділігін бағалайды.</p>

Нәтижелер мен талқылау

1 Жиынтық бағалаудың спецификациясы

Ұзақтығы-40 минут

Ұпай саны-25

Тапсырманың түрі: ТЖ-толық жауапты талап ететін тапсырмалар

2. Бағалау тапсырмаларының үлгілік құрылымы

Жиынтық бағалау жұмысын 4–5 тапсырмадан құрастыру тиімді:

1-тапсырма: Теориялық негіз (Білу)

Мақсаты: Дифференциалдық теңдеудің ретін анықтау.

Сұрақ: Берілген $y'' - 10y' + 25y = 3e^{5x}$ теңдеуінің ретін анықтаңыз және оның сызықтық екенін немесе емес екенін түсіндіріңіз.

2-тапсырма: Функцияны тексеру (Түсіну)
 Мақсаты: Шешімнің дұрыстығын тексеру.
 Сұрақ: $y = Ce^{3x}$ функциясы $y' - 3y = 0$ дифференциалдық теңдеуінің шешімі болатынын көрсетіңіз.

3-тапсырма: Айнымалылары бөлінетін теңдеулер (Қолдану)
 Мақсаты: Теңдеуді интегралдау арқылы жалпы шешімді табу.
 Сұрақ: $\sin x dx - y^3 dy = 0$ теңдеуінің жалпы шешімін табыңыз.

4-тапсырма: Коши есебі (Қолдану/Талдау)
 Мақсаты: Бастапқы шарттарды пайдаланып, дербес шешімді табу.
 Сұрақ: $y'' - 16y = 0$ теңдеуі үшін $y(1) = 4$ шартын қанағаттандыратын дербес шешімді табыңыз.

5-тапсырма: Қолданбалы есеп (Синтез)
 Мақсаты: Модельдеу дағдысын тексеру.
 Сұрақ: Материалдық нүкте $v(t) = ds/dt$ жылдамдықпен қозғалады. Егер $v(t) = 3t^2 + 2$ болса және $t=0$ болғанда $s=0$ болса, оның $S = s(t)$ қозғалыс заңын табыңыз.

Жиынтық бағалаудың құрылымы
 Бұл нұсқа 3 тапсырмадан тұрады, оның ішінде толық жауабы бар сұрақтар бар.
 Толық жауапты талап ететін тапсырмаларда білім алушы ең жоғары балл алу үшін тапсырмаларды шешудегі іс-қимылдардың барлық реттілігін көрсетуі тиіс.
 Білім алушының математикалық тәсілдерді бірқатар математикалық мәнмәтіндерде таңдау және қолдану қабілеті бағаланады.
 Тапсырмада бірнеше құрылымдық бөліктер/сұрақтар болуы мүмкін.
 Калькуляторды пайдалануға рұқсат етіледі.

3. Тапсырма:
 Наубайшы тоқаштарды пісірді. Пештен алынған тоқаштардың температурасы 20 минут ішінде 100°C - ден 40°C - ге дейін төмендейді. Ауа температурасы 18°C .
 Берілген шарттарға сәйкес тоқаштарды салқындатудың жалпы теңдеуін жазыңыз. [4 балл]
 Салқындату басталғаннан бастап, қанша уақытта тоқаштардың температурасы 20°C дейін төмендейді ?? [3балл]
 Бөлшек қарапайым гармоникалық қозғалыс жасайды. Бөлшектердің тербеліс центрінен ауытқу t секунд ішінде x метрге тең.
 а) $x = A \cos 7t + B \sin 7t$ келесі дифференциалдық теңдеудің жалпы шешімі екенін көрсетіңіз
 $\frac{d^2x}{dt^2} + 49x = 0$ [3 балл]

б) $x = 3$ егер $t = \frac{\pi}{14}$, $t = \frac{\pi}{14}$, $\frac{dx}{dt} = 2\sqrt{2}$ егер $t = \frac{\pi}{28}$ = .
А мен В мәнін табыңыз. [2 балл]

с) Бөлшектің жылдамдығы нөлге тең болатын ең кіші оң t мәнін табыңыз.
Жауапты 3 маңызды санға дейін жазыңыз. [5 балл]

3. Табыңыз:

а) Дифференциалдық теңдеудің жалпы шешімі

$$\frac{d^2y}{dx^2} - 4\frac{dy}{dx} + 8y = 0 \text{ [4 балл]}$$

мынадай шарттарды ескере отырып, (а) тармақтың дифференциалдық теңдеуінің жеке шешімі:

$$y = 0 \text{ и } \frac{dy}{dx} = 2, \text{ мұнда } x=0. \text{ [4 балл]}$$

3-кесте – «Дифференциалдық теңдеулер» тақырыбы бойынша жиынтық бағалау тапсырмаларының сипаттамасы

Бөлім	Тексерілетін мақсат	Ойлау дағдыларының деңгейі	Тапсырмалар саны	Тапсырма №	Тапсырма түрі	Орындалу уақыты	Үнай	Бөлім бойынша жалпы ұпай
Дифференциал теңдеулер	<ul style="list-style-type: none"> дифференциалдық теңдеулер турамы негізгі ұғымдарды білу 	Білу және түсіну	1	1	ТЖ	15 мин	7	25
	<ul style="list-style-type: none"> фигуралық есептерді шешуде дифференциалдық теңдеулерді қолдану 	Дағдылардың жоғары тәртібi						
	<ul style="list-style-type: none"> бөлігетін айнымалылары бар дифференциалдық теңдеулерді шешу 	Қолдану	1	2	ТЖ	15 мин	10	
	<ul style="list-style-type: none"> гармоникалық тербеліс теңдеудің құру және шешу 	Дағдылардың жоғары тәртібi						
Қорытынды	<ul style="list-style-type: none"> екінші ретті сызықты біртекті дифференциал теңдеулерді шешу ($ay''+by'+cy=0$, мұндағы a,b,c тұрақты) дифференциалдық теңдеудің жеке және жалпы шешімдерінің анықтамаларын білу 	Қолдану	1	3	ТЖ	10 мин	8	25
		Білу және түсіну						
Қорытынды			3			40 мин	25	25

4-кесте – Балл қою сызбасы

№	Жауап	Балл	Қосымша ақпарат
1а	$\frac{dT}{dt} = k(T - 18), \frac{dT}{T - 18} = k dt$	1	
	$\int \frac{dT}{T - 18} = k \int dt$	1	Көрінетін немесе болжанып
	$\ln T - 18 = kt + C$	1	Үнай функциялардың біреуін дұрыс интеграциялауға қойылады
	$T = C_1 e^{kt} + 18$ немесе эквивалент	1	C жауабы қабылданады
1б	$t = 0, C_1 = 62$, болғанда	1	
	$t = 20, T = 40C,$	1	Немесе эквивалент
	$e^x = \frac{11 \cdot 20}{41}$		
	$T = 20C,$ $20 \ln \frac{41}{11} \approx 56$ мин $t = \frac{1}{\ln \frac{41}{11}} \approx 56$ мин	1	
2а	$x' = \frac{dx}{dt} = -7A \sin 7t + 7B \cos 7t = 0$	1	
	$x' = \frac{dx}{dt} = -49A \cos 7t - 49B \sin 7t = 0$	1	
	0 алу үшін $\frac{dx}{dt}$ и 49x алмастырады	1	
2б	$B = 3$	1	
	$A = \frac{17}{7}$	1	Немесе эквивалент
2с	$v = x'$ немесе $-7A \sin 7t + 7B \cos 7t = 0$	1	
	$tg 7t = k$		
	$tg 7t = \frac{21}{17}$	1	Жауап А және В мәндерімен қабылданады
	$7t = \arctg \frac{21}{17}$	1	
	$t = 0,127$	1	
3а	$k^2 - 4k + 8 = 0$	1	
	$D < 0$	1	
	$k = 2 + 2i$	1	
	$y = e^{2x}(C_1 \cos 2x + C_2 \sin 2x)$	1	
	$y' = (e^{2x})' \cdot (C_1 \cos 2x + C_2 \sin 2x) + e^{2x} \cdot (C_1 \cos 2x + C_2 \sin 2x)'$	1	
3б	$y(0) = 2, C_1 + C_2$	1	
	$y'(0) = 0, C_1 = 0$	1	
	$y = e^{2x} \sin 2x$	1	
Жалпы:		25	

5. Әдістемелік кеңестер

Интегралдау дағдысы: Оқушылардың дифференциалдық теңдеулерді шешуі олардың интегралдарды қаншалықты меңгергеніне тікелей байланысты. Сондықтан бақылау жұмысы алдында интегралдау әдістерін қайталап алу қажет.

Көрнекілік: Графикалық интерпретацияны қолдану маңызды. Мысалы, дифференциалдық теңдеулердің шешімдері – интегралдық қисықтар (интегралдық отбасы) екенін түсіндіру үшін қолдану оқушылардың түсінігін арттырады.

Кері байланыс: Оқушылар қате жіберген тұста тек баға қоймай, қай жерде қателік кеткенін (мысалы, интегралдау тұрақтысы $\$C\$$ -ны ұмыту немесе бастапқы шартты дұрыс қолданбау) көрсеткен жөн.

Қорытынды

Мұндай тапсырмалар оқушылардың дифференциалдық теңдеулермен танысуын, оларды шешу машықтарын, сыйымдылықтарын арттыруға көмектеседі. «Дифференциалдық теңдеулер» тақырыбы бойынша 11-сынып оқушыларына арналған жиынтық бағалау тапсырмаларын құрастыру кезінде оқу бағдарламасының талаптарын және оқушылардың танымдық деңгейлерін ескере отырып, тапсырмалар дайындалды.

Бөлім үшін жиынтық бағалау бойынша орындалған жұмыстың нәтижелері білім алушыға түсінікті болуы және оны одан әрі оқуға ынталандыруы тиіс. Дайындық сабақтар кезінде келесіні ескеру керек

– Тапсырмалардың деңгейлері оқушылардың дайындық деңгейіне сәйкес болуы үшін әртүрлі күрделілік дәрежесінде даярлануы керек.

– Командалық жұмыс оқушының ынтымақтастығын дамытуға арналған, әрі жобалау жұмысы практикалық дағдыларды нығайтады.

– Тапсырмалар орындау кезінде оқушылардың уақытын ескеру қажет, сондықтан тапсырмалардың күрделілігі мен орындалу уақыты дұрыс теңестірілуі тиіс.

Сонымен қатар физикалық модельді құрап, дифференциалдық теңдеулердің қолданылуын көрсетіңіз. Мысалы:

– Термодинамика, механика немесе биологиялық өсу процестері бойынша модель құрыңыз.

– Модельдің математикалық формасын жазыңыз.

Модельде қаржылық қатердің көрсеткішін сипаттайтын модельді қарастыруға болады. Оның шешімін тауып және қаржылық шешімдер қабылдаудағы маңызын көрсетуге болады,

Ең тиімдісі – оқушыларды жобалық жұмысқа икемдеу. Оқушылар топтарға бөлініп, дифференциалдық теңдеулердің қандай бір нақты қолдану саласы бойынша (медицинаның, экологияның, экономика немесе физиканың) зерттеу жүргізу керек. Нәтижесінде:

– Зерттеудің мақсатын анықтау;

– Теориялық негіздермен танысу;

– Дифференциалдық теңестіктерді қолдану арқылы модельдер құру;

– Нәтижелерді ұсыну.

Дифференциалдық теңдеулер жалпы математика ғылымы үшін маңыздылығы жағынан ең жоғарғы тақырыптардың бірі болып саналады. Себебі бұл тақырып арқылы тек математикалық есептер, жағдайлар, мәселелердің шешімі ғана емес, басқа да түрлі салалар мен ғылыми пәндердің есептерінің жауабын табу үшін қажет [10; 11]. Бұл жұмыс осы тақырыпты толық түсіндіріп, анықтамаларды дәлелдей отырып, практикада қолданылуын түсіндіру мақсатында жазылып отыр.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Центр педагогических измерений. Модель КО_НИШ_2016-2017 уч.год Центр педагогических измерений. Методические рекомендации по суммативному оцениванию, Астана: АОО НИШ, 2016-2017 уч.год.

2 Журнал критериального оценивания. – [Электронды ресурс]. – <http://krg.nis.edu.kz> (дата доступа: 28.08.2017)

3 **Абдыманапов С. А., Есбаева Г. А.** Руководство к решению задач по дифференциальным уравнениям. Учебное пособие. – Караганда : КАРГУ, 1991.

4 **Әбілқасымова, А. Е., Умиралханов, А. Н., Жадраева, Л. У., Тұяқов, Е. А., Кенжебек, Х. Т.** Орта мектепте дифференциалдық теңдеулерді оқыту барысында қолданбалы есептерді шығару әдістемесі // Павлодар мемлекеттік университетінің хабаршысы. – 2023. – № 2. – 126–137 б.

5 **Әбілқасымова, А. Е., Корчевский, В. Е., Жұмағұлова, З. Ә.** Алгебра және анализ бастамалары: Жалпы білім беретін мектептің жаратылыстану-математика бағытындағы 11-сыныбына арналған оқулық. / Алматы: Мектеп, 2020. – 256 б.

6 **Асланов Р. М.** Методическая система обучения дифференциальным уравнениям в педагогическом вузе. – М. – 1997. – 236 с.

7 **Баврин Г. И.** Усиление профессиональной и прикладной направленности преподавания математического анализа в педвузе. На материале курса «Дифференциальные уравнения». – М. – 2018. – 202 с.

8 **Гербеков Х.А.** Дифференциальные уравнения в системе профессиональной подготовки учителя математики в педвузе. – М. – 2015. – 117 с.

9 **Баврин И. И.** Краткий курс высшей математики для химико-биологических и медицинских специальностей. – М. : Физматлит. – 2003. – 328 с.

10 **Боженкова Л. И., Соколова Е. В.** Организация самостоятельной работы школьников в обучении геометрии // Вестник Торайғыров университета. Серия: физика, математика и компьютерные науки. – 2025. – № 1. – С. 244–264. – <https://doi.org/10.48081/jugg4273>

11 **Косыбаева А. К., Нурумжанова К. А.** Трансдисциплинарлық когнитивтік принциптер негізінде математика және физика пәнін оқытудың тиімділігін арттыру технологиясын әзірлеу // Вестник Торайғыров университета Серия: физика, математика и компьютерные науки. – 2024. – № 2. – <https://doi.org/10.48081/nlen3960>

REFERENCES

1 Centr pedagogicheskix izmerenij. [The Center for Pedagogical Measurements] Model` KO_NISh_2016-2017 uch.god Centr pedagogicheskix izmerenij. Metodicheskie rekomendacii po summativnomu ocenivaniyu, Astana: AOO NISh, 2016-2017 uch.god.

2 Zhurnal kriterial`nogo ocenivaniya. [Journal of critical assessment]. – [Electronic resource]. – <http://krg.nis.edu.kz> (data dostupa: 28.08.2017)

3 **Abdy`manapov S. A., Esbaeva G. A.** Rukovodstvo k resheniyu zadach po differentsial`ny`m uravneniyam. Uchebnoe posobie. [A guide to solving problems in differential equations] Text. – Karaganda: KarGU, 1991.

4 **Abilqasy`nova, A. E., Umiralxanov, A. N., Zhadraeva, L. U., Tyyakov, E. A., Kenzhebek, X. T.** Orta mektepte differentsialdy`k teңdeulerdi oqu`tu bary`sy`nda qoldanbaly` esepтерdi shy`garu әdistemesi [Methodology for solving applied problems in the course of teaching differential equations in high school] // Pavlodar memlekettik universitetiniң xabarshy`sy`. – 2023. – № 2. – 126–137 p.

5 **Abilqasy`nova, A. E., Korchevskij, V. E., Zhymaylova, Z. Ә.** Algebra zhәne analiz bastamalary` : Zhalpy` bilim беретin mekteptiң zharaty`ly`stanu-matematika bary`ty`ndary` 11-sy`ny`by`na арналған оқулық. [Algebra and analysis initiatives: a textbook for the 11th grade of a comprehensive school in the natural and mathematical direction] / Almaty` : Mektep. – 2020. – 256 b.

6 **Aslanov, R. M.** Metodicheskaya sistema obucheniya differentsial`ny`m uravneniyam v pedagogicheskom vuze. [Methodical system of teaching differential equations at a pedagogical university] – Moscow : 1997. – 236 p.

7 **Bavrin, G. I.** Usilenie professional`noj i prikladnoj napravlenosti prepodavaniya matematicheskogo analiza v pedvuze. Na materiale kursa «Differentsial`ny`e uravneniya». [Strengthening the professional and applied orientation of teaching mathematical analysis at a pedagogical university. Based on the course «Differential equations7]. – Moscow : 2018. – 202 p.

8 **Gerbekov X. A.** Differentsial`ny`e uravneniya v sisteme professional`noj podgotovki uchitelya matematiki v pedvuze. [Differential equations in the system of professional training of a mathematics teacher at a pedagogical university] – Moscow: 2015. – 117 ;.

9 **Bavrin, I. I.** Kratkij kurs vy`sshej matematiki dlya ximiko-biologicheskix i medicinskix special`nostej. [A short course in higher mathematics for chemical, biological and medical specialties] – Moscow : Fizmatlit, 2003. – 328 p.

10 **Bozhenkova, L. I., Sokolova, E. V.** Organizaciya samostoyatel`noj raboty` shkol`nikov v obuchenii geometrii [Organization of independent work of schoolchildren in teaching geometry] // Vestnik Torajgy`rov universiteta. Seriya: fizika, matematika i komp`yuterny`e nauki. – 2025. – № 1. – P. 244–264. – <https://doi.org/10.48081/jugg4273>

11 **Kosy`baeva A. K., Nurumzhanova K. A.** Transdisciplinarly`k kognitivtik principтер negizinde matematika zhәne fizika pәnin oqu`tudy`n tiimdiligin artty`ru texnologiyasy`n әzirleu [Development of technologies for improving the effectiveness of teaching mathematics and physics based on transdisciplinary cognitive principles] // Vestnik Torajgy`rov universiteta Seriya: fizika, matematika i komp`yuterny`e nauki. – 2024. – № 2. – <https://doi.org/10.48081/nlen3960>

15.04.26 ж. баспаға түсті.

19.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

08.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Ж. К. Даниярова¹, Н. Д. Сарбасова², М. С. Бокаева³

^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

³Маргулан университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.

Поступило в редакцию 15.04.26.

Поступило с исправлениями 29.04.26.

Принято в печать 08.06.26.

РАЗРАБОТКА ОЦЕНОЧНЫХ ЗАДАЧ ПО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ УРАВНЕНИЯМ ДЛЯ 11 КЛАССА

В данной статье рассматривается методика составления задач для суммативной оценки по теме «Дифференциальные уравнения». При составлении заданий суммативного оценивания (СОР или СОЧ) по теме «Дифференциальные уравнения» для учащихся 11 класса необходимо учитывать требования учебной программы и познавательный уровень учащихся. В работе представлена методика составления задач для итогового оценивания для учащихся 11 класса школы-лицея по теме «Дифференциальные уравнения». В работе рассматриваются основные виды дифференциальных уравнений, методы их решения, а также критерии оценивания и способы формативного и суммативного оценивания для определения уровня знаний учащихся. При выборе задач предлагаются задания, направленные на повышение логического мышления, творческих навыков и математической грамотности учащихся. Он предоставляет инструкции для преподавателей с помощью практических примеров и примеров заданий. Результаты выполненной работы по суммативному оцениванию для раздела должны быть понятны обучающемуся и стимулировать его к дальнейшему обучению. Обратная связь

должна содержать информацию о достигнутом уровне учебных достижений обучающихся. Форма информирования обучающихся и родителей определяется учителем самостоятельно. В статье приведена методика и примеры составления заданий по данной теме.

Ключевые слова: критериальное оценивание, СОР, СОЧ, дескрипторы, критерии успеха, проверяемые навыки.

*Zh. K. Daniyarova¹, N. D. Sarbasova², M. S. Bokayeva³

^{1,2}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

³Margulan University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 15.04.26.

Received in revised form 19.04.26.

Accepted for publication 08.06.26.

DEVELOPMENT OF EVALUATION PROBLEMS IN DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR 11TH GRADE

This article discusses the methodology for composing problems for summative estimation on the topic «Differential equations». When composing summative assessment tasks (SAS, SAQ) on the topic «Differential equations» for 11th grade students, it is necessary to take into account the requirements of the curriculum and the cognitive level of students. The paper presents a methodology for composing tasks for final assessment for 11th grade students of the lyceum school on the topic «Differential equations». The paper discusses the main types of differential equations, methods for solving them, as well as assessment criteria and methods of formative and summative assessment to determine the level of knowledge of students. When choosing tasks, tasks aimed at improving logical thinking, creative skills and mathematical literacy of students are offered. It provides instructions for teachers through practical examples and sample assignments. The results of the work performed on the summative assessment for the section should be understandable to the student and encourage him to continue learning. The feedback should contain information about the achieved level of academic achievements of the students. The form of informing students and parents is determined by the teacher independently. The article provides a methodology and examples of creating assignments on this topic.

Keywords: critical assessment, SAS, SAQ, descriptors, success criteria, testable skills.

FTAMP 27.01.45

DOI

*Қ. Р. Тайболдина¹, Д. М. Оспанова²,
А. Р. Сыдықова³, Ш. Ұ. Асқар⁴

^{1,2,3,4}Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы, Семей қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8645-1226>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6131-4113>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7046-6924>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9200-434X>

*e-mail: k.taiboldina@shakarim.kz

ОЛИМПИДАЛЫҚ ЕСЕПТЕР АРҚЫЛЫ ДАРЫНДЫ ОҚУШЫЛАРДЫҢ ЛОГИКАЛЫҚ ОЙЛАУЫН ДАМУДАҒЫ АДАМДЫҢ ӘДІСТЕМЕЛІК МОДЕЛІ

Олимпиадалық есептерді шығару - оқушылардың пәнге деген ынтасын арттырады, математикаға, оның қолданылу саласына деген тұрақты қызығуын оятады, бағдарламалық материалды терең игеруіне және өз білімін тереңдетуге әсер етеді, оқушылар қабілетінің мейіліне кемелдене түсуіне мүмкіндік береді. Бұл мақалада жалпы орта білім беру мектептерінде қызмет атақарытын математика мұғалімдеріне арналған, дарынды оқушыларды математика пәнінен оқытуда олимпиадалық есептерді жүйелі қолдану арқылы логикалық ойлауды дамытуға бағытталған әдістемелік модель ұсынылады. Ұсынылған модель оқу процесін үш негізгі деңгей бойынша ұйымдастыруды қамтиды: (1) логикалық ойлаудың базалық компоненттерін қалыптастыру (талдау, синтез, салыстыру, жалпылау, абстракциялау, дәлелдеу); (2) оқушыларға олимпиадалық есептерді шығару әдістерін, стратегияларын және эвристикалық тәсілдерін саналы түрде меңгерту; (3) шығармашылық және зерттеушілік есептер арқылы білім алушылардың жоғары деңгейлі ойлау әрекеттерін дамыту. Аталған жұмыста сабақтың ұйымдастыру формалары, есептерді іріктеу критерийлері мен есеп деңгейлеріне қойылатын талаптар, бағалау құралдары және оқушының оқу жетістігін мониторингтеу жүйесі мен рефлексия жүргізу тетіктері сипатталған. Мақала нәтижесінде олимпиадалық есептерді қолданудың тиімділігі логикалық операцияларды дамыту, дәлелдеу мәдениетін қалыптастыру, шешімдердің көпнұсқалылығын игеру

және метатанымдық дағдыларды жетілдіру және тұрақты оқу мотивациясын қалыптастыру тұрғысынан теориялық және практикалық негізде айқындалады. Мақалада ұсынылған әдістемелік модель олимпиадалық есептерді мақсатты, жүйелі, деңгейлік және рефлексиялық тұрғыда қолдануға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: дарынды оқушы, олимпиадалық есеп, логикалық ойлау, дәлелдеу, әдістемелік модель, метатаным, проблемалық оқыту.

Кіріспе

Қазіргі білім беру жүйесінде математика пәні тек есептеу дағдысын қалыптастырумен шектелмейді, ол – логикалық ойлау, дәлелдеу мәдениеті, құрылымдық талдау, модельдеу және стратегия құру сияқты жоғары деңгейлі интеллектуалдық әрекеттерді дамытудың негізгі құралы. Осы тұрғыда дарынды оқушыларды оқыту ерекше әдістемелік тәсілді талап етеді. Дарынды оқушының танымдық мүмкіндігі жоғары болғанымен, ол әрқашан жүйелі ойлау дағдыларын автоматты түрде меңгере бермейді. Көп жағдайда дарынды оқушыларда жылдам шешім табу басым болып, дәлелдеу, негіздеу, шешімнің дұрыстығын тексеру, баламалы тәсілдерді қарастыру сияқты дағдылар төмен деңгейде қалыптасады.

Дарынды оқушылармен жұмыс жүргізудің тиімді құралдарының бірі – конкурстық есептер. Ондай есептер стандартты алгоритммен шешілмейді, олар оқушыны ойлануға, ізденуге, болжам жасауға, логикалық қорытынды құруға мәжбүр етеді. Бұл есептер арқылы оқушыда тек математикалық білім ғана емес, сонымен бірге жалпы логикалық мәдениет, стратегиялық ойлау дамиы. [1, 29–32-бб.]

Сондықтан зерттеу жұмысының өзектілігі: дарынды оқушылардың логикалық ойлауын дамытуда олимпиадалық есептерді қолданудың жүйелі әдістемелік моделін құру қажеттілігімен анықталады.

Мақаланың мақсаты: олимпиадалық есептерді жүйелі қолдану арқылы дарынды оқушылардың логикалық ойлауын дамытуға арналған әдістемелік модель ұсыну және оның құрылымдық элементтерін сипаттау.

Міндеттері:

- Білім алушылардың логикалық ойлауының негізгі компоненттерін анықтау;
- Олимпиадалық есептерді сипаттау;
- Дарынды оқушыларға арналған әдістемелік модельдің құрылымын ұсыну;
- Есептерді іріктеу критерийлерін анықтау;
- Бағалау және мониторинг жүйесін ұсыну.

Материалдар мен әдістері

Дарынды оқушы – белгілі бір салада жоғары нәтижеге жетуге әлеуеті бар, оқу-танымдық белсенділігі жоғары, күрделі мәселелерді шешуге бейім тұлға. Біз білетіндей, дарындылық математикада көбіне келесі қасиеттермен сипатталады:

- логикалық байланыстарды тез анықтау;
- абстрактілі ойлаудың жоғары деңгейі;
- заңдылықтарды табуға ұмтылу;
- есеп шығаруда икемділік;
- дәлелдеу мен негіздеуге қызығушылық.

Логикалық ойлау – ойлау процесінің жүйелілігі, дәлдігі, бірізділігі, негізділігімен сипатталатын қабілет [2, 56-б.]. Ол келесі логикалық операциялар арқылы жүзеге асады:

- талдау (анализ);
- жинақтау (синтез);
- салыстыру;
- жалпылау;
- нақтылау;
- индукция және дедукция;
- дәлелдеу және терістеу.

Дарынды оқушыда логикалық ойлау табиғи түрде жоғары деңгейде көрінуі мүмкін, алайда оны әдістемелік жетелеумен дамыту – жоғары нәтижеге жеткізетін негізгі шарттардың бірі.

Нәтижелер және талқылау

Олимпиадалық есептерді оқу процесінде қолданудың бірнеше маңызды артықшылықтары бар:

Ойлау әрекетін белсендіру. Олимпиадалық есептер оқушыны дайын алгоритмнен тыс әрекет етуге мәжбүр етеді. Бұл кезде оқушы:

- болжам жасайды;
- дәлел іздейді;
- қарама-қайшылықты тексереді;
- бірнеше жолды салыстырады.

Білім алушының дәлелдеу мәдениетін қалыптастыру. Олимпиадалық есептерде жауабын табу жеткіліксіз. Табылған жауаптың дұрыстығы дәлелмен бекітіледі. Бұл оқушыда математикалық тіл, логикалық құрылым, аргумент келтіру қабілетін дамытады [3, 39–б.; 4, 76–82-бб.].

Метатанымдық дағдыларды дамыту. Оқушы өз ойлауын бақылай бастайды: «Мен қандай әдісті қолдандым? Неге дәл осы жол тиімді болды? Басқа тәсіл бар ма?» Бұл – метатанымдық деңгейдің дамуы.

Қателікпен жұмыс мәдениеті. Олимпиадалық есептерде қателесу – табиғи процесс. Дұрыс ұйымдастырылған оқу барысында қателік жазалау емес, керісінше жаңа түсінікке жетелейтін ресурс ретінде қарастырылады.

Ұсынылып отырған әдістемелік модель дарынды оқушылардың логикалық ойлауын дамытуға бағытталған және 4 негізгі компоненттен тұрады:

- Мақсаттық компонент
- Мазмұндық компонент
- Процестік-ұйымдастырушылық компонент
- Бағалау-рефлексиялық компонент

Негізгі мақсат – олимпиадалық және конкурстық есептер арқылы оқушының логикалық ойлауын жүйелі дамыту. Осыған қол жеткізу үшін нақты мақсаттар анықталады:

- логикалық операцияларды саналы қолдану;
- дәлелдеу құрылымын меңгерту;
- стратегия және әдіс таңдау дағдысын дамыту;
- шығармашылық шешім табуға үйрету.

Мазмұндық компонент, олимпиадалық есептердің негізгі бағыттарын қамтиды:

- сандар теориясы (модуль, бөлінгіштік, қалдық);
- алгебралық түрлендірулер және теңсіздіктер;
- комбинаторика (санақ, принциптер);
- геометрия (инвариант, симметрия, түрлендіру);
- логикалық ойындар, стратегия есептері.

Мазмұнды іріктеу кезінде басты қағида: есептің күрделілігі емес, оның логикалық әдісі маңызды [5, 142-б.]

Есеп: $13 + 13^2 + 13^3 + 13^4 + \dots + 13^{2001} + 13^{2002}$ қалдықсыз 7-ге бөлінетінін дәлелдеңіз.[1, 98-б.]

Шешуі. Қатардың 1-ші және 2-ші қосылғыштарды 3-ші және 4-ші қосылғыштарды жұптайық.

$$(13 + 13^2) + (13^3 + 13^4) + \dots + (13^{2001} + 13^{2002})$$

Теңдеуіміз мынадай түрге келді

$$13 + 13^2 + 13^3 + 13^4 + \dots + 13^{2001} + 13^{2002}$$

ақырлы қатар. Жұпталған түрдегі қатарымыздың бірінші жақшасынан 13^3 -ті екінші жақшасынан -ты және үшінші жақшасынан 13^{2001} дәрежесін жақшаның сыртына шығарайық.

Сонда: $13(1 + 13) + 13^3(1 + 13) + \dots + 13^{2001}(1 + 13)$ Біз $1+13=14$ екенін ескере отырып:

$13 * 14 + 13^3 * 14 + \dots + 13^{2001} * 14$ аламыз.

14-ті жақшаның сыртына шығарып, келесі қатарды аламыз.

$$14(13 + 13^3 + \dots + 13^{2001})$$

Көбейткіштердің біреуі жетіге бөлінетіндіктен, көбейтінді де 7-ге қалдықсыз бөлінеді

Процестік-ұйымдастырушылық компонент - оқыту формалары мен сабақ құрылымын қамтиды.

Сабақтың ұсынылатын құрылымы (45 минуттық үйірме үлгісі)

Қызықты кіріспе есеп (3–5 мин)

Негізгі әдісті ашатын есеп (7–10 мин)

Сол әдісті бекітетін есеп (12–15 мин)

Жоғары деңгейлі бір есеп (10–15 мин)

Рефлексия және қорытынды (4–7 мин)

Мысалы: Жазықтық 2 түске боялған. Арасы 1 метр болатын түстері бірдей екі нүкте табылады ма? [6]

Оқытушыға ұсынылатын әақыт ережесі:

3 минут – жеке жұмыс

2 минут – Көмек, Дирихле принципін есіңе түсір

3 минут -талдау

Шешуі. Түстер саны 2 болғандықтан, 2 нүктеден көп болатын фигура табуымыз керек. Қабырғасы 1 метр болатын теңқабырғалы үшбұрыш жарайды. Үшбұрыштың төбелерін «қояндар», ал түстерді «торлар» етіп алсақ, Дирихле принципі бойынша, арасы 1 метр болатын және бірдей түске боялған екі төбе табылады.

Оқытуға ұсынылатын тиімді әдістер:

– проблемалық оқыту;

– эвристикалық;

– жұптық және топтық талқылау;

– «бір есеп – бірнеше шешім» тәсілі;

– дәлелдеу құрылымын моделдеу;

Бағалау-рефлексиялық компонент. Дарынды оқушыларды бағалауда тек дұрыс жауап емес, ойлау сапасы бағалануы тиіс [7, 24-б.]. Сондықтан келесі критерийлер қолдану ұсынылады:

– шешімнің логикалық бірізділігі;

– дәлелдің толықтығы;

– әдістің тиімділігі;

– баламалы шешім ұсыну;

– қатені тауып түзету.

Олимпиадалық есептерді іріктеу критерийлері. Әдістемелік модельдің табысты болуы есептерді дұрыс таңдауға тәуелді. Ол үшін келесі критерийлер ұсынылады:

- Әдістік құндылық – есеп белгілі бір логикалық әдісті ашуы керек;
- Деңгейлік икемділік – есептің жеңіл және күрделі нұсқасы болуы мүмкін;
- Бірнеше шешім мүмкіндігі – түрлі тәсілдермен шешілуі;
- Қателікке мүмкіндік беру – оқушының қате болжамын талдауға қолайлы;
- Мотивациялық тартымдылық – қызықты сюжет немесе күтпеген нәтиже.

Қарастырылып отырған модельді жүзеге асыру үшін көңіл бөлуді талап ететін маңызды факторлардың бірі тапсырма күрделілік деңгейі.

Дарынды оқушылармен жұмысты ұйымдастырудағы тапсырмалардың негізгі педагогикалық ережелеріне де көңіл бөлген жөн. Алғашқы тапсырмалар қатарында оқушылардың басым бөлігі орындай алатын 1–2 есеп болуы тиіс, яғни олардың қиындық коэффициенті шамамен 10–30% болуы керек. Олимпиада мәтінінің ортасына орташа деңгейден жоғары күрделілігі бар 2–3 есеп орналасуы керек. Мұндай есептерді шамамен қатысушылардың жартысы шешуі тиіс, яғни олардың қиындық деңгейі 40–60%. (Барлық есептердің үштен бірінен көбірегін шешкен оқушыға әдетте ынталандыру берілуі мүмкін.) Мәтіннің соңында ең қиын 1–2 тапсырма болуы тиіс. Оларды тек санаулы оқушы шеше алады, сондықтан олардың қиындық коэффициенті 70–95% шамасында болады [8, 42-б.; 9, 146-152-бб.].

Дарынды оқушыға күрделі есеп қажет, бірақ шамадан тыс қиын есеп мотивацияны төмендетеді.



1-сурет – Дайындық есептерінің ұсынылатын күрделілік деңгейі

Күрделілік – есептің құрылымымен анықталатын оның объективті сипаттамасы. Есептің күрделілігі мынаған тәуелді:

- оны шешу үшін қажетті ақпарат көлеміне (ұғымдар, тұжырымдар санына),
- есептегі берілгендердің санына,
- олардың арасындағы байланыстар санына,
- есеп шарты бойынша жасалуы мүмкін қорытындылардың санына,
- есепті шешу үшін қажетті тікелей қорытындылар санына,
- шешу барысында қажет болатын өзара байланысқан ой қадамдарының санына,
- есепті шешу кезіндегі ой қорытындыларының ұзындығына,
- шешімдегі жалпы қадамдар санына, қолданылған аргументтерге және т.б.

Қиындық – есеп пен оны шешетін оқушы арасындағы өзара байланыспен анықталатын субъективті сипаттама [10, 139-б.; 11].

Есептің қиындық дәрежесі төмендегілерге тәуелді:

- есептің күрделілігіне (күрделі есеп, әдетте, оқушыларға қиын келеді);
- есепте кездесетін материалды оқып-үйренгеннен кейін өткен уақытқа (1–2 жыл бұрын өткен материал, көбінесе, ұмытылған фактілері бар тапсырмалар оқушыларға қиын);
- осы типте есептерді шешу тәжірибесінің бар-жоқтығына;
- оқушының дамуының деңгейіне

Есепті шешкендер арасындағы оны шешпегендердің үлесі есептің қиындығын анықтайды. Есептің қиындық дәрежесін есептеуге арналған әртүрлі формулалар бар. Олардың ішінен ең қарапайымын қарастырайық:

$$K_t = \frac{n}{p} \cdot 100\%$$

мұндағы:

K_t – қиындық коэффициенті (пайызбен өлшенеді);

n – есепті шеше алмаған оқушылар саны;

p – есепті шешуге қатысқан оқушылар саны, оның ішінде есепке тіпті кіріспегендер де (яғни олимпиадаға қатысушылардың жалпы саны).

Мысалы, Шаршы шеңберге іштей сызылды. Шаршының қабырғаларына диаметрлер ретінде алынып іштей жартышеңберлер салынды. Осы жартышеңберлердің қиылысуында «гүл» тәрізді фигура шықты. Осы гүл жапрақтарының ауданы шаршыдан тыс жатқан негізгі шеңбер ауданына тең екенін дәлелде.

Аталған есеп жалпы орта білім беру мектебінің 9 «а» - 21 оқушы, 9 «б» - 17 оқушы, 9 «г» - 16 оқушысы бар сынып оқушыларына шығаруға ұсынылды. Есепті 9 «а» - 3 оқушы, 9 «б» - 1 оқушы, 9 «г» - 0 оқушы шығарды.

$$K_t = \frac{50}{54} = 92,6$$

Яғни, зерттеу жүргізуші мектептің 9 сынып оқушылар үшін бұл есеп құрделігі 92,6 % құрады.

Дарынды балалармен жұмыс жасайтын оқытушының негізгі міндеттерінің бірі, оқушыларға дәлел жаздыру мәдениетін дамыту маңызды орын алады. Олимпиадалық ойлау дәлелмен аяқталады.[12] Әр сабақта:

- «Неге?» сұрағы міндетті
- дәлел құрылымы көрсетілді ма?
- оқушы өз дәлелін қорғайды.

Бір есеп – бірнеше әдіс. Бұл тәсіл логикалық икемділікті дамытады. Мұғалімнің міндеті – оқушының бір әдіске «жабысып қалмауын» қамтамасыз ету. Сонымен қоса қателікті ресурс ретінде қолдануға дағдылану керек. Қателік арқылы: қай жерде логика бұзылды? қандай шарт ескерілмеді? қалай түзетуге болады? деген сұрақтар талдануы қажет.

Қорытынды

Ұсынылған модельді қолдану нәтижесінде дарынды оқушыларда келесі сапалар қалыптасады:

- логикалық ойлау операцияларының жүйелілігі;
- дәлелдеу және негіздеу дағдысы;
- олимпиадалық әдістерді қолдану тәжірибесі;
- шешімнің бірнеше нұсқасын ұсыну қабілеті;
- метатанымдық рефлексия;
- олимпиадаға дайындық деңгейінің артуы.

Дарынды оқушылардың логикалық ойлауын дамыту – математика пәнін тереңдетіп оқытудың негізгі мақсатының бірі. Олимпиадалық есептер бұл процесте ерекше орын алады, өйткені олар оқушыны дайын үлгімен емес, логикалық құрылыммен ойлауға үйретеді. Мақалада ұсынылған әдістемелік модель олимпиадалық есептерді мақсатты, жүйелі, деңгейлік және рефлексиялық тұрғыда қолдануға мүмкіндік береді. Модельдің негізгі артықшылығы – оқушының тек білімін емес, оның ойлау мәдениетін қалыптастыруға бағытталуы.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Фарков, А. В.** Учимся решать олимпиадные задачи. Геометрия. – 5–11 кл. – М. : Айрис-пресс, 2009. – 128 с.
- 2 **Агаханов, Н. Х.** Математические олимпиады Московской области – М. : Физматкнига, 2006. – 159 с.
- 3 **Канель-Белов, А. Я.** Как решают нестандартные задачи / А. Я. Канель-Белов, А. К. Ковальджи ; под ред. В. О. Бугаенко. – 4-е изд., стер. – М. : МЦНМО, 2008. – 96 с.
- 4 **Кунгожин, М. А.** Жәутіков атындағы математикадан қалалық олимпиада / М. А. Кунгожин, А. М. Кунгожин, Б. Ж. Мамышева, А. Асқар. – Алматы : РФММ, 2024. – 144 б.
- 5 **Потапов, М. К.** Задачи на смекалку / М. К. Потапов, Ю. В. Нестеренко, С. Н. Олехник. – М. : Дрофа, 2006. – 236 с.
- 6 **Тайболдина, Қ. Р., Тоқтарғазынов, М. Р.** Нестандартные задачи, встречающиеся на математической олимпиаде. Научный рецензируемый журнал «Вестник Северо-Казахстанского университета имени Манаша Козыбаева». – 2021. – (1 (50)): Р. 215–221.
- 7 **Чултуков, Н. С.** Таңдамалы есептерді шешіп үйренейік / Н. С. Чултуков, Р. Н. Жумабаев. – Семей : Интеллект, 2010. – 71 б.
- 8 **Фарков, А. В.** Математические олимпиады. 5-6 классы / А. В. Фарков. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : 2013. – 192 с.
- 9 **Баврин, И. И. Фрибус, Е. А.** Занимательные задачи по математике. – М : Гуманит. изд. Центр Владос. – 2003. – 208 с.
- 10 **Балаян, Э. Н.** Готовимся к олимпиадам по математике. 9-11 классы.- Ростов н/Д: Феникс. – 2010. – 318 с.
- 11 **Jung, J. Y., Lee, J.** After the international mathematical Olympiad: The educational/career decisions and the development of mathematical talent of former Australian Olympians //Gifted Child Quarterly. – 2021. – Vol. 65. – № 3. – P. 235–261.
- 12 **He, Y., Xiong, B., Lin, T., Zhang, Y.** Mathematics competitions in China: Practice and influence // ZDM–Mathematics Education. – 2022. – Vol. 54. – № 5. – P. 1087–1100.

REFERENCES

- 1 **Farkov, A. V.** Uchimsya reshat` olimpiadny`e zadachi. Geometriya. 5-11 kl. [Learn to Solve Olympiad Problems. Geometry. Grades 5–11] – M. : Ajrispress, 2009. – 128 p.
- 2 **Agaxanov, N. X.** Matematicheskie olimpiady` Moskovskoj oblasti [Mathematical Olympiads of the Moscow Region] – M. : Fizmatkniga, 2006. – 159 p.
- 3 **Kanel`-Belov, A. Ya.** Kak reshayut nestandartny`e zadachi [How to Solve Nonstandard Problems] / A. Ya. Kanel`-Belov, A. K. Koval`dzhii ; pod red. V. O. Bugaenko. – 4-e izd., ster. – M. : MCzNMO, 2008. – 96 p.
- 3 **Kungozhin, M. A.** Zhautikov aty`ndaу` matematikadan қалалық olimpiada [City Mathematics Olympiad Named After Zhautykov] / M. A. Kungozhin, A. M. Kungozhin, B. Zh. Mamy`sheva, A. Asқar. – Almaty` : RFMM, 2024. – 144 p.
- 4 **Potapov, M. K.** Zadachi na smekalku [Brain Teaser Problems] / M. K. Potapov, Yu. V. Nesterenko, S. N. Olexnik. – M. : Drofa, 2006. – 236 p.
- 5 **Tajboldina, K. R., Toktarғazy`nov, M. R.** Nestandartny`e zadachi, vstrechayushhiesya na matematicheskoy olimpiade [Nonstandard Problems in Mathematical Olympiads]. Nauchny`j recenziruemy`j zhurnal Vestnik Severo-Kazaxstanskogo universiteta imeni Manasha Kozy`baeva. – 2021. –(1 (50)). – P. 215–221.
- 6 **Chultukov, N. S.** Таңдамалы` есептерді шешіп үйренік [Learning to Solve Selected Problems] / N. S. Chultukov, R. N. Zhumabaev. – Semej: Intellekt, 2010. – 71 p.
- 7 **Farkov, A. V.** Matematicheskie olimpiady`. 5-6 klassy` [Mathematical Olympiad Problems. Grades 5–6] / A. V. Farkov. – 6-e izd., pererab. i dop. – M. : 2013. – 192 p.
- 8 **Bavrii, I. I. Fribus, E. A.** Zanimatel`ny`e zadachi po matematike [Interesting Mathematical Problems]. – M : Gumanit. izd. Centr Vlados, 2003. – 208 p.
- 9 Balayan, E`.N. Gotovimsya k olimpiadam po matematike. 9-11 klassy` [Mathematical Olympiad Preparation. Grades 9–11].- Rostov n/D: Feniks, 2010.- 318p.
- 10 **Jung, J. Y., Lee, J.** After the international mathematical Olympiad: The educational/career decisions and the development of mathematical talent of former Australian Olympians //Gifted Child Quarterly. – 2021. – Vol. 65. – № 3. – P. 235–261.

- 11 **He, Y., Xiong, B., Lin, T., Zhang, Y.** Mathematics competitions in China: Practice and influence // ZDM–Mathematics Education. – 2022. – Vol. 54. – № 5. – P. 1087–1100.

19.02.26 ж. баспаға түсті.

16.03.26 ж. түзетулерімен түсті.

05.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Қ. Р. Тайболдина¹, Д. М. Оспанова²,

А. Р. Сыдықова³, Ш. Ұ. Асқар⁴

^{1,2,3,4}Шәкәрім университет, Республика Казахстан, г. Семей.

Поступило в редакцию 19.02.26.

Поступило с исправлениями 16.03.26.

Принято в печать 05.06.26.

**МЕТОДИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ЛОГИЧЕСКОГО
МЫШЛЕНИЯ ОДАРЕННЫХ УЧАЩИХСЯ ЧЕРЕЗ
ОЛИМПИАДНЫЕ ЗАДАЧИ**

Решение олимпиадных задач способствует повышению интереса учащихся к предмету, формирует устойчивую мотивацию к изучению математики и сфер её применения, обеспечивает более глубокое усвоение программного материала и расширение знаний, а также создает условия для максимального развития способностей обучающихся. В статье представлена методическая модель, предназначенная для учителей математики общеобразовательных школ, направленная на развитие логического мышления одарённых учащихся посредством систематического использования олимпиадных задач в обучении математике. Предлагаемая модель предполагает организацию учебного процесса на трёх основных уровнях: (1) формирование базовых компонентов логического мышления (анализ, синтез, сравнение, обобщение, абстрагирование, доказательство); (2) осознанное овладение учащимися методами, стратегиями и эвристическими приёмами решения олимпиадных задач; (3) развитие высших мыслительных действий обучающихся через творческие и исследовательские задачи. В работе описаны формы организации учебных занятий, критерии отбора задач и требования к их уровневой дифференциации, инструменты оценивания, система мониторинга учебных достижений учащихся и механизмы рефлексии. В результате исследования теоретически и практически

обоснована эффективность использования олимпиадных задач с точки зрения развития логических операций, формирования культуры доказательства, освоения многовариантности решений, совершенствования метакогнитивных навыков и устойчивой учебной мотивации. Представленная в статье методическая модель позволяет целенаправленно, системно, уровневым и рефлексивным образом использовать олимпиадные задачи в образовательном процессе.

Ключевые слова: одаренный ученик, олимпийская задача, логическое мышление, аргументация, методическая модель, метапознание, проблемное обучение.

*K. R. Taiboldina¹, D. M. Ospanova², A. R. Sydykova³, Sh. U. Askar⁴
^{1,2,3,4}Shakarim University, Republic of Kazakhstan, Semey.

Received 19.02.26.

Received in revised form 16.03.26.

Accepted for publication 05.06.26.

METHODICAL MODEL FOR DEVELOPING LOGICAL THINKING OF GIFTED STUDENTS THROUGH OLYMPIAD PROBLEMS

Solving Olympiad problems enhances students' interest in the subject, fosters sustained motivation to study mathematics and its fields of application, promotes deeper mastery of the curriculum, and contributes to the further development of learners' abilities. This article presents a methodological model designed for mathematics teachers in general secondary education schools, aimed at developing the logical thinking of gifted students through the systematic use of Olympiad problems in mathematics instruction. The proposed model organizes the learning process at three main levels: (1) the formation of basic components of logical thinking (analysis, synthesis, comparison, generalization, abstraction, and proof); (2) the conscious mastery by students of methods, strategies, and heuristic approaches for solving Olympiad problems; and (3) the development of higher-order thinking skills through creative and research-oriented tasks. The paper describes instructional formats, criteria for selecting problems and requirements for their level differentiation, assessment tools, a system for monitoring students' learning achievements, and mechanisms for reflection. The results theoretically and practically substantiate the effectiveness of using

Olympiad problems in terms of developing logical operations, fostering a culture of mathematical proof, mastering multiple solution strategies, enhancing metacognitive skills, and forming stable learning motivation. The methodological model proposed in the article enables the purposeful, systematic, level-based, and reflective use of Olympiad problems in the educational process.

Keywords: gifted student, Olympic task, logical thinking, argumentation, methodological model, meta-knowledge, problem-based learning.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Айтбеков Бекзат Саматұлы, «Компьютерлік ғылымдар және инженерия» мамандығының магистранты, Бағдарламалық инженерия мектебі, Astana IT University, Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 242736@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-7861-2201>

Агитаев Исамурат Аамандықұлы, Торайғыров университеті, 2 курс магистранті, Faculty of Computer Science, Павлодар қ., 140013, Қазақстан Республикасы, e-mail: colesattac@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-8655-7183>

Алиакбарова Әдемау Аманқызы, Кіші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы, ТОО «Research Group altAir nanolab», Алматы, 050043, ademau@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7428-8279>

Айтқазина Әсия Мұхаметқанқызы, аға оқытушы, магистр, Технологиялық факультеті, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: askoasko1979@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1104-3060>

Акилбеков Әбдіраш Тасанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің профессоры, Астана қ., 01000, Қазақстан Республикасы, e-mail: akilbekov_a@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6366-6705>

Ақжолова Әлия Әбдірайымқызы, PhD, физика кафедрасының қауымд. профессоры, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aaa_25.04.79@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2568-503X>

Алиев Шаршенали, физика-математика ғылымдарының кандидаты, педагогика ғылымдарының докторы, математика кафедрасының профессоры, И. Арабаев атындағы Қырғыз мемлекеттік университеті, Бішкек қ., 720011, Қырғызстан Республикасы, e-mail: alidoc2010@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4704-2953>

Алиева Мөлдір Ермекбайқызы, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, физика кафедрасының аға оқытушысы, Абай атындағы Казак ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>

Аралбаева Гульнара Мырзахановна, PhD, қауымд. профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 01000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aralbayevagulnara@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6827-5567>

Асқар Шырайлым Ұланқызы, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, оқытушы, Stem-білім беру жоғары мектебі, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: s.asqar@shakarim.kz, <https://orcid.org/0009-0003-9200-434X>

Бекмырза Кенжебатыр Жағыпарұлы, техникалық физика кафедрасының оқытушы-зерттеушісі, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kbekmyrza@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8902-8736>

Бокаева Мунира Садвокасовна, магистр математика, Маргулан университет, г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: muni_r@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0893-3043>

Бақытжан Абдурахим Нұржанұлы, «Компьютерлік ғылымдар және инженерия» мамандығы бойынша магистранты, Компьютерлік инженерия мектебі, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: 242809@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-2726-846X>

Бакранова Дина Игоревна, PhD, қауымдастырылған профессор СДУ университеті, Ақпараттық технологиялар және қолданбалы математика мектебі, 040900, Қаскелең қ., Қазақстан Республикасы, Аға ғылыми қызметкер, «Research Group altAir nanolab» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы, 050043, e-mail: dinabakranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0793-9905>

Батешов Ержан Асанұлы, педагогика ғылымдарының кандидаты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, ye.bateshov@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2116-2108>

Бештаева Разила Абзелхановна, аға оқытушы, магистр, Технологиялық факультеті, М.Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: razila-83@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2456-9353>

Дүйсебаева Гүлжан Қасымбайқызы, аға оқытушы, магистр, Технологиялық факультеті, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: duisebayevagk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6000-3295>

Даниярова Жанат Капсаттаровна, п. ф. к., CS факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: daniyarova1957@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2455-1305>

Егемберді Шынар Қанатқызы, аға оқытушы, магистр, Технологиялық факультеті, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Shinar.egemberdi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5910-5032>

Ержан Бауыржан, физика мамандығы бойынша PhD докторанты, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bauyr.phy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-5652-1039>

Жумабекова Венера Нурадиновна, PhD, математика, физика және информатика факультетінің қауымдастырылған профессоры, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh.venera@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7223-5373>

Жартыбаева Мақпал, PhD, Бағдарламалық инженерия мектебінің доценті, Astana IT University, г. Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: M.Zhartybayeva@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3987-9353>

Жукенов Марат Қаратайұлы, Физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, m.zhukenov@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2942-3931>

Жавлиева Ардак Түгелқызы, п. ғ. м., физика кафедрасының оқытушысы, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhavliyeva.11@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4554-7604>

Жельвис Римантас, п. ғ. д., Вильнюс университетінің профессоры, Вильнюс қ., LT-01513, e-mail: rimantas.zelvys@leu.lt, <https://orcid.org/0000-0002-2757-5651>

Какимов Асхат Бекайдарович, PhD, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің оқытушысы, Астана қ., 01000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kakimovaskhat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7511-7443>

Кәкімжанов Дәуір Нұржанұлы, «PlasmaScience» ЖШС ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070018, e-mail: d.kakimzhanov19@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9453-0456>

Карипбаев Жакып Тлеубаевич, PhD, қауымд. профессоры, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 01000, Қазақстан Республикасы, e-mail: karipbayev_zht_1@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4066-1826>

Койшина Акмарал Итемгеновна, «Мұнайхимия инжиниринг» кафедрасының қауымд. профессоры, Ш. Есенов атындағы Каспий технология және инжиниринг университеті, Ақтау қ., 130000, Қазақстан Республикасы, e-mail: akmaral.koishina@yu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5537-9474>

Косов Владимир Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, физика кафедрасының профессоры, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, e-mail: [Kosov Vladimir kosov_vlad_nik@list.ru](mailto:Kosov_Vladimir_kosov_vlad_nik@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8001-1644>

Қоштыбаев Талғат Бектасұлы, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Физика кафедрасының профессоры м.а., Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>

Қайбасова Динара Женисбекқызы, 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>

Кувандикова Алтынай Серикбайқызы, студент Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: altynaikuvandikova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9245-9570>

Кенгесбаева Сара Сапарғалиқызы, ғылыми қызметкер, докторант, Пенсильвания мемлекеттік университеті, Пенсильвания, 16801, Америка құрама штаттары, e-mail: sarakengesbayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6568-4536>

Касенова Толқын Калмахановна, қауымдастырылған профессоры м.а., PhD, Технологиялық факультеті, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз, 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tkkasenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3158-8711>

Маликова Феруза, PhD, қауымдастырылған профессор, Сәтбаев университеті, Алматы, Алматы технологиялық университеті, Алматы, 050060, Қазақстан Республикасы, e-mail: feruza-malikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0527-322X>

Молдабекова Майра Саметовна, п. ғ. д., Жылу физикасы және техникалық физика кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., 050040, e-mail: mairamold@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0652-0253>

Мұрал Айбол, «PlasmaScience» ЖШС кіші ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070018, e-mail: aiholm02@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>

Нәдіров Нұртас Қонысұлы, Аға оқытушы, Техника ғылымдарының Магистрі, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.nadirov@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-6011-8109>

Найманова Динара Сакеновна, Педагогика ғылымдарының кандидаты, «Ақпараттық технологиялар» кафедраның профессоры, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140013, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinasakenkyzy83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4434-4852>

Оспанова Назира Нұрғазықызы, «Ақпараттық технологиялар» кафедраның меңгерушісі, Торайғыров университеті, Павлодар, 140013, Қазақстан Республикасы, e-mail: ospanova.n@teachers.tou.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0100-1008>

Оразмұхамет Нұрал Нұржанұлы, жаратылыстану және география факультетінің студенті, Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: orazmukhametnn@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-6295-4009>

Опахай Серікжан, Хат-хабар алмасу авторы, Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар кафедрасының аға оқытушысы, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: serikzhan.opakhai07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6789-4844>

Оспанова Динара Манаповна, т. ғ. м., академиялық мәселелер жөніндегі департамент директоры, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: ODM-1778@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6131-4113>

Оспанова Жұлдыз Джұмағалиевна, Физика, математика және аспап жасау кафедрасының аға оқытушысы, Computer Science факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhulduz-ospan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7274-3925>

Идрисова Тұнық Қайратқызы, ғылыми қызметкер, «Research Group altAir nanolab» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы, 050043, e-mail: zhamauovatk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-6352-0908>

Ибатаев Жарқын Абыкенұлы, Химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, zh.ibatayev@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2261-222X>

Панғалиев Ербол, Экология және геология кафедрасының аға оқытушысы, Ш. Есенов атындағы Каспий технология және инжиниринг университеті, Ақтау қ., 130000, Қазақстан Республикасы, e-mail: yerbol.pangaliyev@yu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2392-4180>

Рымғалиев Әлішер Ержанұлы, Торайғыров университеті, 2 курс магистранты, Faculty of Computer Science, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: alisher.rymgaliyev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7947-1539>

Рымғалиев Әнел Ержанқызы, Марғұлан университеті оқытушы, Гуманитарлық ғылымдар жоғары мектебі, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: anelrymgaliyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0032-0731>

Рахымбай Лунара Саматқызы, PhD, Аға ғылыми қызметкер, «Research Group altAir nanolab» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы, 050043, e-mail: lunara.rakhymbay@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7924-837X>

Рахадиллов Бауыржан Қорабаевич, PhD, ассоц. профессор "PlasmaScience" ЖШС аға ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан Республикасы, 070018, e-mail: rakhadilovb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>

Смайлов Нуржигит Куралбаевич, профессор, PhD, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Сакибаева Бела Разаховна, магистр, оқытушы-дәріскер, І. Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, 040009, e-mail: bakhorl@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6420-1552>

Сарбасова Нурбану Даукеновна, магистр математика, CS факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurbanu_66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7280-7434>

Сейтханова Айнур Кусбековна, PhD, қауымд. профессоры, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8610-5492>

Сыдықова Аяулым Рақымбекқызы, жаратылыстану ғылымдарының магистрі, оқытушы, Stem-білім беру жоғары мектебі, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: sydykova_ayaulym@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7046-6924>

Сырлыбекқызы Самал, Экология және геология кафедрасының профессоры, Ш. Есенов атындағы Каспий технология және инжиниринг университеті, Ақтау қ., 130000, Қазақстан Республикасы, e-mail: samal.syrlybekkyzy@yu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0260-0611>

Тәубақабал Нұрлыбек Мұратбекұлы, Оқытушы, Техника ғылымдарының Магистрі, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tbkbl.03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0440-6739>

Токжигитова Нургуль Каирбаевна, Торайғыров университеті, PhD, қауымд. профессор, Faculty of Computer Science, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurgul287@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3777-6454>

Татенов Азизбек Аскарлович, Торайғыров университеті, 4 курс студенті, Faculty of Computer Science, Павлодар, 140013, Қазақстан Республикасы, e-mail: azezbek@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0755-9235>

Тайболдина Қаламқас Радылхановна, т. ғ. м., аға оқытушы, Stem-білім беру жоғары мектебі, Шәкәрім университеті, Семей қ., 071412, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.taiboldina@shakarim.kz, <https://orcid.org/0009-0002-8645-1226>

Шинов Владимир Александрович, магистрант, Сәтбаев университеті, Алматы, 040447, Қазақстан Республикасы, e-mail: nixr4g3@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3212-1348>

Шабдан Еркін, PhD, Аға ғылыми қызметкер, «Research Group alt Air nanolab» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Алматы, 050043, e-mail: nanotechkz2012@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0113-8987>

Хамзина Ботагөз Еркенқызы, Педагогика ғылымдарының докторы, доцент, қауымд. профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, b.khamzina@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0552-7464>

Хуанбай Есенболды, Физика-математика ғылымдарының кандидаты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана, 010000, Қазақстан Республикасы, e.khuanbay@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5448-1645>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Айтбеков Бекзат Саматулы, магистрант по специальности «Компьютерные науки и инженерия», Школа разработки программного обеспечения, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: 242736@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-7861-2201>

Агитаев Исамурат Амандыкулы, магистрант 2 курса, Торайғыров университет, Faculty of Computer Science, г. Павлодар, 140013, Республика Казахстан, e-mail: colesattac@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-8655-7183>

Алиакбарова Әдемау Аманқызы, Младший научный сотрудник Республика Казахстан, ТОО «Research Group altAir nanolab», Алматы, 050043, ademau@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7428-8279>

Айтқазина Әсия Мұхаметқанқызы, старший преподаватель, магистр, Технологический факультет, Таразский университет имени М. Х. Дулати, Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: askoasko1979@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1104-3060>

Акилбеков Абдираш Тасанович, доктор физико-математических наук, профессор Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01000, Республика Казахстан, e-mail: akilbekov_at@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6366-6705>

Алиев Шаршенали, кандидат физико-математических наук, доктор педагогических наук, профессор, кафедра математики, Кыргызский государственный университет имени И. Арабаева, г. Бишкек, 720011, Республика Кыргызстан, e-mail: alidoc2010@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4704-2953>

Алиева Молдир Ермекбаевна, м. ес. Н., ст. Преподаватель, кафедра физики Казахского национального педагогического университета имени Абая, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>

Аралбаева Гульнара Мырзахановна, PhD, ассоц. профессор Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01000, Республика Казахстан, e-mail: aralbayevagulnara@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6827-5567>

Асқар Шырайлым Ұланқызы, магистр естественных наук, преподаватель, Высшая школа Stem-образования, Шәкәрім университет, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: s.asqar@shakarim.kz, <https://orcid.org/0009-0003-9200-434X>

Жартыбаева Макпал, PhD, доцент Школы разработки программного обеспечения, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: M.Zhartybayeva@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3987-9353>

Бакытжан Абдурахим Нуржанулы, магистрант по специальности «Компьютерные науки и инженерия», Школа компьютерной инженерии, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: 242809@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-2726-846X>

Бакранова Дина Игоревна, PhD, Ассоциированный профессор SDU University, Школа информационных технологий и прикладной математики, 040900, г. Каскелен, Республика Казахстан, Старший научный сотрудник, Республика Казахстан, ТОО «Research Group altAir nanolab» Алматы, 050043, e-mail: dinabakranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0793-9905>

Батешов Ержан Асанович, кандидат педагогических наук, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, 010000, Республика Казахстан, ye.bateshov@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2116-2108>

Бекмырза Кенжебатыр Жағыпарұлы, Преподаватель-исследователь, кафедра Технической физики, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: kbekmyrza@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8902-8736>

Бокаева Мунира Садвокасовна, магистр математики, Маргулан университет, Республика Казахстан, г. Павлодар, e-mail: muni_r@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0893-3043>

Бештаева Разила Абзелхановна, старший преподаватель, магистр, Технологический факультет, Таразский университет имени М. Х. Дулати, Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: razila-83@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2456-9353>

Даниярова Жанат Капсатгаровна, к. п. н., факультет CS, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: daniyarova1957@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2455-1305>

Дүйсебаева Гүлжан Қасымбайқызы, старший преподаватель, магистр, Технологический факультет, Таразский университет имени М. Х. Дулати, Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: duisebayevagk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6000-3295>

Егемберді Шынар Қанатқызы, старший преподаватель, магистр, Технологический факультет, Таразский университет имени М. Х. Дулати, Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: Shinar.egemberdi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5910-5032>

Ержан Бауыржан, PhD-докторант по физике, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: bauyr.phy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-5652-1039>

Жумабекова Венера Нурадиновна, PhD, Ассоциированный профессор факультета математики, физики и информатики, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: zh.venera@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7223-5373>

Жукенов Марат Каратаевич, Кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор (доцент), Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, 010000, Республика Казахстан, m.zhukenov@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2942-3931>

Жавлиева Ардак Тугелкызы, м. п. н., преподаватель кафедры физики Казахского национального женского педагогического университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: zhavliyeva.11@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4554-7604>

Кайбасова Динара Женисбековна, PhD, ассоц.профессор, «Школа программной инженерии», Astana IT University, г. Астана, 100000, Республика Казахстан, e-mail: dinara.kaiabasova@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8410-7758>

Кенгесбаева Сара Сапарғалиқызы, приглашенный научный сотрудник, докторант, Пенсильванский государственный университет, Пенсильвания, 16801, Соединённые Штаты Америки, e-mail: sarakengesbayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6568-4536>

Кувандикова Алтынай Серикбайқызы, студент бакалавриата по специальности «Научная физика», Институт физико-технических наук, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: altynaikuvandikova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9245-9570>

Касенова Толкын Калмахановна, и.о. ассоциированного профессора, PhD, Технологический факультет, Таразский университет имени М. Х. Дулати, Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: tkkasenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3158-8711>

Какимов Асхат Бекайдарович, PhD, преподаватель Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 01000, Республика Казахстан, e-mail: kakimovaskhat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7511-7443>

Какимжанов Дауир Нуржанұлы, научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, 070018, Республика Казахстан, e-mail: d.kakimzhanov19@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9453-0456>

Карипбаев Жакып Глеубаевич, PhD, ассоц. профессор Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, 01000, Республика Казахстан, e-mail: Karipbayev_zht_1@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4066-1826>

Койшина Акмарал Итемгеновна, доцент кафедры «Нефтехимическая инженерия» Каспийского университета технологий и инженерии имени Ш. Есенова, Республика Казахстан, Актау, 130000, Республика Казахстан, e-mail: akmaral.koishina@yu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5537-9474>

Коштыбаев Талгат Бектасович, кандидат физико-математических наук, и.о. профессора кафедры физики Казахского национального женского педагогического университета, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>

Маликова Феруза, PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан, Алматинский технологический университет, Алматы, 050060, Республика Казахстан, e-mail: feruzamalikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0527-322X>

Мурал Айбол, мл. научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, 070018, Республика Казахстан, e-mail: aibolm02@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>

Нәдіров Нұртас Қонысұлы, Сеньор-лектор, Магистр технических наук, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: n.nadirov@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-6011-8109>

Найманова Динара Сакеновна, кандидат педагогических наук, профессор кафедры «Информационные технологии» Торайғыров университет, г. Павлодар, 140013, Республика Казахстан, e-mail: dinarasakenkyzy83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4434-4852>

Оспанова Назира Нургазыевна, Заведующая кафедрой «Информационные технологии», Торайғыров университет, Павлодар, 140013, Республика Казахстан, e-mail: ospanova.n@teachers.tou.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0100-1008>

Оразмұхамет Нұрал Нұржанұлы, студент факультета естествознания и географии, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: orazmukhametnn@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-6295-4009>

Опахай Серікжан, автор-корреспондент, ст. преподаватель кафедры ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: serikzhan.opakhai07@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6789-4844>

Оспанова Динара Манаповна, магистр технических наук, директор департамента по академическим вопросам, Шәкәрім университет, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: ODM-1778@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6131-4113>

Оспанова Жулдуз Джумагалиевна, ст. преподаватель кафедры «Физики, математики и приборостроения», НАО «Торайғыров университет», Факультет Computer Science, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, zhulduz-ospan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7274-3925>

Идрисова Тунык Кайратовна, научный сотрудник, Республика Казахстан, ТОО «Research Group alt Air nanolab», Алматы, 050043, e-mail: zhamauovatk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-6352-0908>

Ибатаев Жаркын Абыкенович, кандидат химических наук, ассоциированный профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, 010000, Республика Казахстан, zh.ibatayev@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2261-222X>

Пангалиев Ербол, ст. преподаватель кафедры экологии и геологии Каспийского университета технологий и инженерии имени Ш. Есенова, Республика Казахстан, г. Актау, 130000, Республика Казахстан, электронная почта: yerbol.pangaliyev@yu.edu.kz, [ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2392-4180](https://orcid.org/0000-0002-2392-4180)

Рахадиллов Бауыржан Корабаевич, PhD, ассоц. профессор, ст. научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 070018, e-mail: rakhadilovb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>

Рымгалиев Алишер Ержанович, Торайғыров университет, магистрант 2 курса, Faculty of Computer Science, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: alisher.rymgaliyev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7947-1539>

Рымгалиева Анель Ержановна, Маргулан университет», преподаватель, Высшая школа гуманитарных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: anelrymgaliyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0032-0731>

Рахымбай Лунара Саматқызы, PhD, Старший научный сотрудник, Республика Казахстан, ТОО «Research Group altAir nanolab», Алматы, 050043, e-mail: lunara.rakhymbay@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7924-837X>

Таубакабыл Нурлыбек Муратбекулы, Преподаватель, Магистр технических наук, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: tbkbl.03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0440-6739>

Токжигитова Нургуль Каирбаевна, Торайғыров университет, PhD доктор, ассоц. профессор (доцент), Faculty of Computer Science, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: nurgul287@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3777-6454>

Татенов Азизбек Аскарлович, студент 4 курса, Торайғыров университет, Faculty of Computer Science, Павлодар, 140013, Республика Казахстан, e-mail: azezbek@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0755-9235>

Тайболдина Қаламқас Радылхановна, магистр технических наук, ст. преподаватель, Высшая школа Stem-образования, Шәкәрім университет, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: k.taiboldina@shakarim.kz, <https://orcid.org/0009-0002-8645-1226>

Сарбасова Нурбану Даукеновна, магистр математики, профессор, Факультет CS, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: nurbanu_66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7280-7434>

Сейтханова Айнура Кусбековна, PhD, кандидат физико-математических наук, ассоц. профессор Павлодарского педагогического университета имени Ә. Марғұлана, г. Павлодар, Республика Казахстан, 140000, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8610-5492>

Сыдықова Аяулым Рақымбекқызы, магистр естественных наук, преподаватель, Высшая школа Stem-образования, Шәкәрім университет, г. Семей, 071412, Республика Казахстан, e-mail: sydykova_ayaulym@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7046-6924>

Сырлыбекқызы Самал, профессор кафедры экологии и геологии Каспийского университета технологий и инженерии им. Ш. Есенова, Республика Казахстан, г. Актау, 130000, Республика Казахстан, электронная почта: samal.syrlybekkyzy@yu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0260-0611>

Смайлов Нуржигит Куралбаевич, профессор, PhD, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Шинов Владимир Александрович, магистрант, Satbayev University, Алматы, Республика Казахстан, 040447, e-mail: nixr4g3@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3212-1348>

Шабдан Еркин, PhD, Старший научный сотрудник, Республика Казахстан, ТОО «Research Group altAir nanolab», Алматы, 050043, e-mail: nanotechkz2012@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0113-8987>

Хамзина Ботагоз Еркеновна, Доктор педагогических наук, доцент, ассоц. профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, 010000, Республика Казахстан, b.khamzina@kazatu.edu.kz <https://orcid.org/0000-0002-0552-7464>

Хуанбай Есенболды, Кандидат физико-математических наук, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, 010000, Республика Казахстан, e.khuanbay@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5448-1645>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aitbekov Bekzat Samatuly, Master's student in Computer Science and Engineering, School of Software Engineering, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 242736@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-7861-2201>

Agitayev Issamurad Amandykuly, 2d year master's student, Toraighyrov University, Faculty of Computer Science, Pavlodar, 140013, Republic of Kazakhstan, e-mail: colesattac@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-8655-7183>

Aliakbarova Ademau, Junior Researcher, Republic of Kazakhstan, Research Group altAir nanolab, Almaty, 050043, ademau@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7428-8279>

Aitkazina Assiya, Senior Lecturer, Master's degree, Faculty of Technology, M. Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: askoasko1979@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1104-3060>

Abdirash Tasanovich Akilbekov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: akilbekov_at@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6366-6705>

Aliiev Sharshenaly, candidate of Physical and Mathematical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of the Department of Mathematics the Kyrgyz State University named after I. Arabaev, Bishkek, 720011, Republic of Kyrgyzstan e-mail: alidoc2010@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4704-2953>

Aliyeva Moldir Ermekbaevna, master of Sciences, Senior lecturer of the Physics Department of the Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Dostyk, 13, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: moldir-2008@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0440-6211>

Aralbayeva Gulnara Myrzakhanovna, PhD, Associate Professor of L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aralbayevagulnara@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6827-5567>

Askar Shyrailym, Master of Natural Sciences, Lecturer, Higher School of STEM Education, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: s.asqar@shakarim.kz, <https://orcid.org/0009-0003-9200-434X>

Bekmyrza Kenzhebatyr Zhagyparuly, Lecturer-researcher of the Department of Technical Physics, Eurasian National University named after L. N. Gumilyov, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kbekmyrza@yandex.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8902-8736>

Bokayeva Munira, Master of Mathematics Degree, Margulan University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar, e-mail: muni_r@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0893-3043>

Zhartybayeva Makpal, PhD, associate professor of School of Software Engineering, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: M.Zhartybayeva@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-3987-9353>

Bakytzhan Abdurakhim Nurzhanuly, master's student in «Computer Science and Engineering», School of Software Engineering, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: 242809@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-2726-846X>

Bakranova Dina, PhD, Associate Professor SDU University, School of Information Technology and Applied Mathematics, Almaty region, Karasai district, 040900, Kaskelen, Republic of Kazakhstan, Senior Researcher, Republic of Kazakhstan, LLP «Research Group altAir nanolab» Almaty, 050043, e-mail: dinabakranova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0793-9905>

Bateshov Yerzhan Assanovich, Candidate of Pedagogical Sciences, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, ye.bateshov@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2116-2108>

Beshtaeva Razila, Senior Lecturer, Master's degree, Faculty of Technology, M. Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: razila-83@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2456-9353>

Daniyarova Zh. K., Candidate of Pedagogical Sciences, Faculty of CS, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: daniyarova1957@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2455-1305>

Duisebaeva Gulzhan, Senior Lecturer, Master's degree, Faculty of Technology, M. Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: duisebayevagk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6000-3295>

Egemberdi Shynar, Senior Lecturer, Master's degree, Faculty of Technology, M. Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, 080000, Republic of

Kazakhstan, e-mail: Shinar.egemberdi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5910-5032>

Yerzhan Bauyrzhan, PhD student (physics), Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bauyr.phy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-5652-1039>

Zhumabekova Venera, PhD, Associate Professor Faculty of mathematics, physics and informatics, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh.venera@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7223-5373>

Zhukenov Marat Karataevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, m.zhukenov@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2942-3931>

Kengesbayeva Sara Sapargalikyzy, Visiting Scholar, PhD student, The Pennsylvania State University, PA, 16801, The United States of America, e-mail: sarakesbayeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6568-4536>

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>

Kakimov Askhat Bekaidarovich, PhD, Lecturer at L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: kakimovaskhat@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7511-7443>

Kakimzhanov Daur, Researcher of PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: d.kakimzhanov19@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9453-0456>

Karipbayev Zhakyp Tleubayevich, PhD, Associate Professor of L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 01000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Karipbayev_zht_1@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4066-1826>

Koishina Akmaral Itemgenovna, Associate Professor of the Department of Petrochemical Engineering, Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov, Republic of Kazakhstan, Aktau, 130000, Republic of Kazakhstan, e-mail: akmaral.koishina@yu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5537-9474>

Koshtybayev Talgat Bektasovich, candidate of physical and mathematical sciences, Acting Professor, Department of Physics, Kazakh National Women's Pedagogical University, Almaty, Aiteke bi street, 99, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: koshtybayev70@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7344-6801>

Malikova Feruza, PhD, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, Almaty Technological University, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan, e-mail: feruza-malikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0527-322X>

Mural Aibol, Junior researcher of PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: aibolm02@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>

Nadirov Nurtas Konysuly, Senior lecturer, Master of Technical Science, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, n.nadirov@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0006-6011-8109>

Naimanova Dinara Sakenovna, Candidate of pedagogical sciences, professor of the Department of «Information Technology» Toraighyrov University, Pavlodar, 140013, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinasakenkyzy83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4434-4852>

Idrissova Tunyk, Researcher, Republic of Kazakhstan, LLP «Research Group altAir nanolab», Almaty, 050043, e-mail: zhamauovatk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-6352-0908>

Ibatayev Zharkyn Abykenovich, Candidate of chemical science, Associate Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, zh.ibatayev@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2261-222X>

Khamzina Botagoz Yerkenovna, Doctor of Pedagogical Sciences, associate professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, b.khamzina@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0552-7464>

Khuanbay Yesenboldy, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e.khuanbay@kazatu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-5448-1645>

Kuvandikova Altynay Serikbaykyzi, bachelor's student majoring in Scientific Physics, Institute of Physics and Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: altynaikuvandikova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9245-9570>

Ospanova Nazira Nurgaziyevna, Head of the Department of «Information Technology», Toraighyrov University, Pavlodar, 140013, Republic of Kazakhstan, e-mail: ospanova.n@teachers.tou.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0100-1008>

Orazmukhmet Nural Nurzhanuly, student of the Faculty of Natural Sciences and Geography, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: orazmukhmetnn@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-6295-4009>

Opakhai Serikzhan, Corresponding author, Senior Lecturer, Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: serikzhan.opakhai07@gmail.com, 0000-0001-6789-4844

Ospanova Dinara, Master of Technical Sciences, Director of the Academic Affairs Department, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: ODM-1778@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6131-4113>

Ospanova Zhulduz Dzhumagalievna, Senior Lecturer of the Department of «Physics, Mathematics and Instrumentation», «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Computer Science, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, zhulduz-ospan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7274-3925>

Pangaliev Erbol, Senior Lecturer, Department of Ecology and Geology, Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yesenov, Republic of Kazakhstan, Aktau, 130000, Republic of Kazakhstan, e-mail: yerbol.pangaliev@yu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2392-4180>

Rakhadilov Bauyrzhan Korabaevich, PhD, Associate Professor, senior research fellow of PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, 070018, e-mail: rakhadilovb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5990-7123>

Rymgaliyeva Anel Yerzhanovna, Margulan University, teacher, Higher School of Humanities, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, anelrymgaliyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-0032-0731>

Rymgaliyev Alisher Yerzhanovich, Toraighyrov University, 2nd year master's student, Faculty of Computer Science, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, alisher.rymgaliyev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7947-1539>

Rakhymbay Lunara, PhD, Senior Researcher, Republic of Kazakhstan, LLP «Research Group altAir nanolab», Almaty, 050043,

e-mail: lunara.rakhymbay@nu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7924-837X>

Smailov Nurzhigit Kuralbayevich, Professor, PhD, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Tokzhigitova Nurgul Kayrbaevna, Toraighyrov University, PhD, Associate Professor, Faculty of Computer Science, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, nurgul287@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3777-6454>

Sarbasova Nurbanu, Master of Mathematics Degree, Faculty of CS, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurbanu_66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7280-7434>

Seitkhanova Ainur, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, PhD, Associate Professor of Pavlodar Pedagogical University named after A. Margulan, Pavlodar, Republic of Kazakhstan, 140000, e-mail: ainur1179@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8610-5492>

Sydykova Ayaulym, Master of Natural Sciences, Lecturer, Higher School of STEM Education, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: sydykova_ayaulym@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7046-6924>

Samal Syrlybekkyzy, professor at the Department of Ecology and Geology at the Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yesenov, Republic of Kazakhstan, Aktau, 130000, Republic of Kazakhstan, e-mail: samal.syrlybekkyzy@yu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0260-0611>

Taubakabyl Nurlybek Muratbekuly, Teacher, Master of Technical Science, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, tbkbl.03@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0440-6739>

Tatenov Azizbek Askarovich, 4th year student Toraighyrov University, Faculty of Computer Science, Pavlodar, 140013, Republic of Kazakhstan, e-mail: azezbek@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0755-9235>

Shinov Vladimir Aleksandrovich, master's student, Satbayev University, Almaty, 040447, Republic of Kazakhstan, e-mail: nixr4g3@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3212-1348>

Shabdan Yerkin, PhD, Senior Researcher, Republic of Kazakhstan, LLP «Research Group altAir nanolab» Almaty, Navoi St. 208/6, 050043, e-mail: nanotechkz2012@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0113-8987>

Tolkyn Kasenova, Acting Associate Professor, PhD, Faculty of Technology, M.Kh. Dulaty Taraz University, Taraz, 080000, Republic of Kazakhstan, e-mail: tkkasenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3158-8711>

Taiboldina Kalamkas, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Higher School of STEM Education, Shakarim University, Semey, 071412, Republic of Kazakhstan, e-mail: k.taiboldina@shakarim.kz, <https://orcid.org/0009-0002-8645-1226>

Tugelkyzy Zhavliyeva Ardak, master of Pedagogical Sciences, lecturer of the Department of physics of the Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhavliyeva.11@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4554-7604>

**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.). Рекомендуемое 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 подрисовочные 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)

ОБРАЗЕЦ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

В электронном варианте приводятся **полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail** (номера телефонов для связи редакции с авторами, не публикуются);

МРНТИ 04.51.59

DOI xxxxxxxxxxxxxxxx

Сведения об авторах

С. К. Антикеева*, С. К. Ксембаева

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

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 искомых 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., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайғырова; 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 Pedagogy. – 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 ekologicheskomu 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. Toraigurov 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 ҚҰЗЫРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзыреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзыреттілігін 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. Antikeeva, 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 ТОРАЙГЫРОВ 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 редколлегией, 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, фабрикации, 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) редколлегии 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 редколлегии 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 редколлегии, и, как результат, на решение редколлегии относительно публикации рукописи.

Главный редактор, член редколлегии и рецензенты должны оповестить о потенциальном конфликте интересов, который может как-то повлиять на решение редакционной коллегии. Члены редколлегии 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 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

7,50 Мб RAM

Шартты баспа табағы 10,01. 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 Мб RAM

Усл.печ.л. 10,01. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка Е. Е. Калихан

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4562

«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/>